

# Dispositivi e Tecnologie Elettroniche

## Esercitazione

Proprietà di trasporto nei  
semiconduttori

# Esercizio 1: testo

- *Si consideri un campione di Si uniformemente drogato tipo  $n$  con una concentrazione  $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , in cui si effettua un ulteriore processo di drogaggio di tipo  $p$  con una concentrazione  $N_A = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$*
- *Calcolare:*
  - ◆ la resistività del campione **prima** dell'introduzione del drogante di tipo  $p$
  - ◆ la resistività del campione **dopo** l'introduzione del drogante di tipo  $p$

# Esercizio 1: soluzione

- *In presenza del solo drogante di tipo  $n$ , a  $T = 300 \text{ K}$  si ha*

$$n \approx N_D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = 1.04 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

- *La resistività del campione dipende dal contributo di elettroni e lacune secondo:*

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p}$$

# Esercizio 1: soluzione

- **Poiché  $p/n \approx 2 \times 10^{-13}$ , si può trascurare il contributo dei portatori minoritari:**

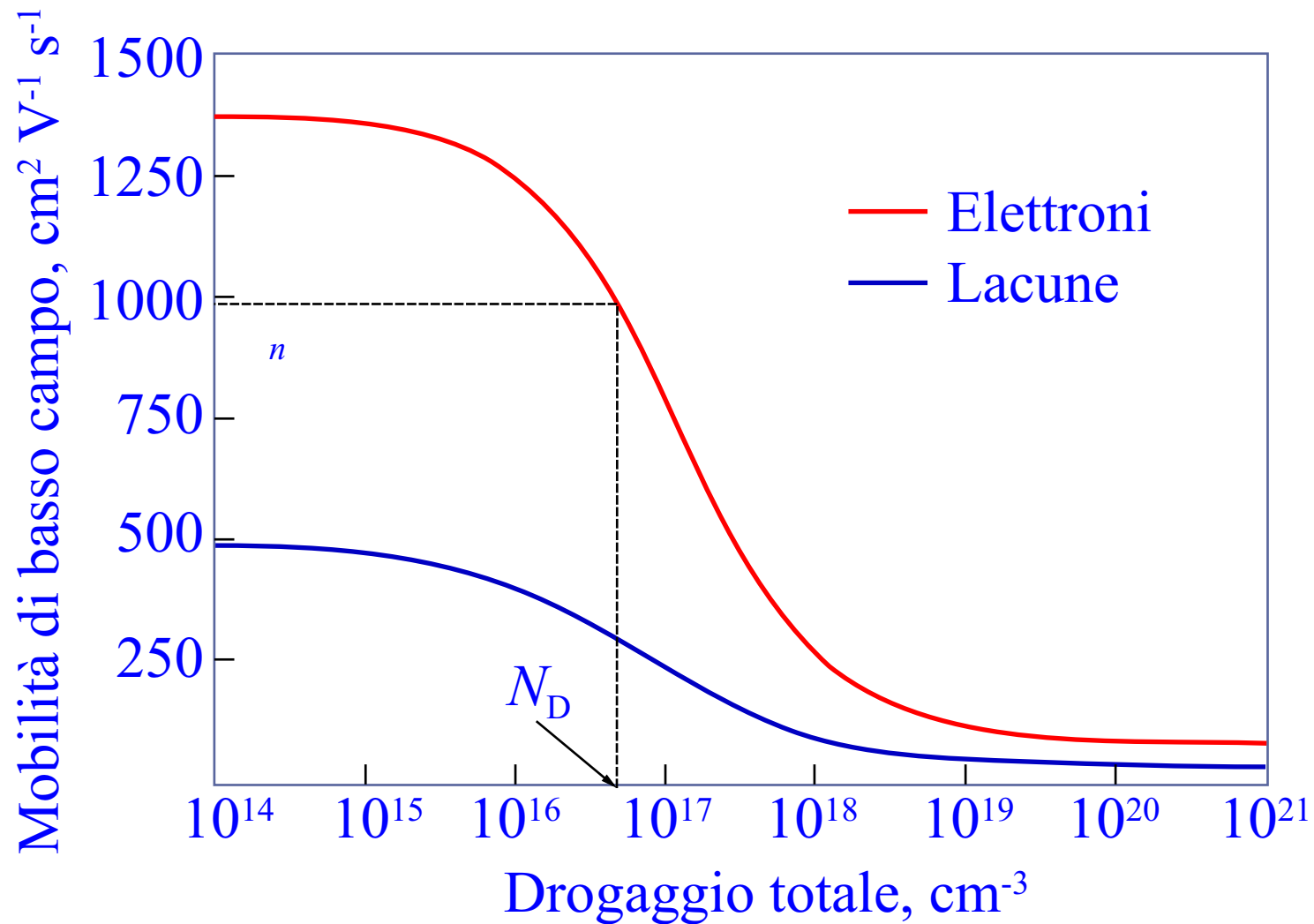
$$\rho = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p} \approx \frac{1}{qn\mu_n}$$

- **Per calcolare la resistività, è necessario valutare la mobilità degli elettroni liberi. Sulla base del drogaggio totale  $N = N_D$ , si ha**

$$\mu_n = 975 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

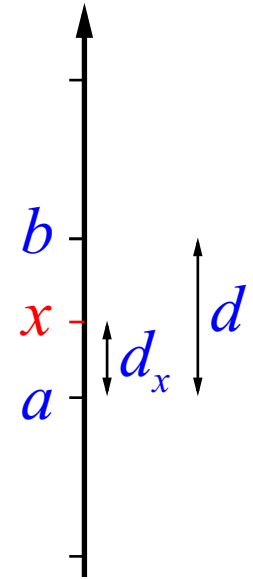
- **Infine,  $\rho = 0.128 \text{ } \Omega \text{ cm}$**

# Esercizio 1: soluzione



# Lettura delle scale lineari

- *La scala lineare prevede una **proporzionalità diretta** tra i valori e la loro distanza*

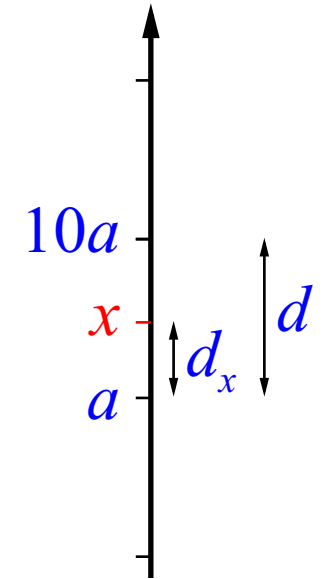


- *Volendo leggere il valore  $x$  compreso tra due estremi  $a$  e  $b$  distanti  $d$ , si ha*

$$\frac{b - a}{x - a} = \frac{d}{d_x} \implies x = a + (b - a) \frac{d_x}{d}$$

# Lettura delle scale logaritmiche

- *La scala logaritmica prevede una **proporzionalità diretta** tra il logaritmo in base 10 dei valori e la loro distanza*
- *Volendo leggere il valore  $x$  compreso nella decade tra  $a$  e  $10a$ , si ha*



$$\log_{10} x = \log_{10} a + [\log_{10}(10a) - \log_{10} a] \frac{d_x}{d}$$

**ovvero, essendo**  $\log_{10} x_1 - \log_{10} x_2 = \log_{10}(x_1/x_2)$

$$\log_{10}(x/a) = \frac{d_x}{d} \implies x = a10^{d_x/d}$$

# Esercizio 1: soluzione

- *Dopo il secondo processo di drogaggio, per compensazione il semiconduttore diviene tipo  $p$  con drogaggio efficace*

$$N'_A = N_A - N_D = 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

- *A  $T = 300 \text{ K}$  si ha*

$$p \approx N'_A = 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = 1.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

# Esercizio 1: soluzione

- *Anche in questo caso si può trascurare il contributo dei portatori minoritari alla resistività*

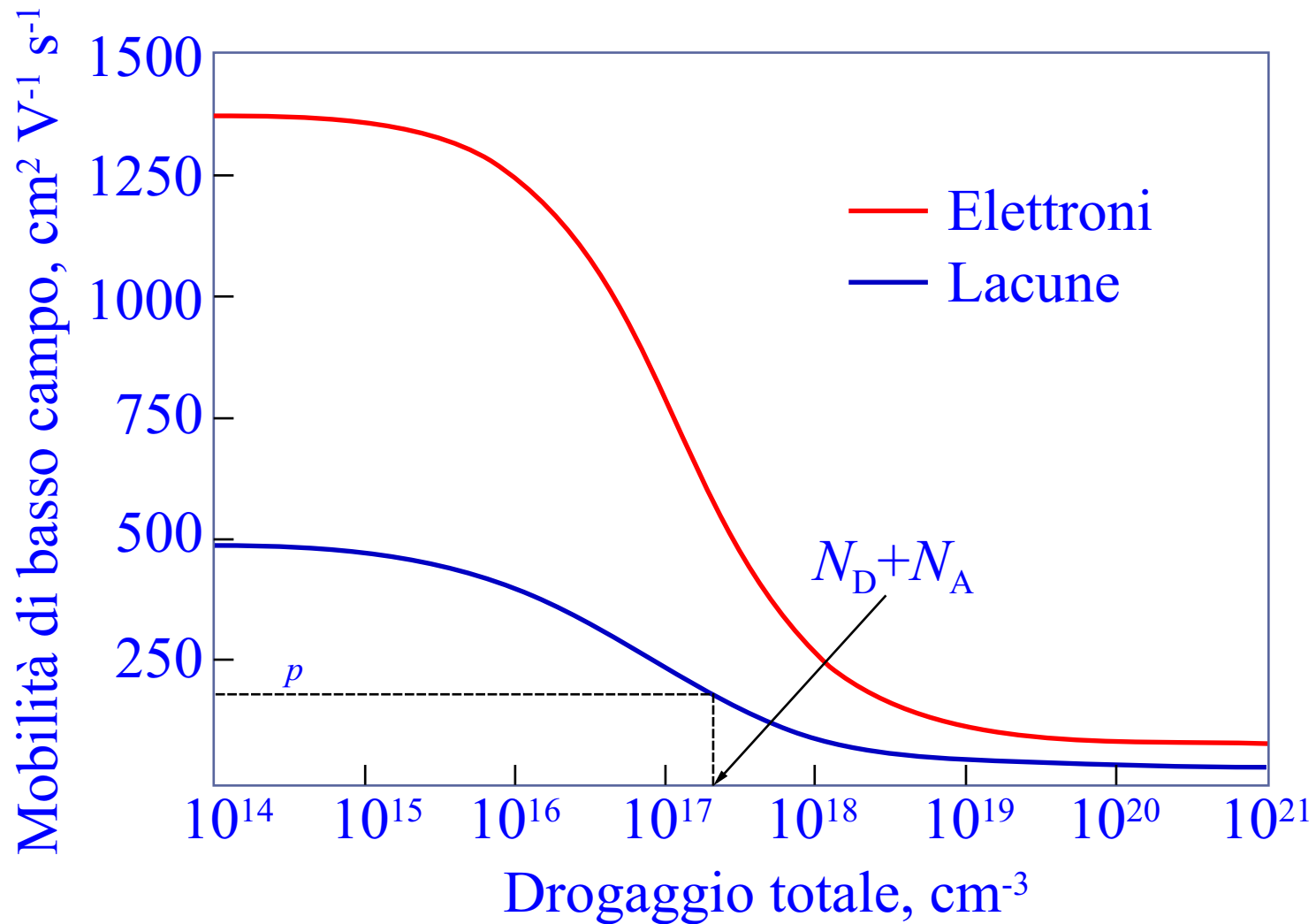
$$\rho = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p} \approx \frac{1}{qp\mu_p}$$

- *Per calcolare la resistività, è necessario valutare la mobilità delle lacune libere. Sulla base del drogaggio totale  $N = N_D + N_A = 2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , si ha*

$$\mu_p = 175 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

- *Infine,  $\rho = 0.238 \text{ } \Omega \text{ cm}$*

# Esercizio 1: soluzione



# Esercizio 2: testo

- *Si considerino due campioni di Si uniformemente drogati tipo  $p$  con una concentrazione  $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , lunghi rispettivamente  $L_1 = 3 \text{ }\mu\text{m}$  e  $L_2 = 200 \text{ }\mu\text{m}$*
- *Sulla superficie posta in  $x = 0$  si assuma di aver prodotto un **eccesso di portatori minoritari**  $n'_p(0) = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , con tempo di vita  $\tau_n = 50 \text{ ns}$*
- *Nell'ipotesi di **quasi-neutralità**, calcolare la distribuzione di portatori minoritari in condizioni stazionarie*

# Esercizio 2: soluzione

■ *Nell'ipotesi di*

***quasi-neutralità***

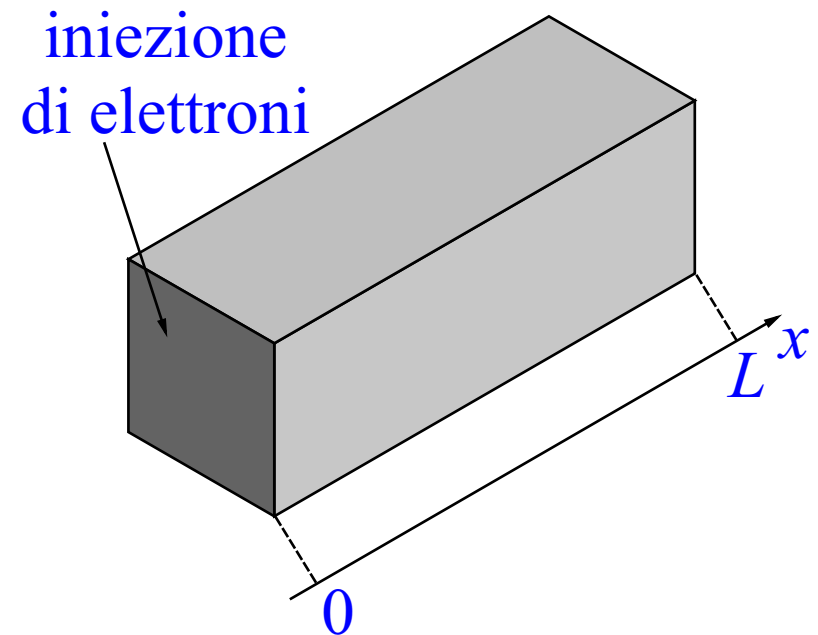
$$n'_p(x) = p'_n(x) \text{ e } \mathcal{E} = 0$$

■ *Nell'equazione di*

***continuità, compare solo il termine di diffusione***

■ *Poiché  $n_{p0} = N_A$  è costante, in condizioni stazionarie si ha*

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} = D_n \frac{d^2 n'_p}{dx^2} = \frac{n_p - n_0}{\tau_n} = \frac{n'_p}{\tau_n}$$



# Esercizio 2: soluzione

- È una **equazione differenziale lineare a coefficienti costanti**, con equazione caratteristica

$$\lambda^2 = \frac{1}{D_n \tau_n} = \frac{1}{L_n^2} \implies \lambda = \pm \frac{1}{L_n}$$

- $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$  è la **lunghezza di diffusione dei portatori minoritari nel campione**

- **La soluzione generale è**

$$n'_p(x) = A \exp\left(\frac{x}{L_n}\right) + B \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

# Esercizio 2: soluzione

- *Le costanti  $A$  e  $B$  si determinano imponendo le condizioni al contorno:*

$$\begin{aligned}n'_p(0) &= \text{assegnato}, \\n'_p(L) &= 0 \quad \text{contatto ohmico}\end{aligned}$$

- *Si ha così il sistema*

$$\begin{cases}n'_p(0) = A + B \\n'_p(L) = 0 = A \exp\left(\frac{L}{L_n}\right) + B \exp\left(-\frac{L}{L_n}\right)\end{cases}$$

# Esercizio 2: soluzione

## ■ Risolvendo il sistema lineare

$$A = n'_p(0) \frac{-\exp\left(-\frac{L}{L_n}\right)}{\exp\left(\frac{L}{L_n}\right) - \exp\left(-\frac{L}{L_n}\right)}$$

$$B = n'_p(0) \frac{\exp\left(\frac{L}{L_n}\right)}{\exp\left(\frac{L}{L_n}\right) - \exp\left(-\frac{L}{L_n}\right)}$$

# Esercizio 2: soluzione

- **Sostituendo nella soluzione generale e ricordando che**  $\exp \alpha - \exp(-\alpha) = 2 \sinh \alpha$

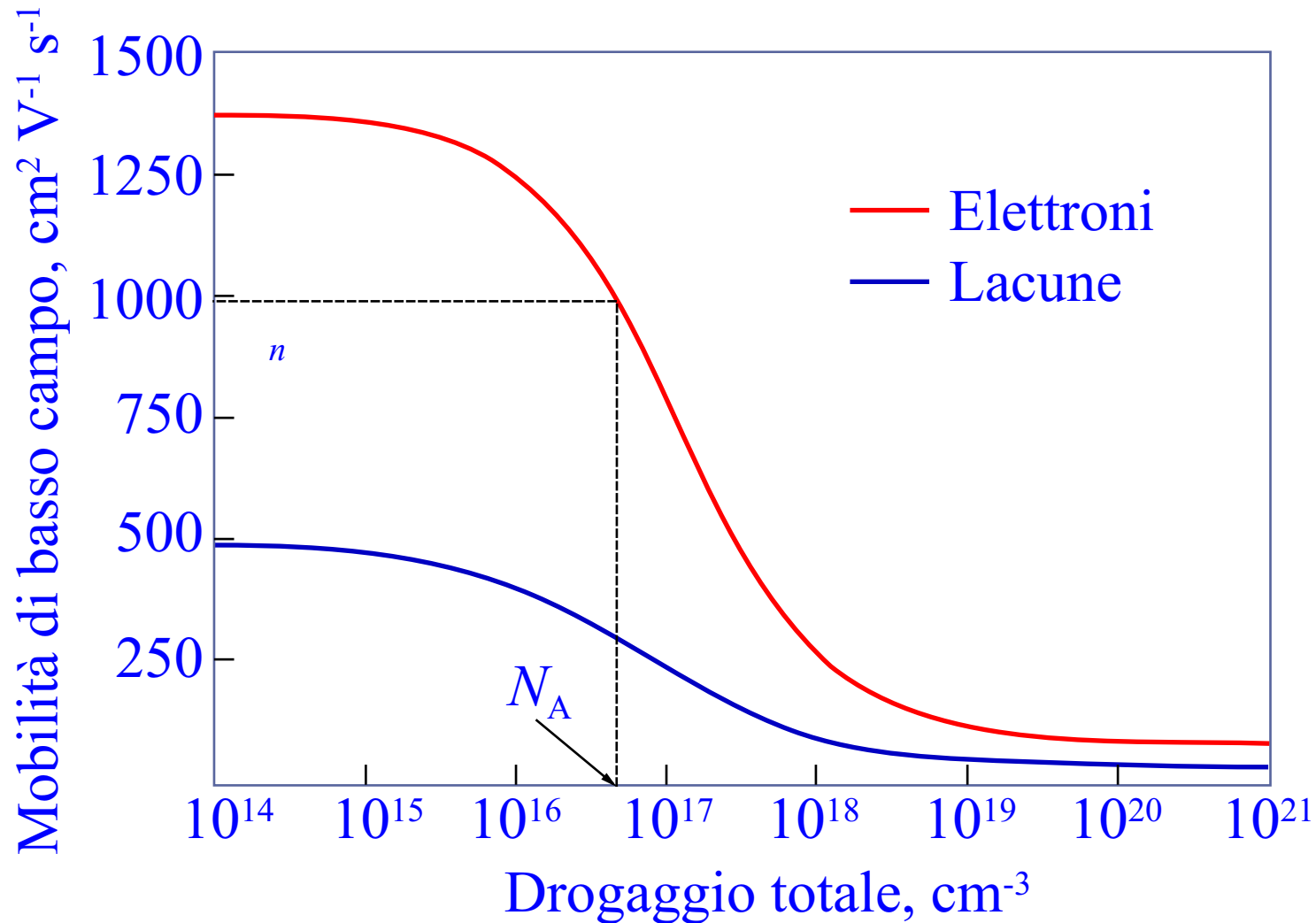
$$n'_p(x) = n'_p(0) \frac{\sinh\left(\frac{L-x}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{L}{L_n}\right)}$$

- **Dal drogaggio  $N_A$  si ricava  $\mu_n = 975$   $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ , per cui a 300 K**

$$D_n = V_T \mu_n = 25.35 \text{ cm/s}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 11.26 \text{ } \mu\text{m}$$

# Esercizio 2: soluzione

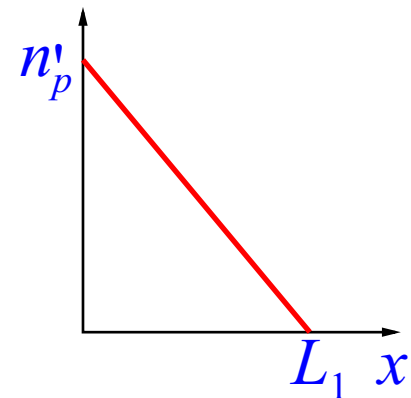


# Esercizio 2: soluzione

- Per il primo campione si ha  $L_1/L_n \ll 1$ , e quindi anche  $(L_1 - x)/L_n \ll 1$  essendo  $0 \leq x \leq L_1$
- Si dice che si ha un **campione corto** rispetto alla lunghezza di diffusione

- Nella soluzione, si può usare lo sviluppo asintotico  $\sinh \alpha \approx \alpha$

$$n'_p(x) \approx n'_p(0) \frac{L_1 - x}{L_1}$$

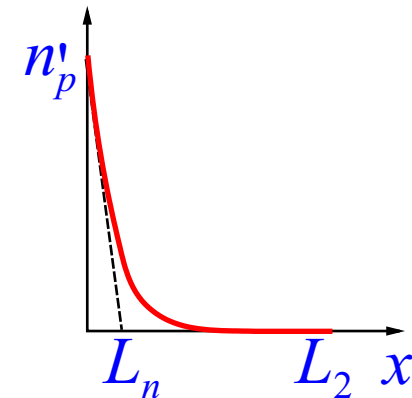


- La distribuzione di portatori minoritari è **lineare**

# Esercizio 2: soluzione

- Per il secondo campione si ha  $L_2/L_n \gg 1$ , e quindi  $A \approx 0$  e  $B \approx n'_p(0)$
- Si dice che si ha un **campione lungo** rispetto alla lunghezza di diffusione
- Dalla soluzione generale, si ha

$$n'_p(x) \approx n'_p(0) \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$



- La distribuzione di portatori minoritari è **esponenziale**