

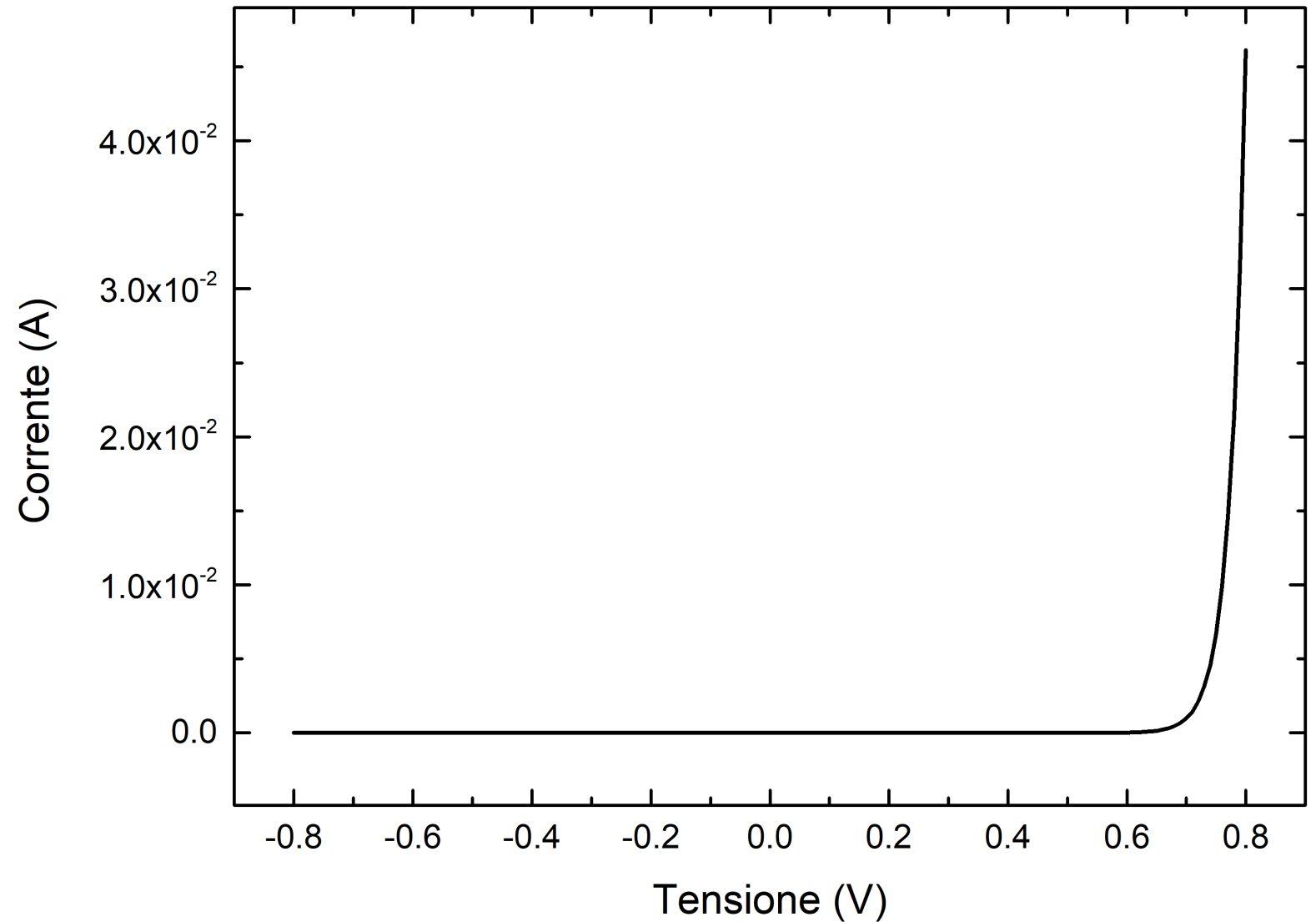
# Elettronica Digitale

## A.A. 2020-2021

Lezione 10/03/2021

# Giunzione P/N

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



# Caratteristica I-V: zone di funzionamento

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

Polarizzazione diretta ( $V_D > 0$ )

$$V_D \geq +4V_T \quad (e^4 = 54.6) \quad \Rightarrow \quad I_D \approx I_S \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right)$$

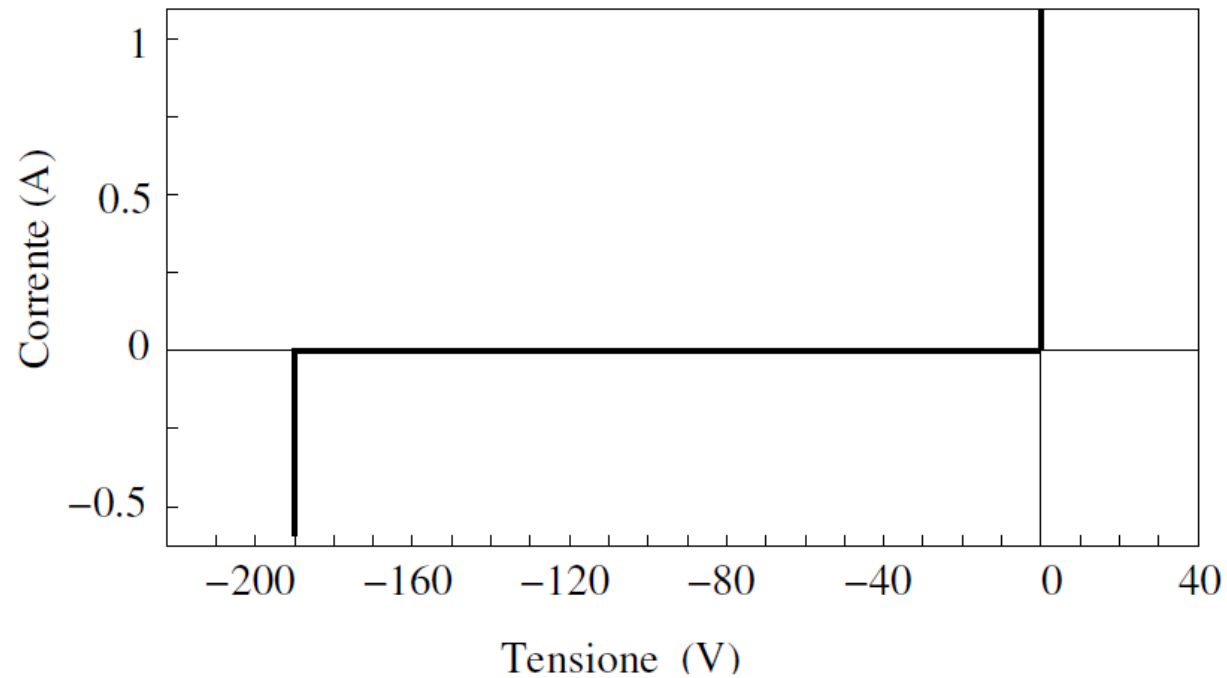
Polarizzazione inversa ( $V_D < 0$ )

$$V_D \leq -4V_T \quad (e^{-4} = 0.018) \quad \Rightarrow \quad I_D \approx -I_S$$

Polarizzazione nulla ( $V_D = 0$ )

$$\Rightarrow \quad I_D = 0$$

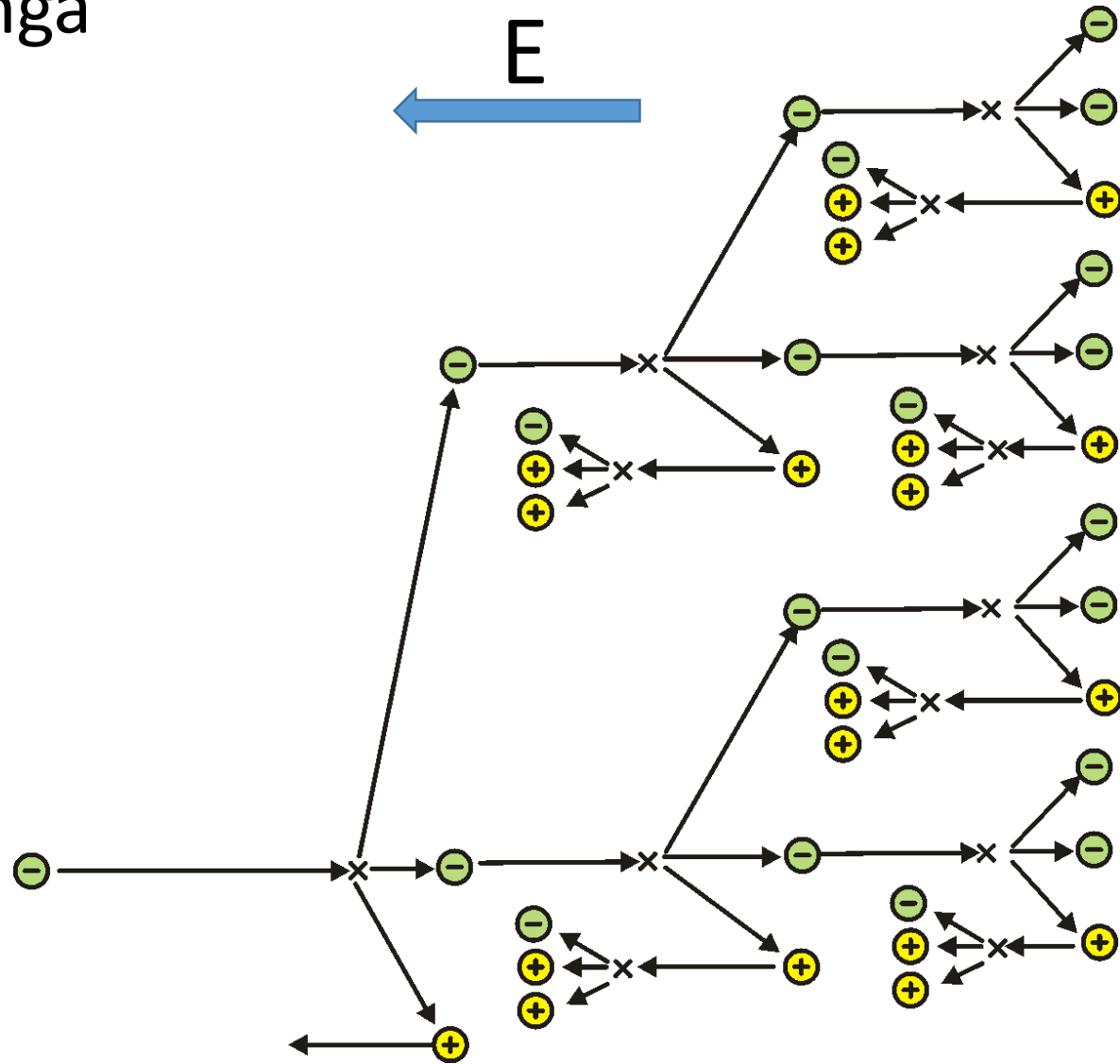
# Caratteristica I-V: fenomeno del breakdown



- Breakdown Zener: il breakdown Zener può essere descritto come la conseguenza della rottura dei legami covalenti nella zona di svuotamento causata dall'elevato campo elettrico.
- Breakdown a valanga: si verifica quando il campo elettrico nella zona di svuotamento può accelerare i portatori minoritari che attraversano la zona stessa fino a una velocità tale da rompere i legami covalenti degli atomi con cui collidono.

# Caratteristica I-V: fenomeno del breakdown

Breakdown a valanga



# Caratteristica I-V: fenomeno del breakdown

## Dipendenza dalla temperatura

- Effetto Zener: un aumento della temperatura fa sì che gli elettroni dei legami covalenti possiedano un'energia più alta e che quindi vengano estratti più facilmente per effetto del campo elettrico, producendo un incremento della corrente, a parità di tensione applicata.
- Effetto valanga: un aumento di temperatura causa una maggiore probabilità di urto tra le cariche mobili e gli atomi del reticolo e quindi i portatori acquistano in media un'energia minore tra un urto e il successivo, dando luogo, a parità di tensione applicata, a una minore corrente.

# Diodi Zener

I diodi che presentano tensioni di breakdown volutamente ridotte (al di sotto di qualche decina di volt) sono definiti “diodi Zener”, indipendentemente dall’effettivo meccanismo di breakdown.

$$|V_{BR}| > 7 V$$

predomina effetto valanga

$$|V_{BR}| < 5 V$$

predomina effetto Zener

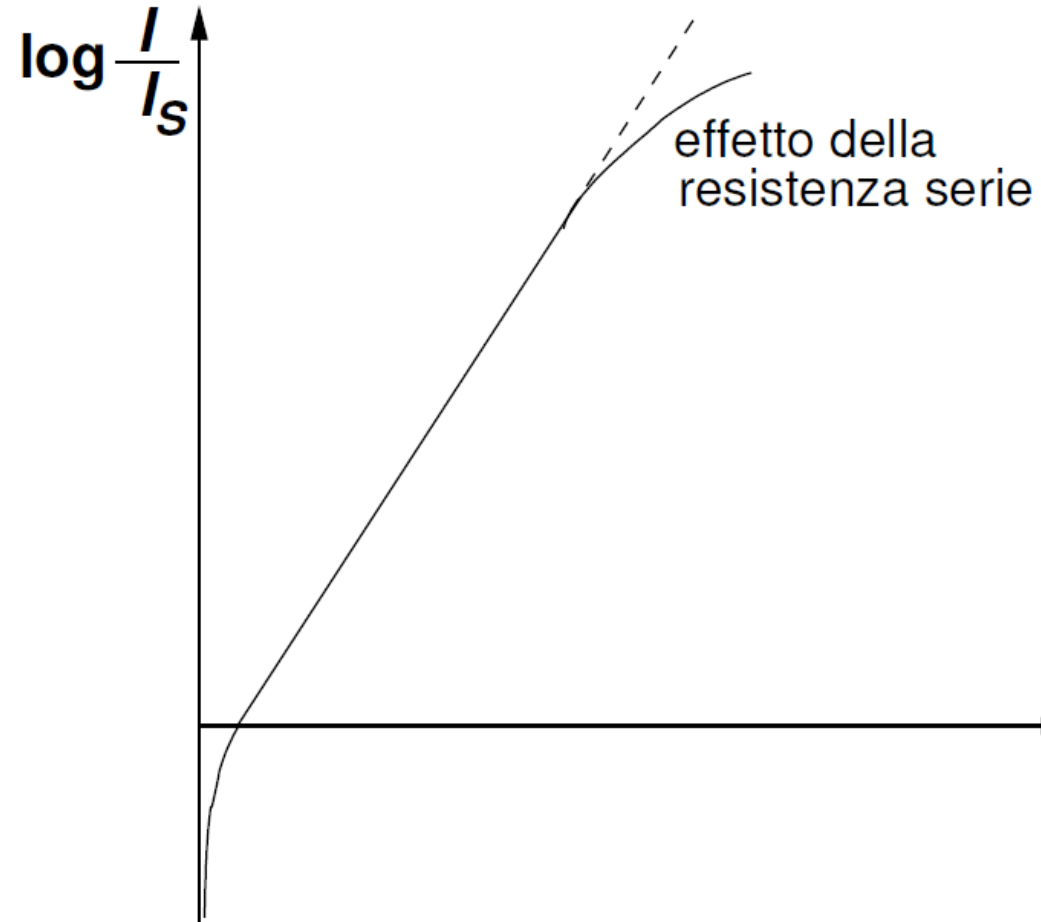
$$7 V < |V_{BR}| < 5 V$$

presenza entrambi i fenomeni



Stabilità in temperatura  $|V_{BR}| = 5.6 V$

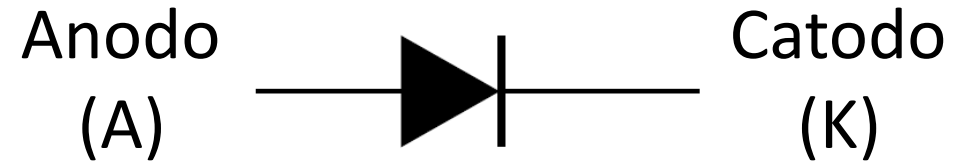
# Correnti elevate: effetto della resistenza serie



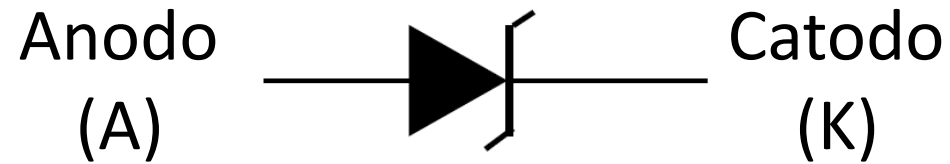


# Simboli circuitali

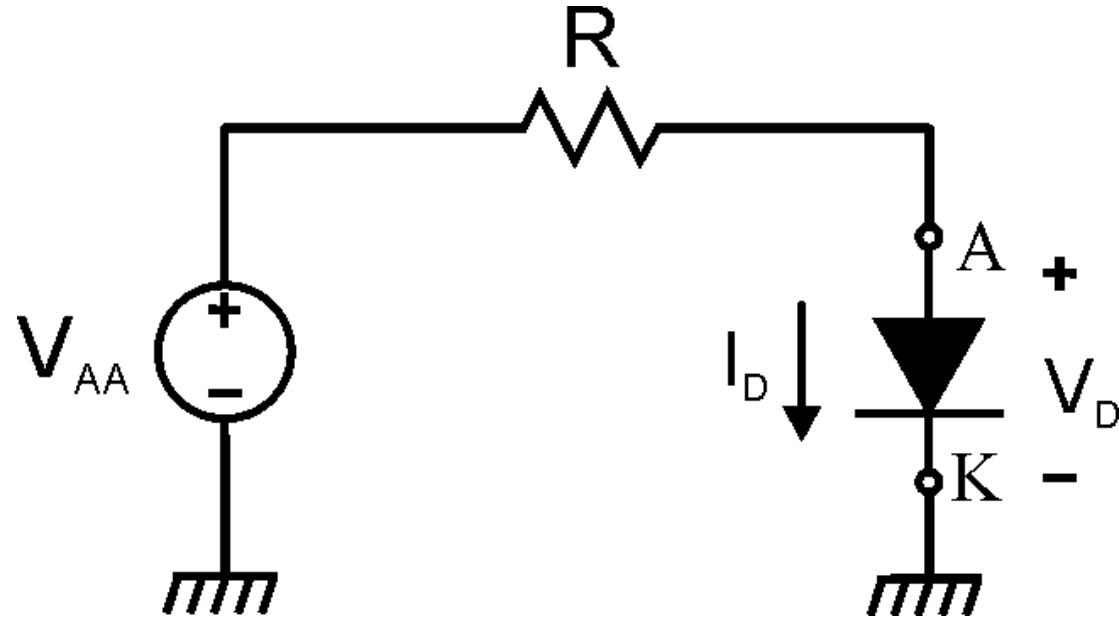
## DIODO



## DIODO ZENER



# Analisi dei circuiti



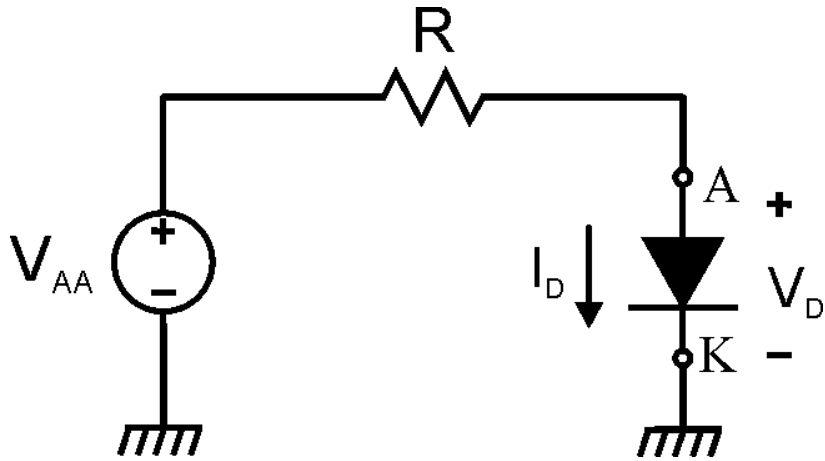
$$V_{AA} = RI_D + V_D$$

Eq. maglia – Legge di Kirchhoff

$$I_D = f(V_D)$$

Caratteristica del dispositivo

# Analisi dei circuiti – Modello esponenziale



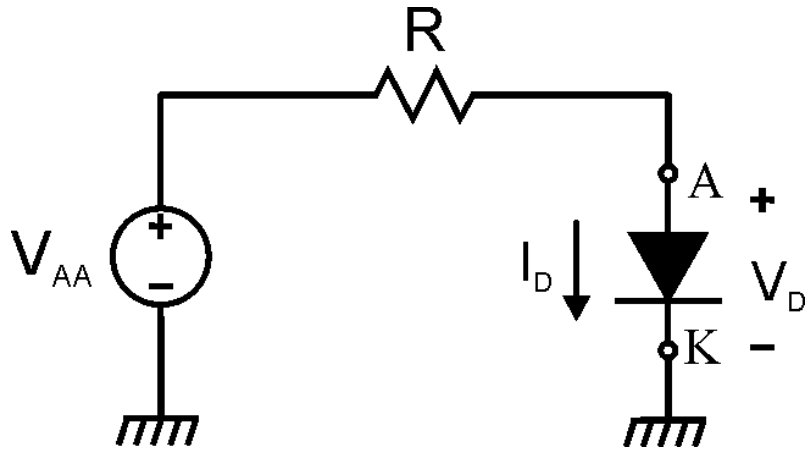
$$\left\{ \begin{array}{l} V_{AA} = RI_D + V_D \\ I_D = I_S \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \end{array} \right.$$

$$V_{AA} = RI_S \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) + V_D$$



Soluzione numerica

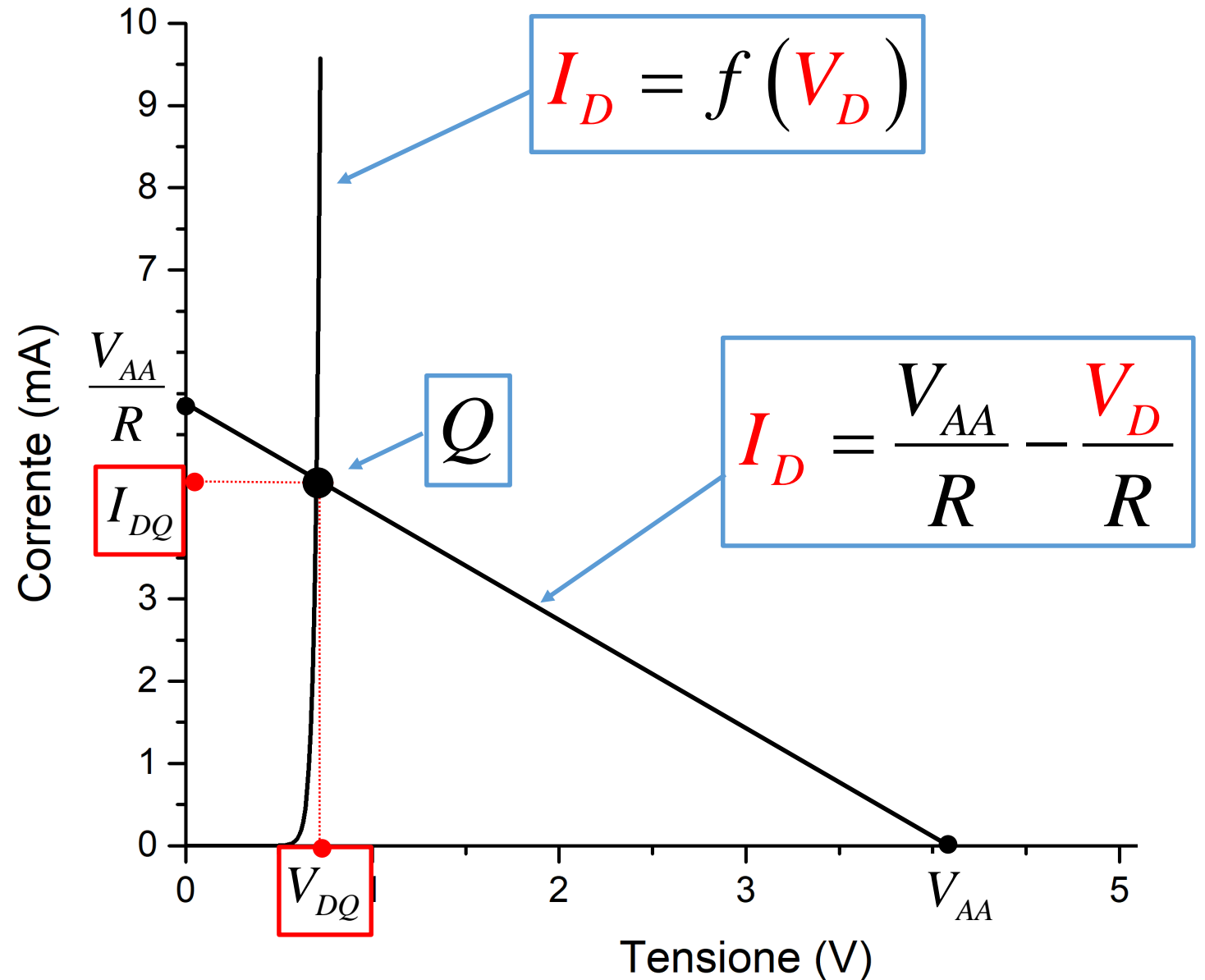
# Analisi dei circuiti – Metodo grafico – Retta di carico



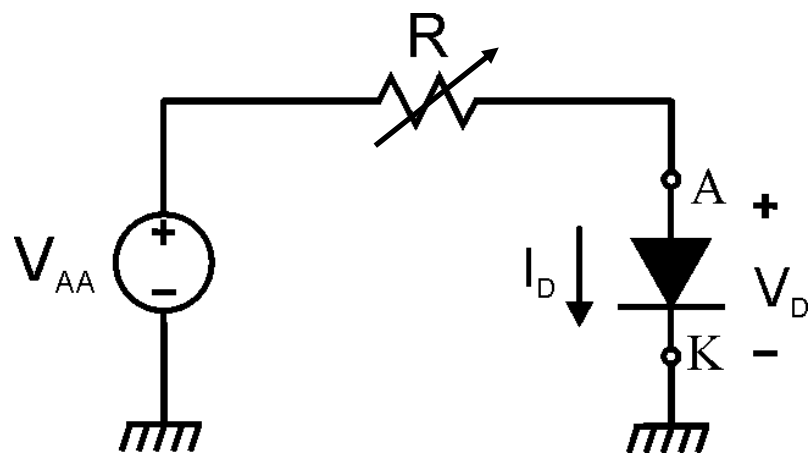
$$V_{AA} = RI_D + V_D$$

$$I_D = \frac{V_{AA}}{R} - \frac{V_D}{R}$$

Retta di carico

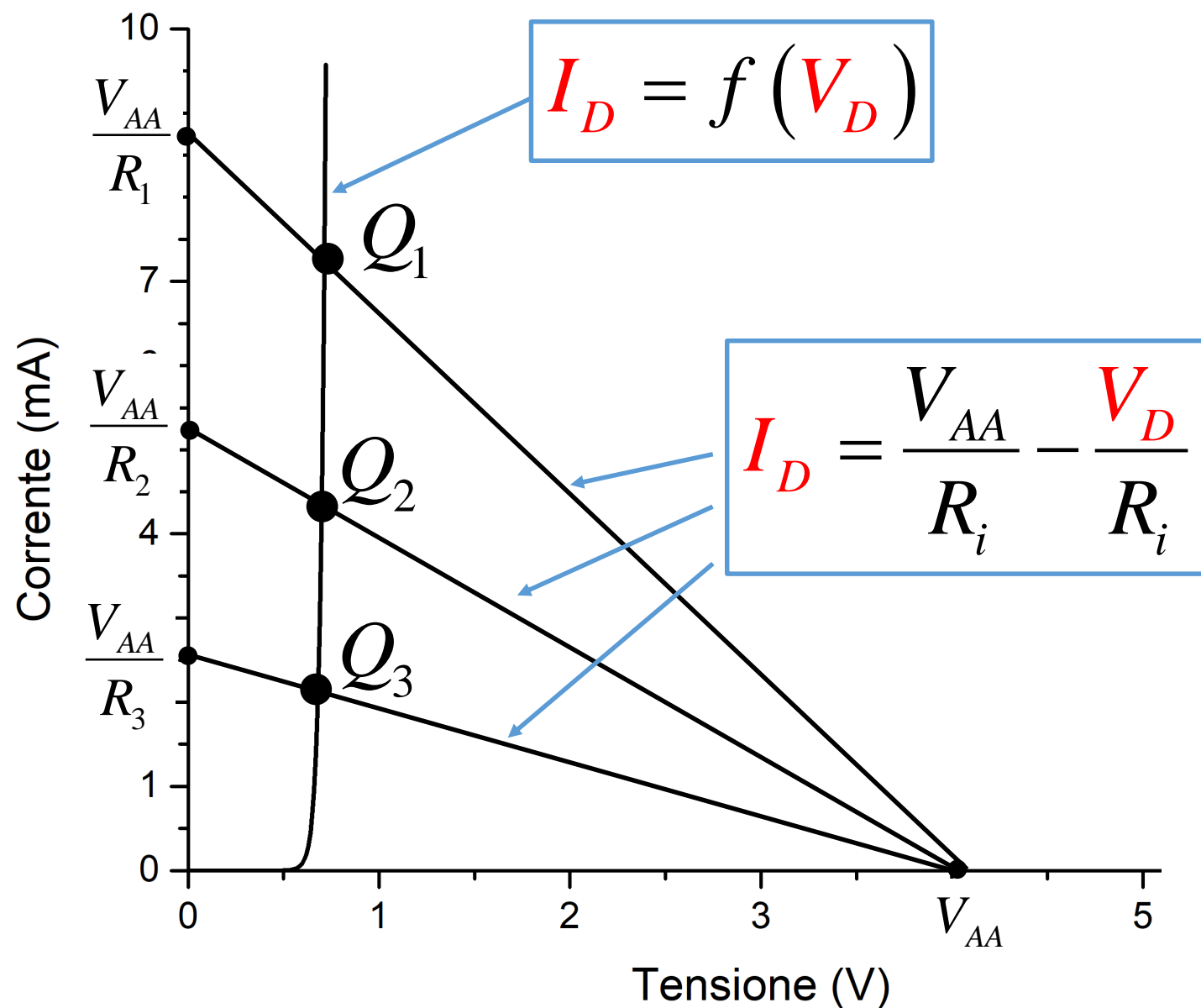


# Analisi dei circuiti – Metodo grafico – Retta di carico

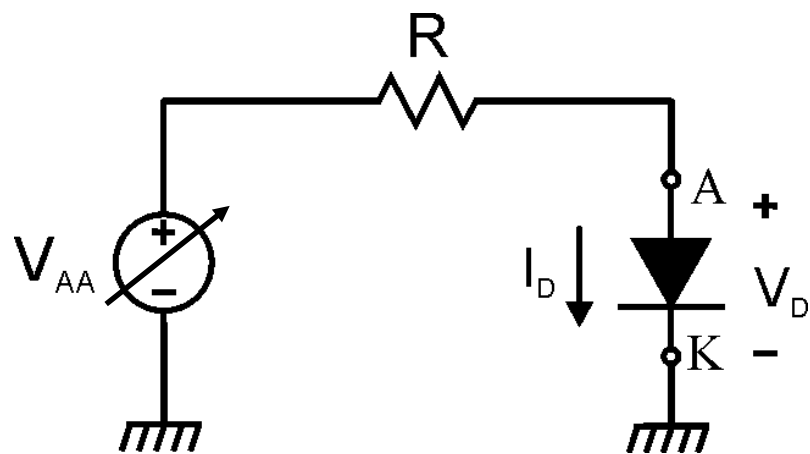


Dipendenza dal valore di  $R$

$$R_1 < R_2 < R_3$$

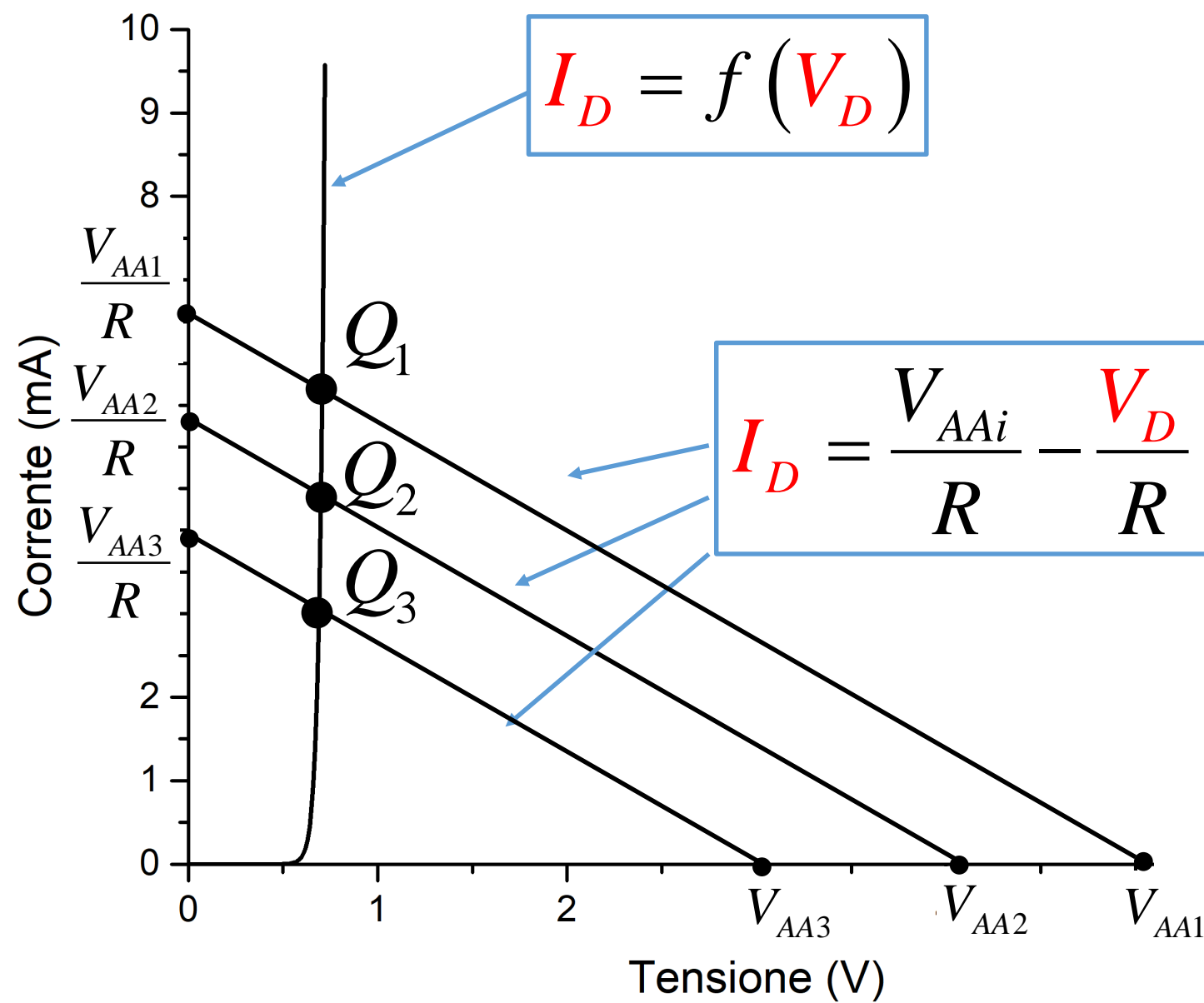


# Analisi dei circuiti – Metodo grafico – Retta di carico

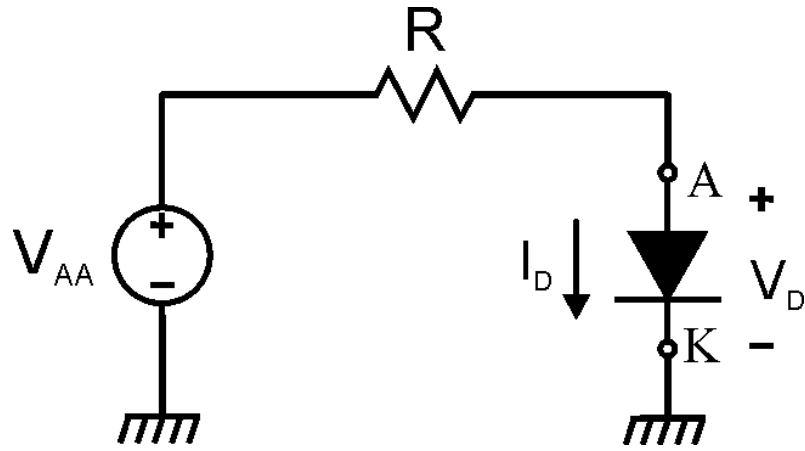


Dipendenza dal valore di  $V_{AA}$

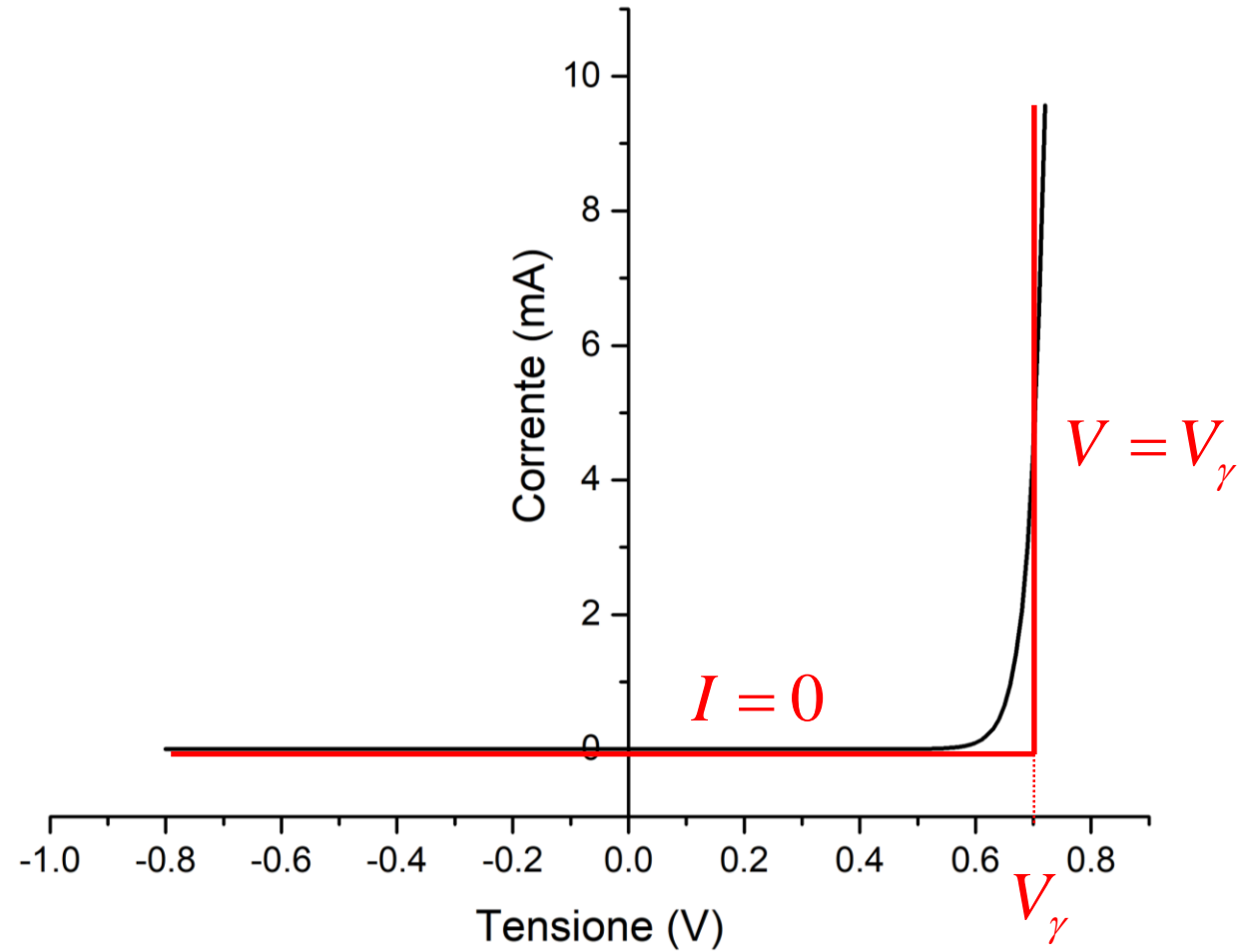
$$V_{AA1} > V_{AA2} > V_{AA3}$$



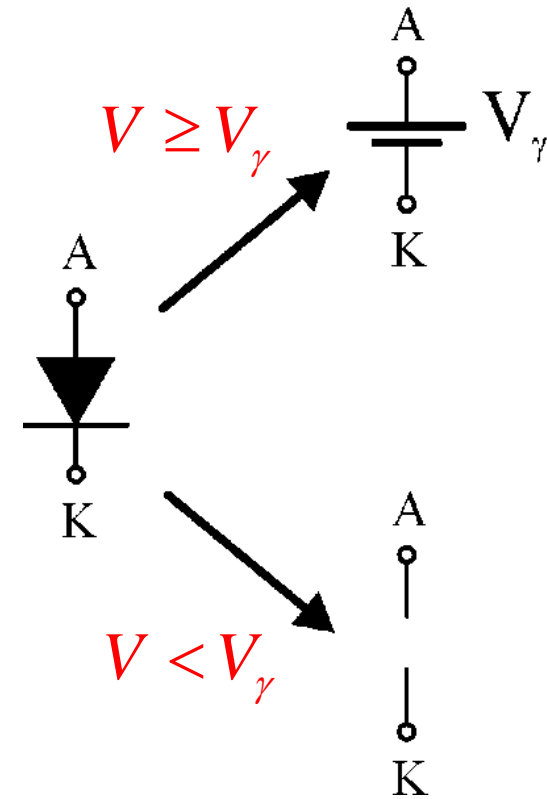
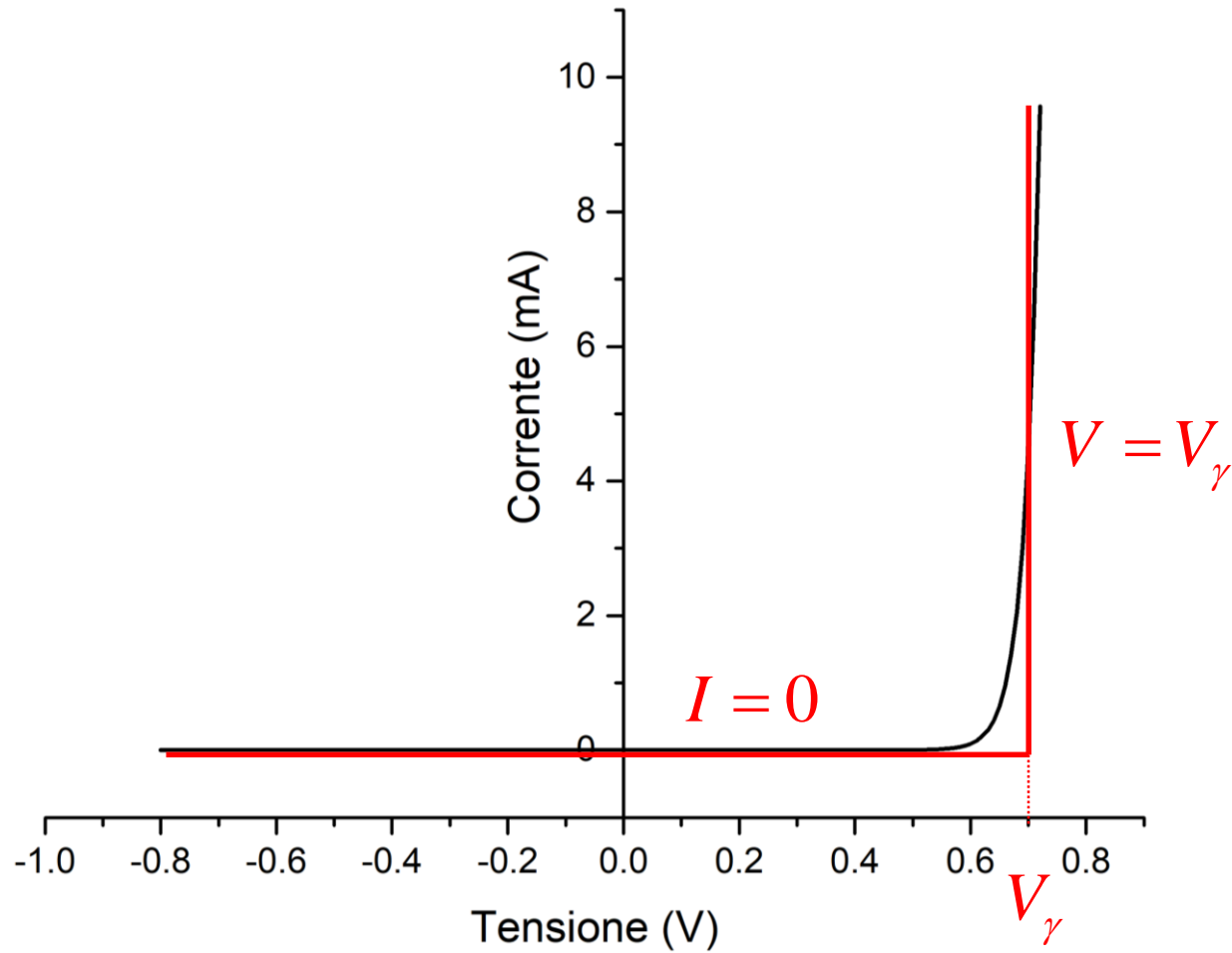
# Analisi dei circuiti – Modello a caduta di tensione costante



$$\left\{ \begin{array}{l} V_{AA} = RI_D + V_D \\ I_D = f(V_D) \end{array} \right.$$

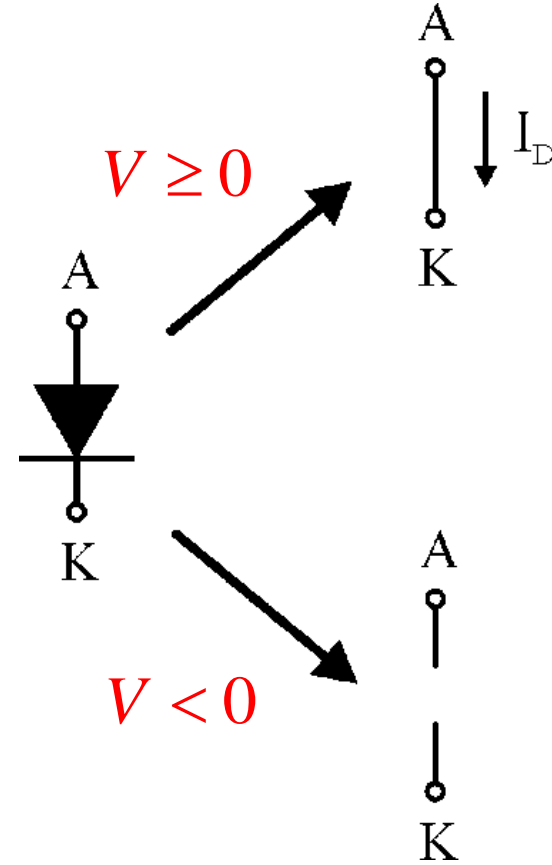
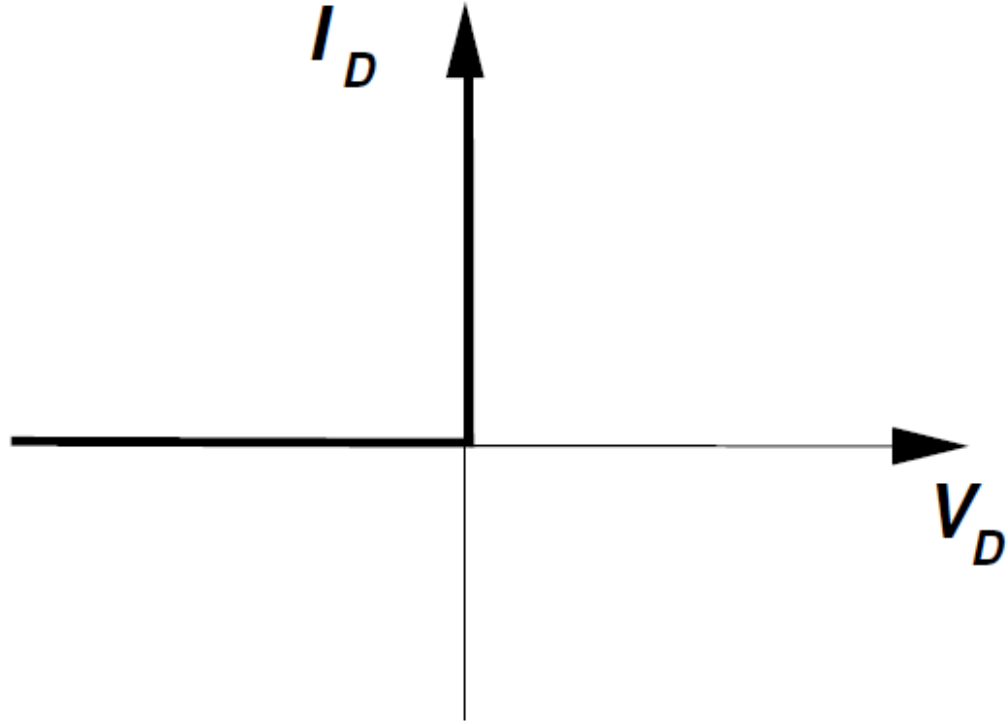


# Analisi dei circuiti – Modello a caduta di tensione costante

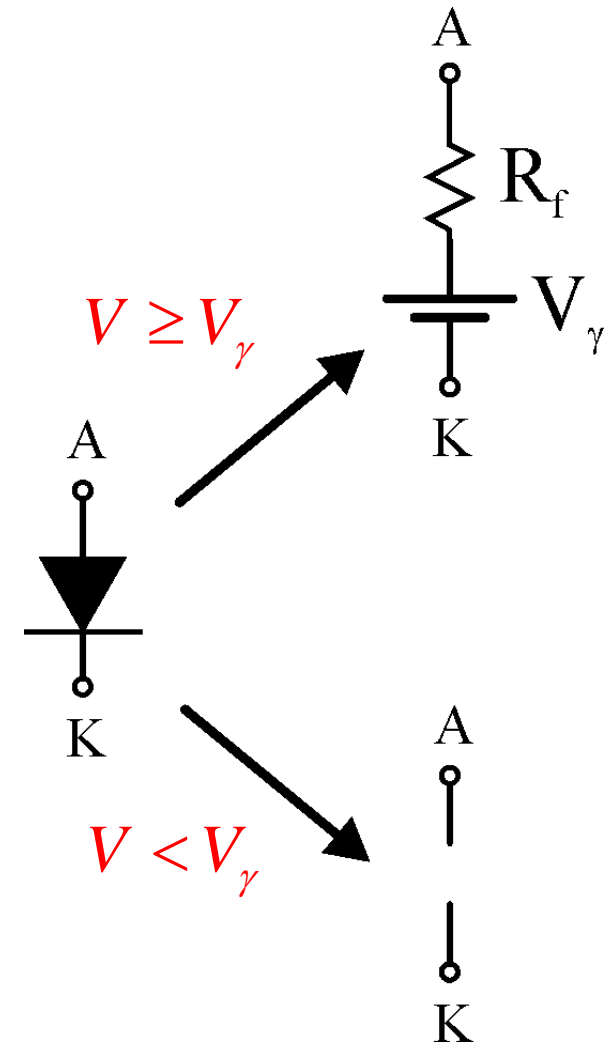
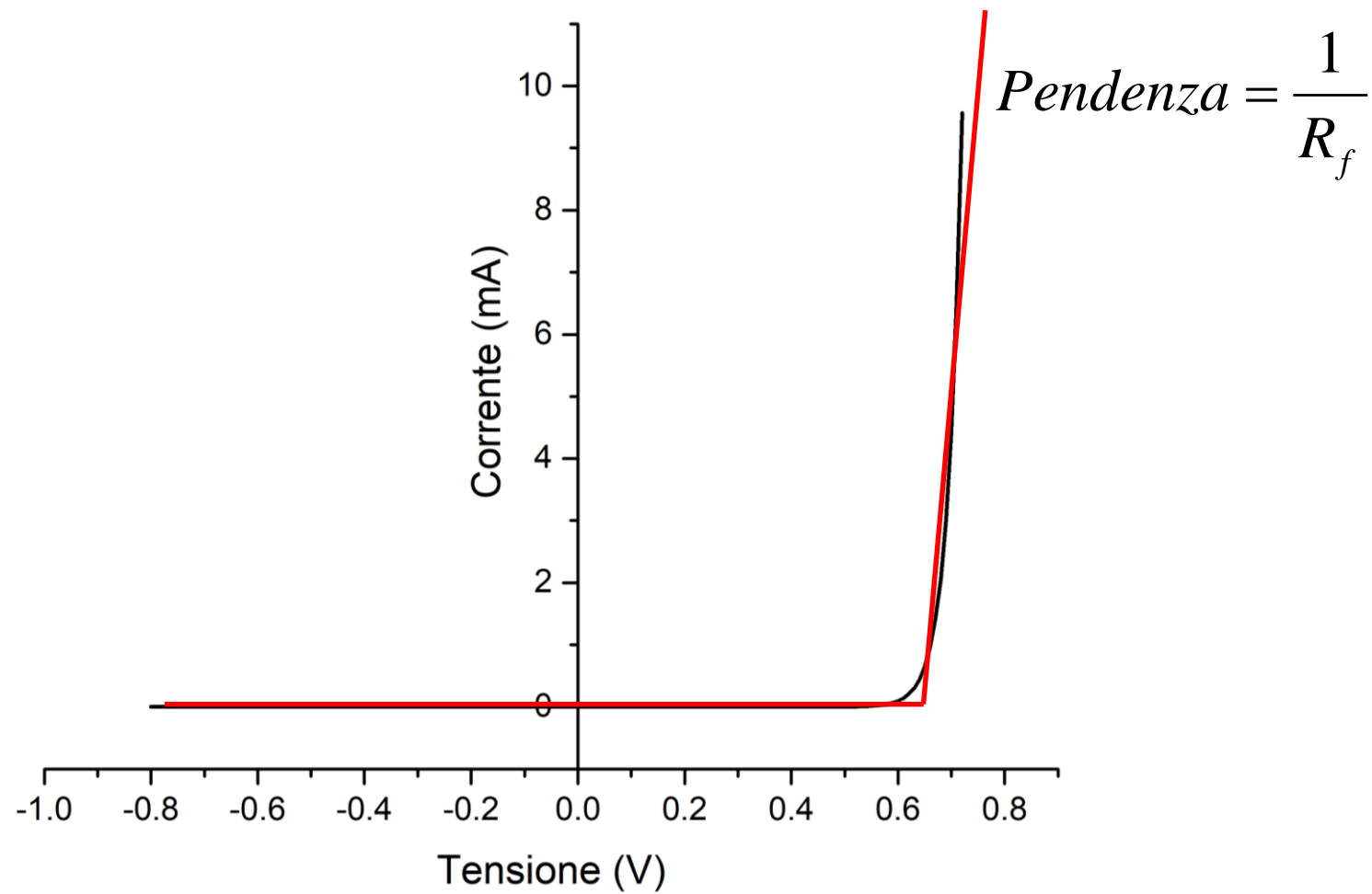




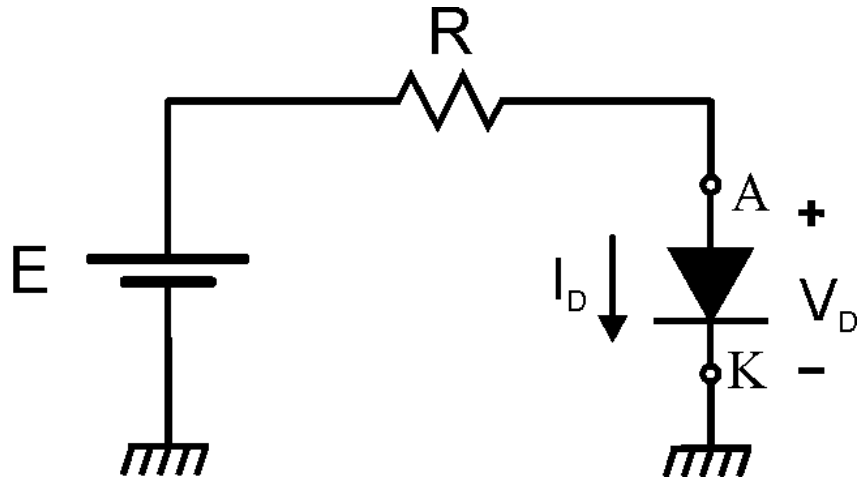
# Analisi dei circuiti – Modello ideale del diodo



# Analisi dei circuiti – Modello lineare a tratti



# Analisi dei circuiti – Esempio

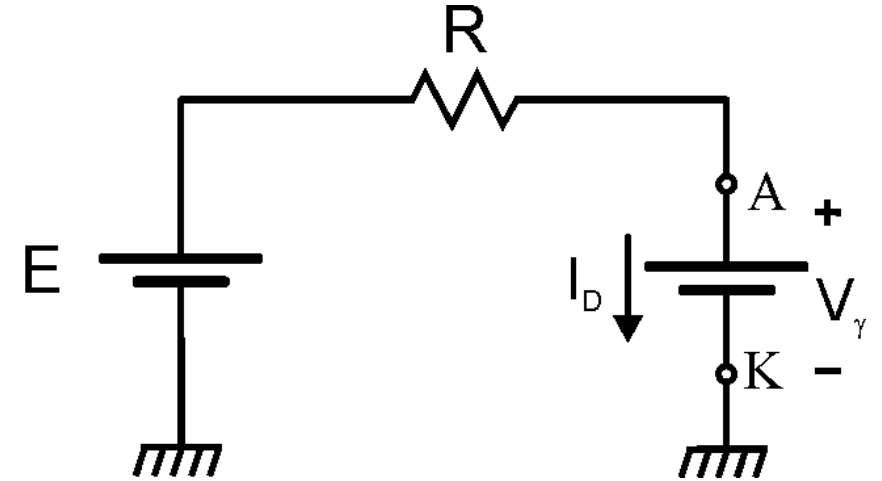
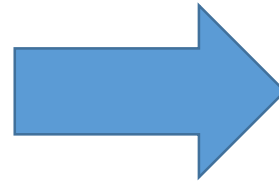


$$E = 5\text{ V}$$

$$R = 1\text{ k}\Omega$$

Ipotesi:  
Diodo in conduzione

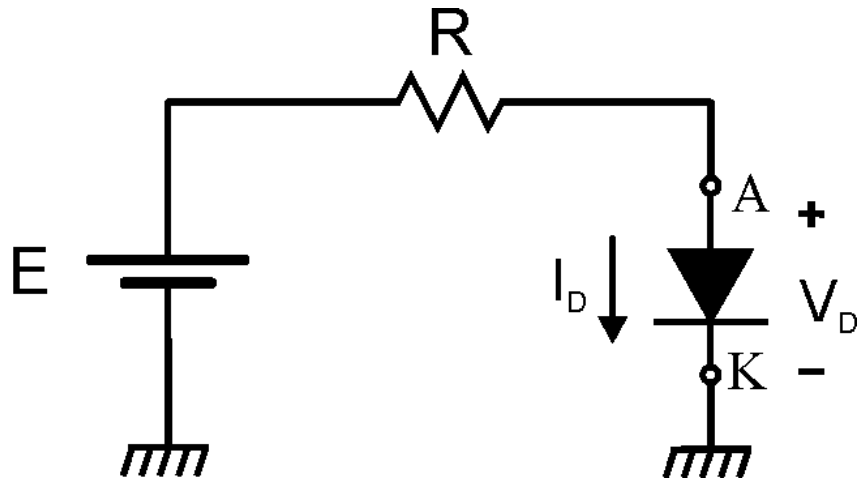
Modello a caduta  
di tensione costante



$$\left\{ \begin{array}{l} V_D = V_\gamma = 0.7\text{ V} \\ E = RI_D + V_\gamma \end{array} \right.$$

$$I_D = \frac{E - V_\gamma}{R} = \frac{5 - 0.7}{1000} = 4.3\text{ mA}$$

# Analisi dei circuiti – Esempio



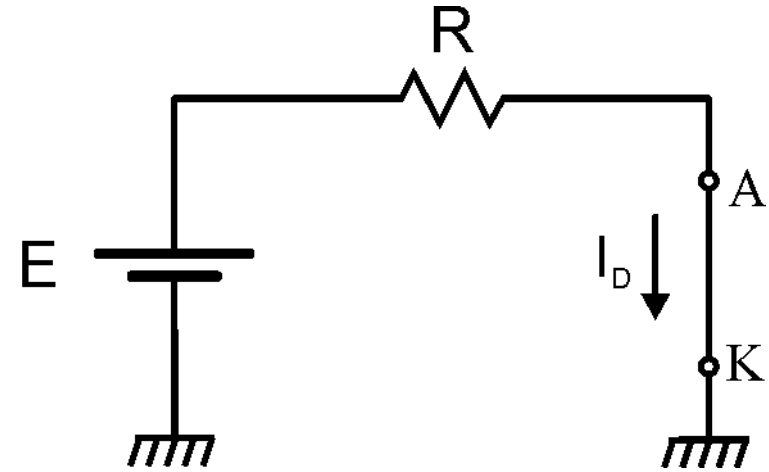
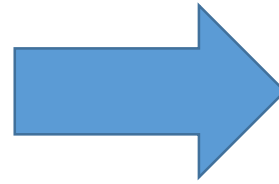
$$E = 5\text{ V}$$

$$R = 1\text{ k}\Omega$$

Ipotesi:

Diodo in conduzione

Modello ideale  
del diodo

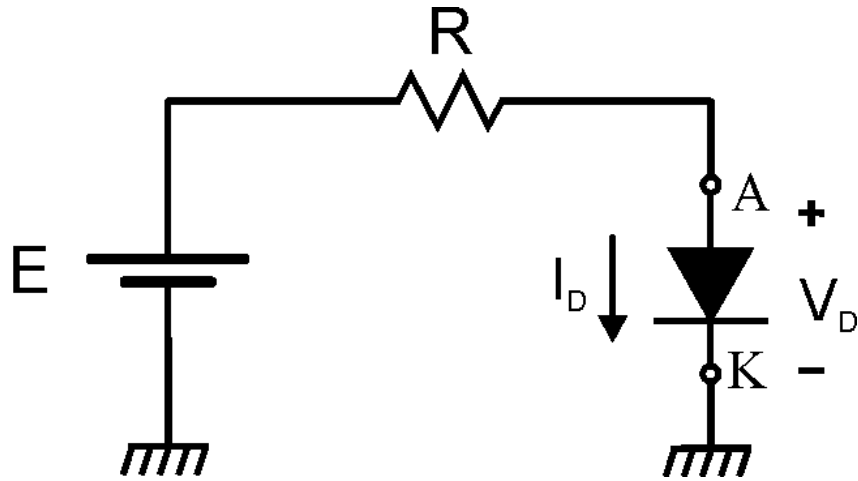


$$V_D = 0\text{ V}$$

$$E = RI_D$$

$$I_D = \frac{E}{R} = \frac{5}{1000} = 5\text{ mA}$$

# Analisi dei circuiti – Esempio



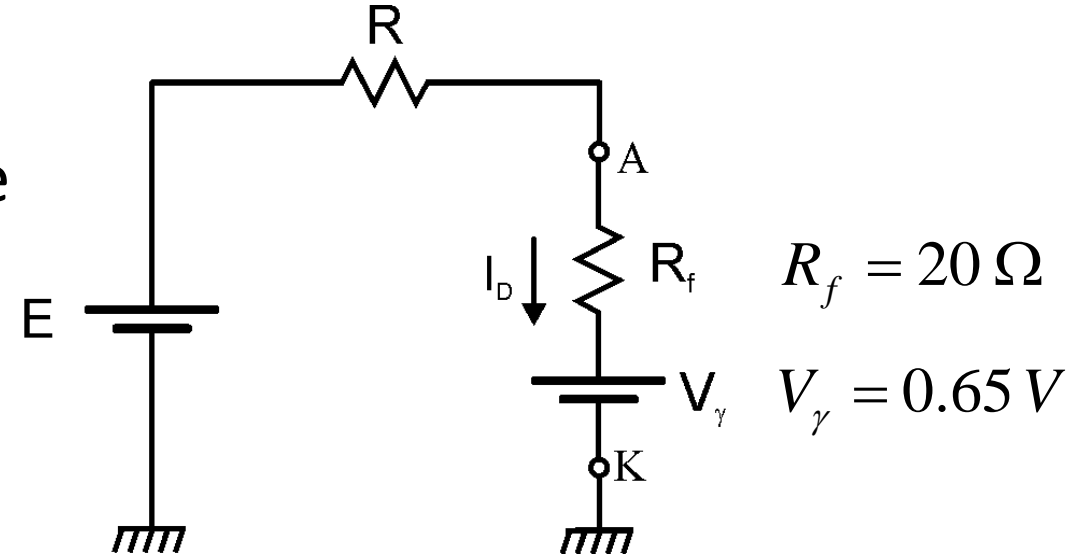
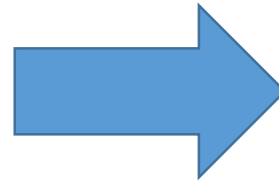
$$E = 5\text{ V}$$

$$R = 1\text{ k}\Omega$$

Ipotesi:

Diodo in conduzione

Modello lineare  
a tratti

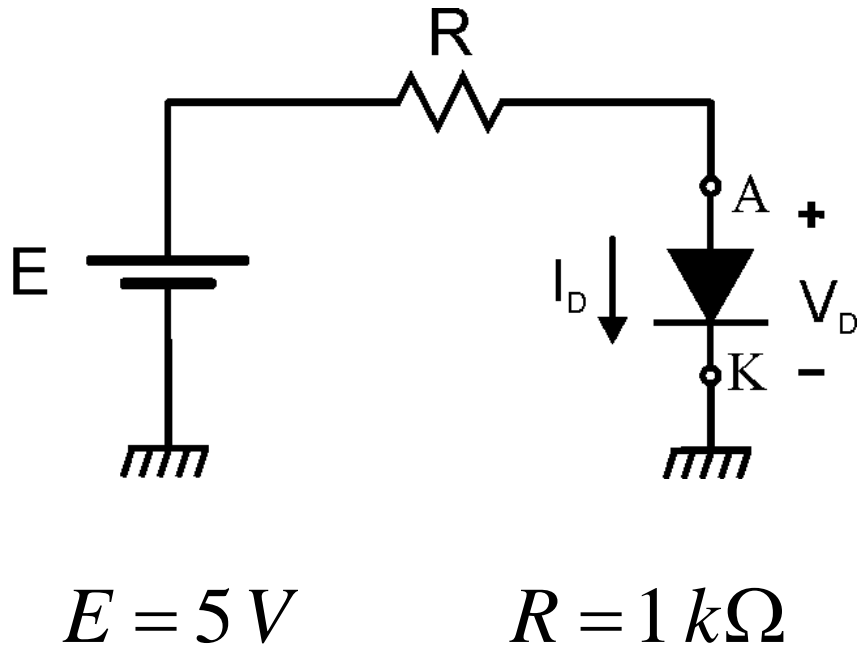


$$\left\{ \begin{array}{l} E = (R + R_f) I_D + V_\gamma \\ V_D = V_{AK} = V_\gamma + R_f I_D \end{array} \right.$$

$$I_D = \frac{E - V_\gamma}{R + R_f} = \frac{5 - 0.65}{1020} = 4.265\text{ mA}$$

$$V_D = V_{AK} = 0.65 + 20 \times 4.265 \times 10^{-3} = 0.7353\text{ V}$$

# Analisi dei circuiti – Esempio



MODELLO	$I_D$ (mA)	$V_D$ (V)
Esponenziale	4.237	0.762
Grafico	4.2	0.7
Caduta costante	4.3	0.7
Diodo ideale	5	0
Lineare a tratti	4.265	0.7353

Il modello del diodo a caduta di tensione costante è il miglior compromesso tra semplicità del modello e accuratezza della soluzione ottenuta.

Nei circuiti in cui la caduta di tensione sul diodo può essere considerata trascurabile, si può utilizzare il modello ideale del diodo.

# Analisi dei circuiti contenenti diodi - Procedura

- Ipotesizzare lo stato di ciascun diodo (Conduzione o Interdizione)
- Sostituire ciascun diodo con il corrispondente modello:
  - ) se in conduzione con un generatore di tensione costante di valore  $V_\gamma$  (modello a caduta costante), un cortocircuito (diodo ideale), un generatore con una resistenza in serie (modello lineare a tratti)
  - ) se interdetto con un circuito aperto
- Risolvere il circuito
- Verificare la correttezza delle ipotesi iniziali sullo stato di ciascun diodo:
  - se sono tutte verificate, la soluzione ottenuta è quella corretta
  - se almeno una delle ipotesi non è verificata, bisogna cambiare tale ipotesi, risolvere di nuovo il circuito e fare una nuova verifica delle ipotesi. Il processo continua fino a quando non si trova la soluzione che soddisfa le ipotesi sullo stato di tutti i diodi.

# Analisi dei circuiti contenenti diodi - Procedura

STATO DEL DIODO	PARAMETRO FISSATO	VERIFICA
CONDUZIONE	$V_D = V_\gamma$	$I_D > 0$
INTERDIZIONE	$I_D = 0$	$V_D < V_\gamma$

