Dispositivi Elettronici

Esercitazione

Proprietà di trasporto nei semiconduttori

Esercizio 1: testo

- ***Si consideri un campione di Si uniformemente drogato tipo n con una concentrazione $N_{\mathrm{D}} = 5 \times 10^{16}$ cm^{-3}, in cui si effettua un ulteriore processo di drogaggio di tipo p con una concentrazione $N_{\mathrm{A}} = 2 \times 10^{17}$ 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 $T = 300$ K si ha***

$$n \approx N_\mathrm{D} = 5 \times 10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

$$p = \frac{n_\mathrm{i}^2}{n} = 1.04 \times 10^{4}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

- ***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:***

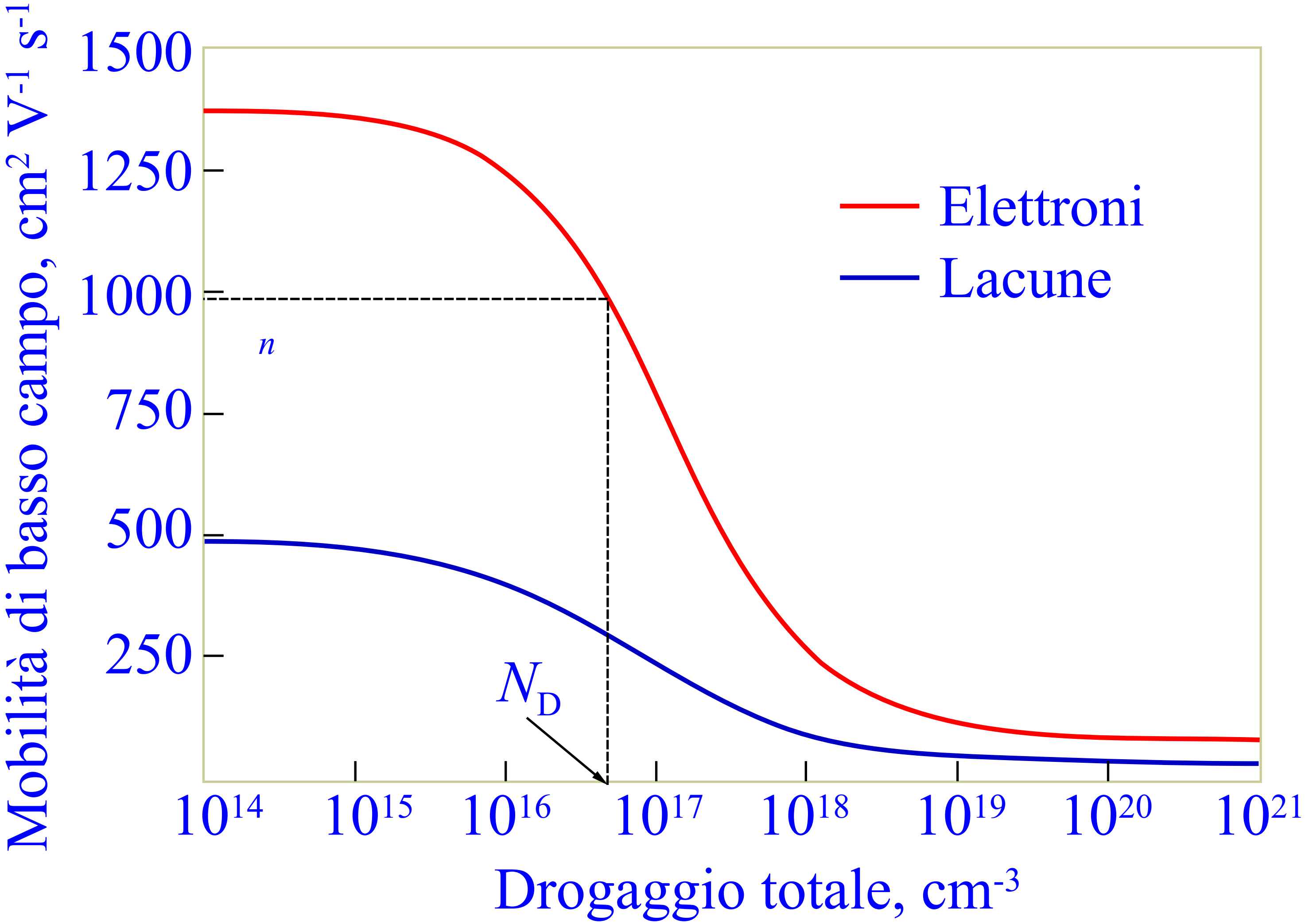
$$\rho = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p} \approx \frac{1}{qn\mu_n}$$

- ***Per calcolare la resistività, è necessario valutare la mobilità degli elettroni liberi. Sulla base del drogaggio totale*** $N = N_{\mathrm{D}}$***, si ha***

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

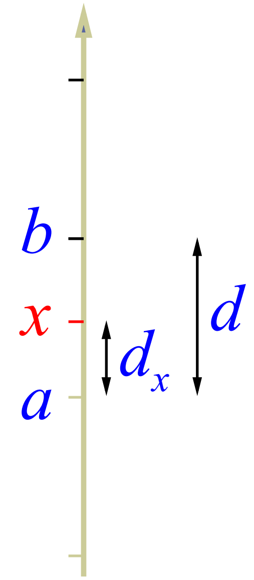
- ***Infine,*** $\rho = 0.128\ \Omega\ \mathrm{cm}$

Esercizio 1: soluzione



Lettura delle scale lineari

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

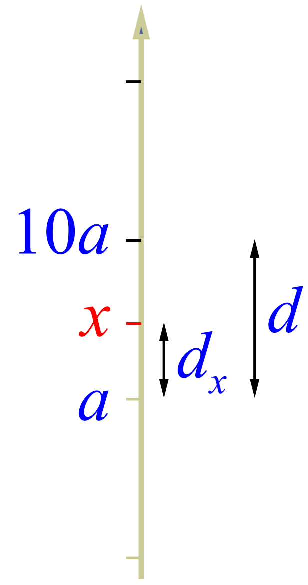


- ***Volendo leggere il valore x compreso tra due estremi a e b distanti d, si ha***

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

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 $\log_{10} x_1 - \log_{10} x_2 = \log_{10}(x_1/x_2)$

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

Esercizio 1: soluzione

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

$$N'_{\mathrm{A}} = N_{\mathrm{A}} - N_{\mathrm{D}} = 1.5 \times 10^{17}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

- ***A*** $T = 300$ ***K si ha***

$$p \approx N'_{\mathrm{A}} = 1.5 \times 10^{17}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

$$n = \frac{n_{\mathrm{i}}^2}{p} = 1.4 \times 10^{3}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

Esercizio 1: soluzione

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

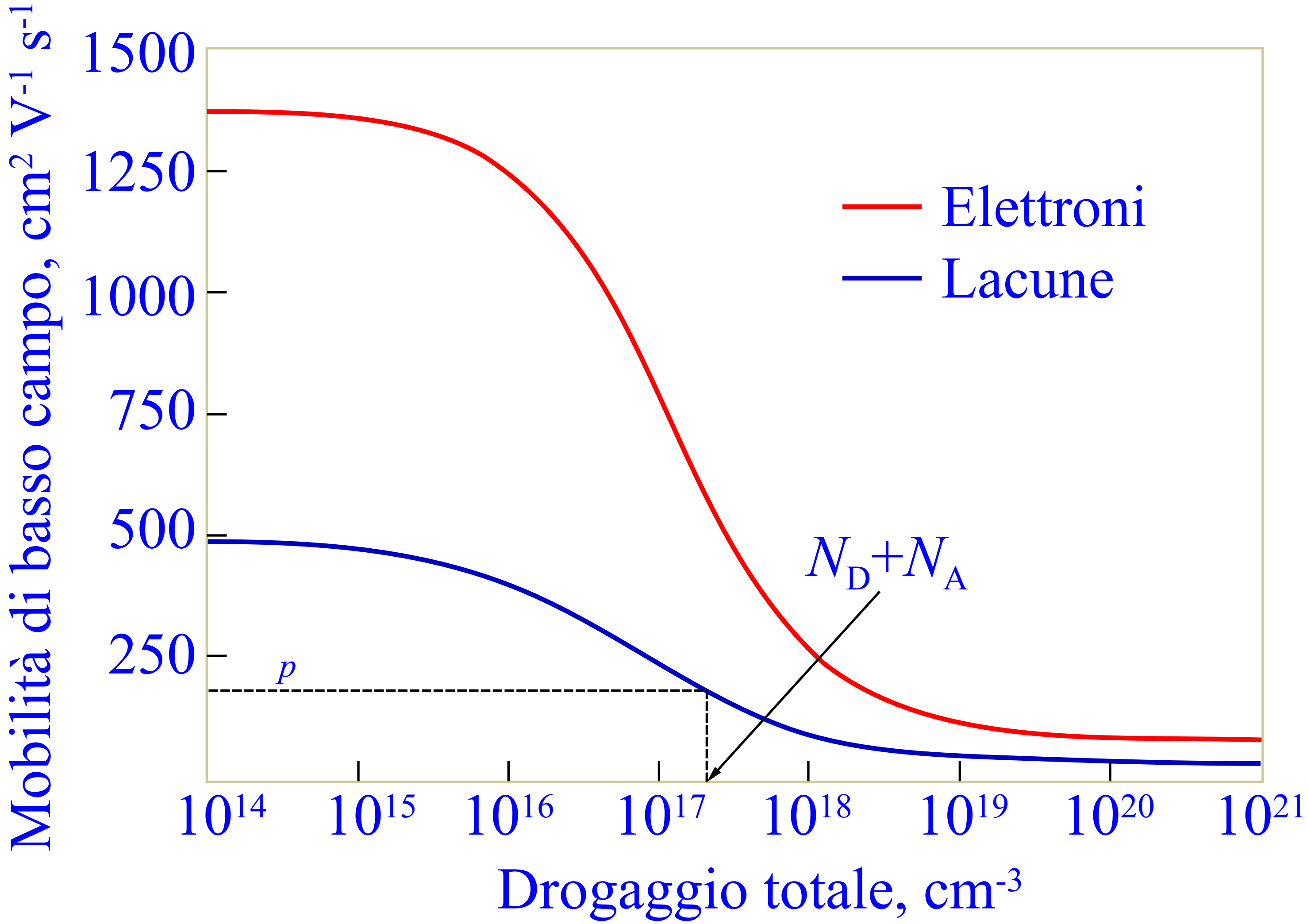
$$\rho = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p} \approx \frac{1}{qp\mu_p}$$

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

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

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

Esercizio 1: soluzione

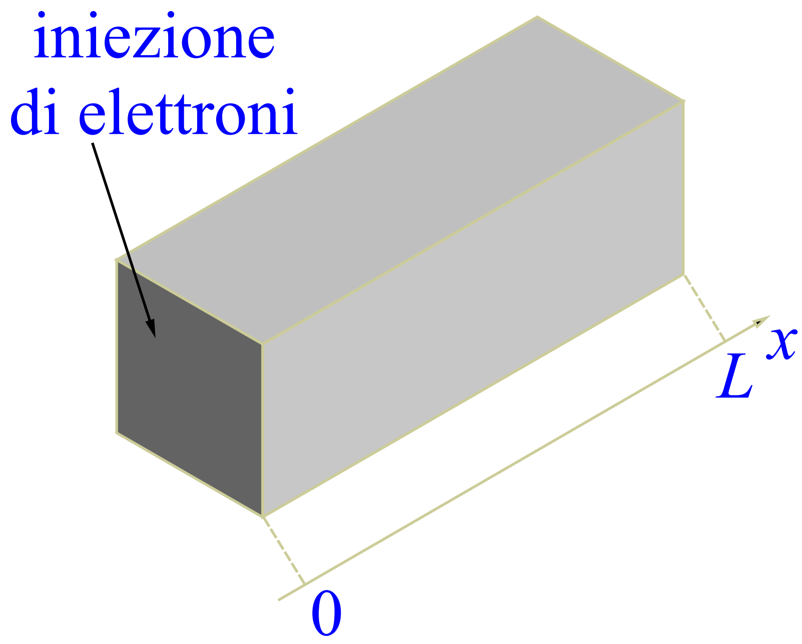


Esercizio 2: testo

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

Esercizio 2: soluzione

- ***Nell'ipotesi di quasi-neutralità*** $n_p'(x) = p_n'(x)$ **e** $\mathcal{E} = 0$
- ***Nell'equazione di continuità, compare solo il termine di diffusione***



- ***Poiché*** $n_{p0} = n_{\mathrm{i}}^2/N_{\mathrm{A}}$ ***è costante, in condizioni stazionarie si ha***

$$D_n \frac{\mathrm{d}^2 n_p}{\mathrm{d}x^2} = D_n \frac{\mathrm{d}^2 n_p'}{\mathrm{d}x^2} = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = \frac{n_p'}{\tau_n}$$

Esercizio 2: soluzione

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

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

- $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ *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***

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

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*** $\exp\alpha - \exp(-\alpha) = 2\sinh\alpha$

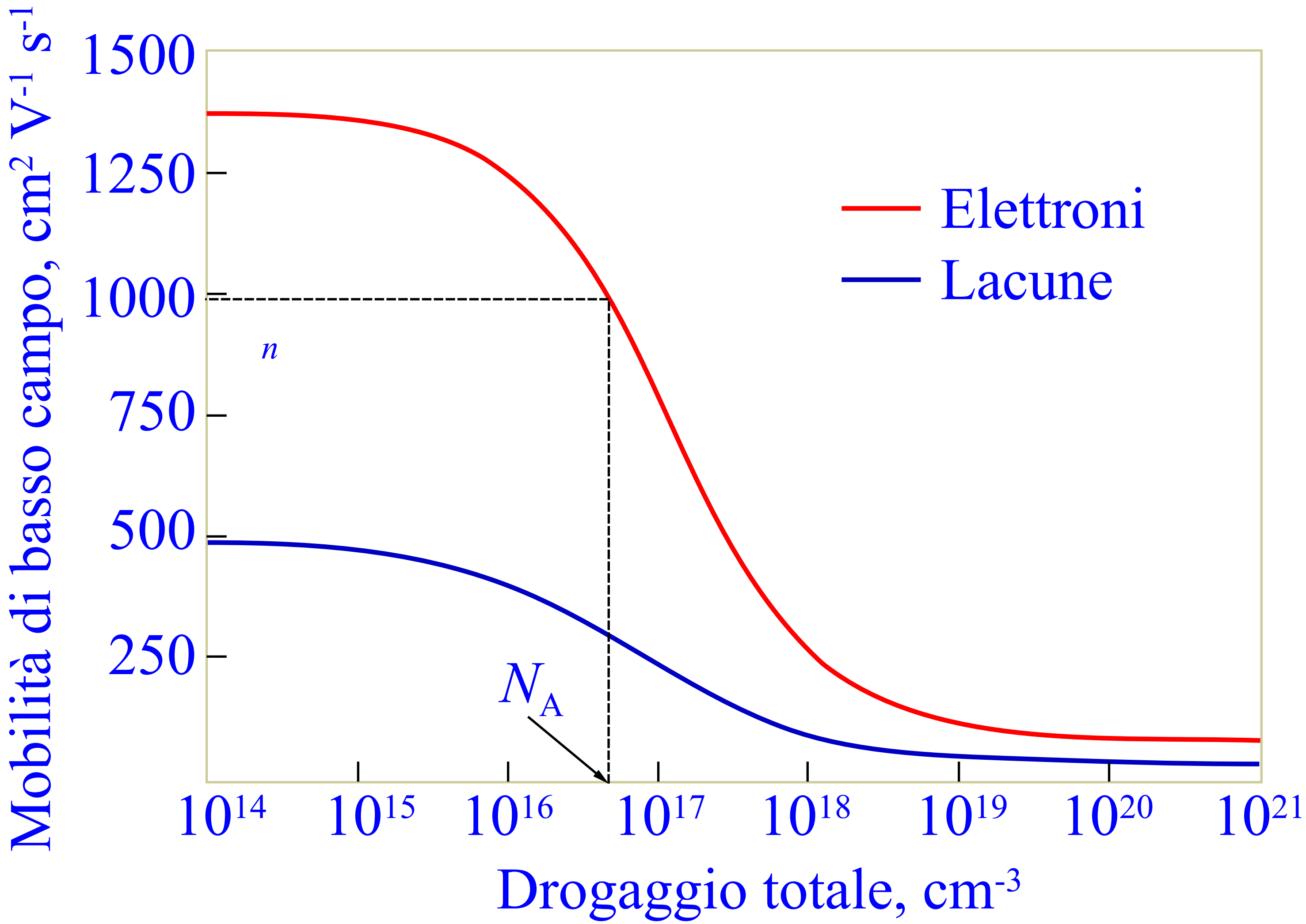
$$n_p'(x) = n_p'(0)\frac{\sinh\left(\dfrac{L-x}{L_n}\right)}{\sinh\left(\dfrac{L}{L_n}\right)}$$

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

$$D_n = V_T\mu_n = 25.35\ \mathrm{cm^2/s}$$

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

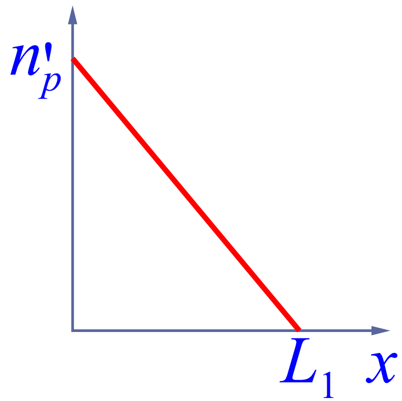
Esercizio 2: soluzione



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*** $\sinh \alpha \approx \alpha$

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

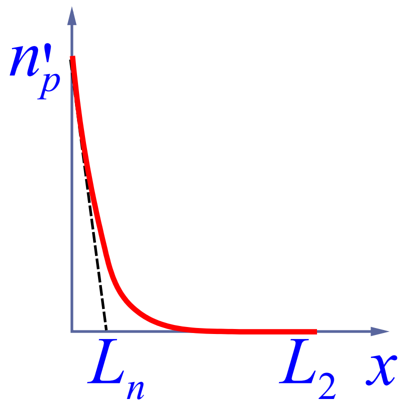


- ***La distribuzione di portatori minoritari è lineare***

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***