1 Si calcoli il tempo libero medio di un elettrone che ha una mobilità di 1000 cm^2/Vs a 300 K; si calcoli anche il cammino libero medio, cioè la distanza percorsa da un elettrone tra due urti successivi. Si assuma per questi calcoli $m_n = 0{,}26 m_0$

$$\mu_n = \frac{q\tau_c}{m_n^*}$$ **Formula 2.3** $$\tau_c = \frac{\mu_n m_n^*}{q}$$

$$\tau_c = \frac{(1000\times10^{-4})\times(0.26\times 0.91\times10^{-30})}{1.6\times10^{-19}} = 1.5\times10^{-13}\,s$$

Mobilità in $\left[\frac{m^2}{V\cdot s}\right]$

$$\ell = v_{th}\tau_c$$ Pag.48

$$v_{th} = 10^7\,cm/s$$ Pag.36

$$\ell = 1.5\times10^{-13}\times10^7 = 1.5\times10^{-6}\,m = 1.5\,\mu m$$

Appendice D
Costanti fisiche

Quantità	Simbolo/ Unità	Valore
Unità Angstrom	Å	1 Å $= 10^{-1}$ nm $= 10^{-4}\mu$m $= 10^{-8}$ cm $= 10^{-10}$ m
Costante di Avogadro	N_{AVO}	$6{,}02204\times10^{23}$ mole^{-1}
Raggio di Bohr	a_B	0,52917 Å
Costante di Boltzmann	k	$1{,}38066\times10^{-23}$ J/K (R/N_{AVO})
Carica elementare	q	$1{,}60218\times10^{-19}$ C
Massa degli elettroni a riposo	m_0	$0{,}91095\times10^{-30}$ kg
Elettronvolt	eV	1 eV $= 1{,}60218\times10^{-19}$ J $= 23{,}053$ kcal/mole
Costante del gas	R	1,98719 cal/mole-K
Permeabilità nel vuoto	μ_0	$1{,}25663\times10^{-8}$ H/cm $(4\pi\times10^{-9})$
Permittività nel vuoto	ϵ_0	$8{,}85418\times10^{-14}$ F/cm $(1/\mu_0c^2)$
Costante di Planck	h	$6{,}62617\times10^{-34}$ J-s
costante di Planck ridotta	$\hbar$	$1{,}05458\times10^{-34}$ J-s $(h/2\pi)$
Massa dei protoni a riposo	M_p	$1{,}67264\times10^{-27}$ kg
Velocità della luce nel vuoto	c	$2{,}99792\times10^{10}$ cm/s
Atmosfera standard		$1{,}01325\times10^5$ Pa
Tensione termica a 300K	kT/q	0,0259 V
Lunghezza d'onda di un quanto 1-ev	λ	1,23977 μm

2 Per un semiconduttore con un rapporto tra le mobilità $b \equiv \mu_n/\mu_p > 1$ costante e indipendente dalla concentrazione delle impurità, si trovi la massima resistività ρ_m in funzione della resistività intrinseca ρ_i e del rapporto tra le mobilità.

Di che tipo è il semiconduttore?

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} = \frac{1}{q\mu_p(bn+p)}$$

$$\rho_i = \frac{1}{qn_i(\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{qn_i\mu_p(b+1)}$$

$$\rho = \rho_i \frac{n_i(b+1)}{bn+p} = \rho_i \frac{n_i(b+1)}{b\frac{n_i^2}{p} + p}$$

$$\rho_{MAX} \Rightarrow b\frac{n_i^2}{p} + p = min$$

$$\frac{d}{dp}\left(b\frac{n_i^2}{p} + p\right) = 0 \Rightarrow -b\frac{n_i^2}{p^2} + 1 = 0$$

$$p = \sqrt{b}n_i$$

Essendo $\sqrt{b} > 1$, è p ad essere maggiore della concentrazione intrinseca.
Il semiconduttore è di tipo p.

3 In un campione di semiconduttore omogeneo di tipo n sono iniettate in un punto delle lacune minoritarie. Al semiconduttore sia applicato un

campo elettrico di 50 V/cm che in 100 μs sposta i portatori minoritari per una distanza di 1 cm. Si calcoli la velocità di trascinamento e la diffusività dei portatori minoritari.

$$v_p = \frac{1cm}{100\mu s} = \frac{1cm}{100 \times 10^{-6} s} = 10^4\, cm/s$$

$$v_p = \mu_p E \qquad \mu_p = \frac{v_p}{E} = \frac{10^4\, cm/s}{50 V/cm} = 200\, cm^2/V \cdot s$$

$$D_p = \frac{kT}{q}\mu_p = 0.0259V \times 200\, cm^2/(V \cdot s) = 5.2\, cm^2/s$$

4 Si determinino per gli elettroni e per le lacune le concentrazioni, le mobilità e le resistività in un campione di silicio a 300 K per ciascuna delle seguenti concentrazioni di impurità: (*a*) boro con 5 10^{15} atomi/cm^3; (*b*) boro con 2 10^{16} atomi/cm^3 e arsenico con 1,5 10^{16} atomi/cm^3; (*c*) boro con 5 10^{15} atomi/cm^3, arsenico con 10^{17} atomi/cm^3 e gallio con 10^{17} atomi/cm^3.

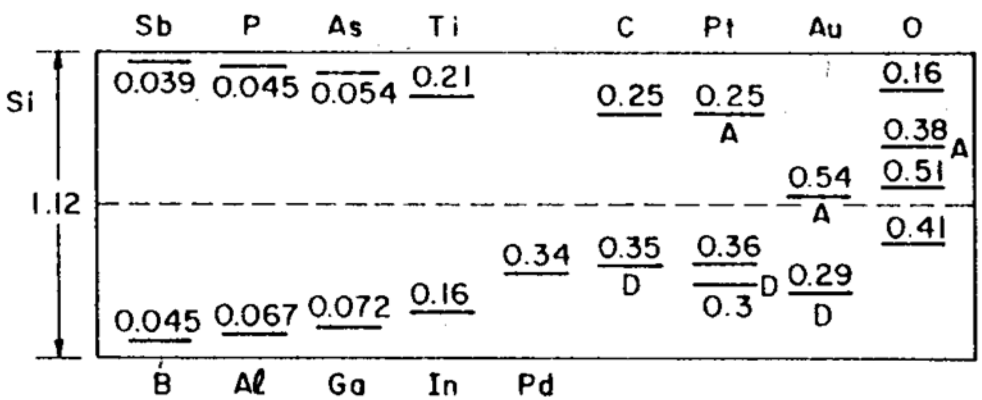


Grafico 1.18

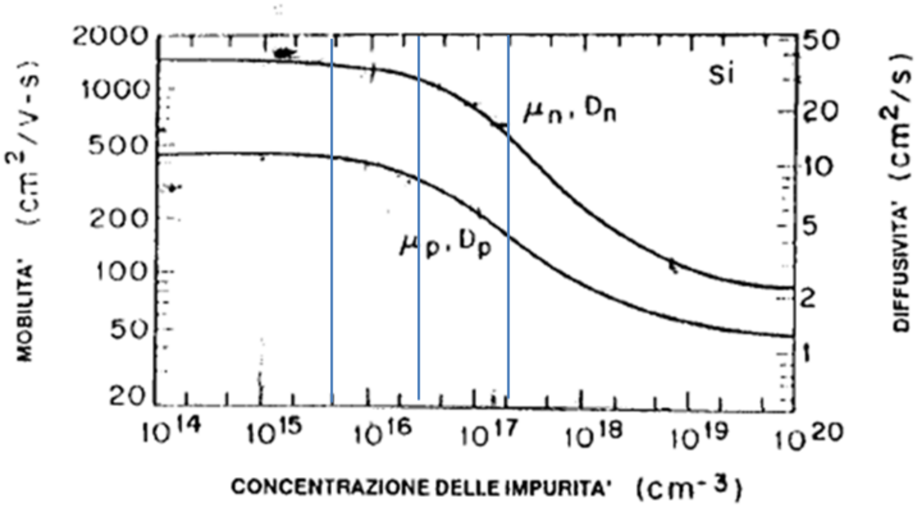
Boro ACCETTORE
Arsenico DONORE
Gallio ACCETTORE

	N_A (cm^{-3})	N_D(cm^{-3})	N_A-N_D(cm^{-3})	tipo	N_B=N_A+N_D(cm^{-3})
Caso a	$5x10^{15}$	0	$5x10^{15}$	p	$5x10^{15}$
Caso b	$2x10^{16}$	$1.5x10^{16}$	$5x10^{15}$	p	$3.5x10^{16}$
Caso c	$5x10^{15}+10^{17}$	10^{17}	$5x10^{15}$	p	$2.05x10^{17}$

	N_A (cm^{-3})	N_D(cm^{-3})	N_A-N_D(cm^{-3})	tipo	N_B=N_A+N_D(cm^{-3})
Caso a	$5x10^{15}$	0	$5x10^{15}$	p	$5x10^{15}$
Caso b	$2x10^{16}$	$1.5x10^{16}$	$5x10^{15}$	p	$3.5x10^{16}$
Caso c	$5x10^{15}+10^{17}$	10^{17}	$5x10^{15}$	p	$2.05x10^{17}$

$$\begin{cases} p = 5\times10^{15} \\ n = \dfrac{n_i^2}{p} = \dfrac{\left(1.45\times10^{10}\right)^2}{5\times10^{15}} = 4.2\times10^4 \end{cases}$$

$$\rho = \frac{1}{q\left(n\mu_n + p\mu_p\right)} \approx \frac{1}{qp\mu_p}$$



$$\mu_{pa} = 350\, cm^2/V\cdot s$$
$$\mu_{pb} = 300\, cm^2/V\cdot s$$
$$\mu_{pc} = 200\, cm^2/V\cdot s$$

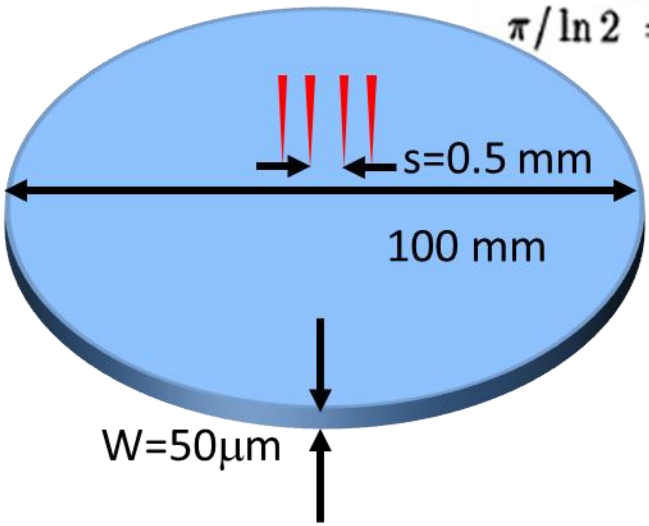
$$\rho_a = 3.6\Omega cm$$
$$\rho_b = 4.2\Omega cm$$
$$\rho_c = 6.3\Omega cm$$

5 Uno strumento con sonda a quattro punte, con spaziatura tra le sonde di 0,5 mm, viene usato per misurare la resistività di un pezzo di silicio di tipo p. Si determini la resistività del pezzo di semiconduttore se il suo diametro è 100 mm e lo spessore è 50 μm. La corrente ha un'intensità di 1 mA e la differenza di potenziale misurata tra le due sonde più interne è di 10 mV. Se il campione venisse tagliato in piccole piastrine quadrate di 5 mm di lato, quanto sarebbe stata la tensione misurata per una corrente costante di 1 mA?

Fig.2.6. Metodo delle 4 punte. Formula 2.16

$$\rho = \frac{V}{I} W \cdot CF \ \Omega \cdot cm$$

Nel limite $d \gg s$, dove s è la spaziatura tra le sonde, il fattore di correzione vale $\pi / \ln 2 = 4{,}54$.

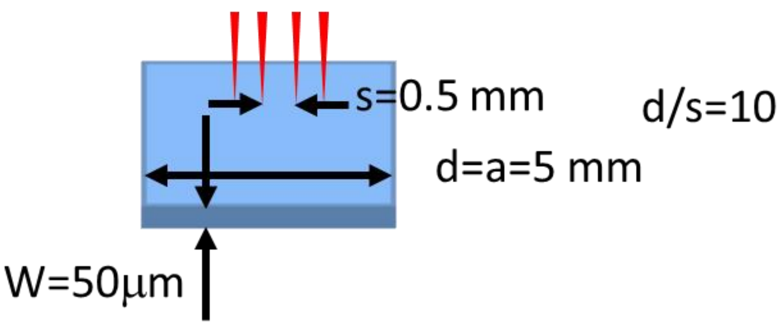


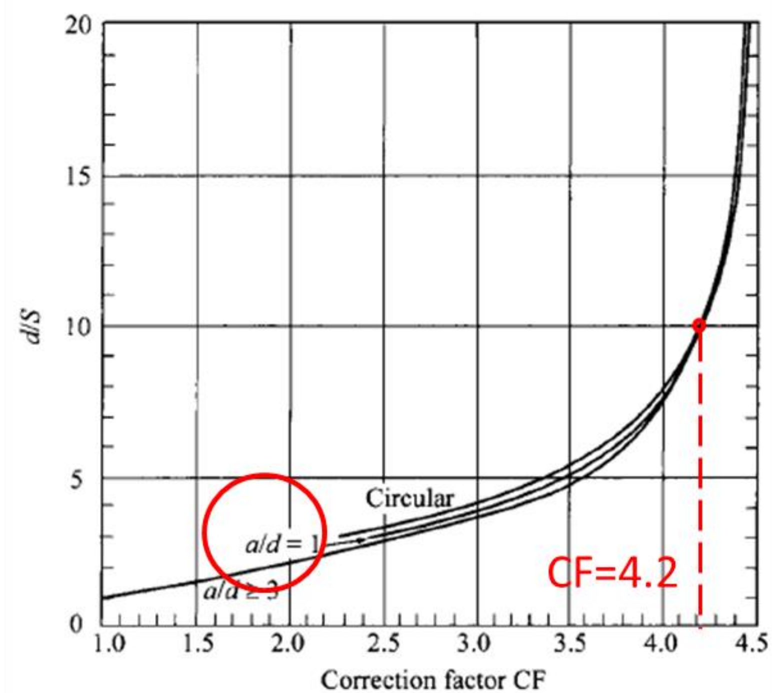
$$\rho = \frac{10mV}{1mA} 50\mu m \cdot 4.54 = 0.23\,\Omega \cdot cm$$

5 Uno strumento con sonda a quattro punte, con spaziatura tra le sonde di 0,5 mm, viene usato per misurare la resistività di un pezzo di silicio di tipo *p*. Si determini la resistività del pezzo di semiconduttore se il suo diametro è 100 mm e lo spessore è 50 μm. La corrente ha un'intensità di 1 mA e la differenza di potenziale misurata tra le due sonde più interne è di 10 mV. Se il campione venisse tagliato in piccole piastrine quadrate di 5 mm di lato, quanto sarebbe stata la tensione misurata per una corrente costante di 1 mA?

$$V = \frac{\rho I}{W \cdot CF}$$

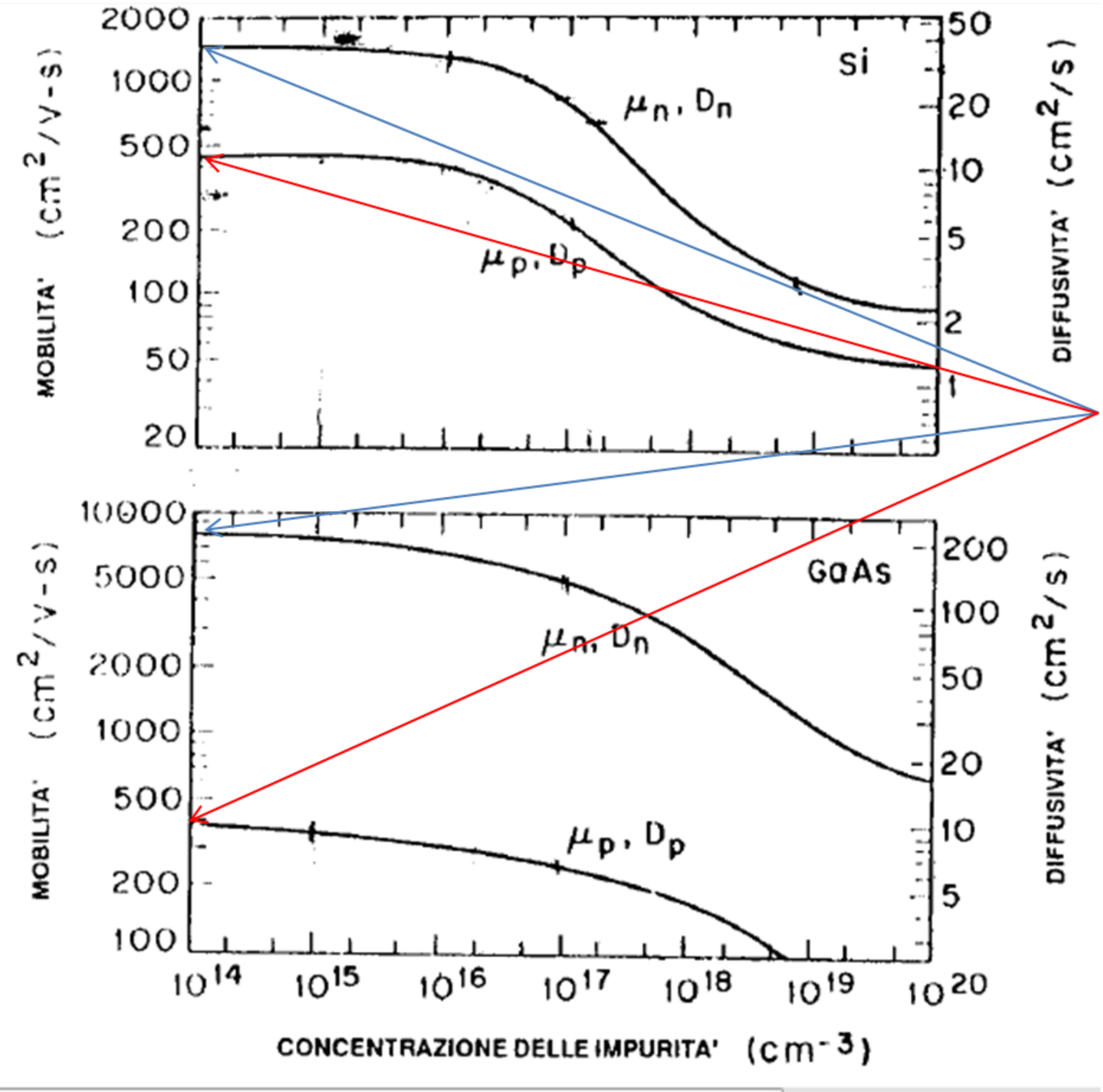
Fig.2.6. Metodo delle 4 punte. Formula 2.16





$$V = \frac{\rho I}{W \cdot CF} = \frac{0.22 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-4} \times 4.2} = 0.010V = 10mV$$

6 Determinare le resistività del Si intrinseco e del GaAs intrinseco alla temperatura di 300 K.



$$\rho_i = \frac{1}{qn_i\left(\mu_n + \mu_p\right)}$$

Si prendono questi valori di mobilità

Per n_i, abbiamo a pag.23

$$n_i = 1.45 \times 10^{10}\, cm^{-3} \qquad Si$$
$$n_i = 1.79 \times 10^{6}\, cm^{-3} \qquad GaAs$$

7 Sia dato un pezzo di silicio con drogaggio incognito. Eseguite tutte le misure si ottengono le seguenti informazioni con riferimento ai simboli della Figura 2.8: $W = 0{,}05$ cm, $A = 1{,}6\ 10^{-3}$ cm^2, $I = 2{,}5$ mA e il campo magnetico è di 30 nT (si ricordi che 1 T = 10^4 Wb/cm^2). Se si misura una tensione di Hall di +10 mV, si desidera conoscere il coefficiente di Hall, il tipo di conducibilità, la concentrazione dei portatori maggioritari, la resistività e la mobilità del campione di semiconduttore.

$$\frac{1}{qp} = -\frac{A}{W}\frac{V_H}{I_p B_z}$$

Noi possiamo calcolare la velocità dei portatori maggioritari

$$v_{px} = \mu_p E = \frac{J_p}{qp} = \frac{I_p}{Aqp}$$

Per calcolare la resistività, però, occorre la mobilità. Questa può essere ottenuta dal grafico di pag.40 nella ipotesi che vi sia un solo tipo di droganti

8 Un pezzo di semiconduttore di tipo n ha un drogaggio di arsenico di $2\ 10^{16}$ atomi/cm^3, una densità di centri di ricombinazione nel corpo del materiale di $2\ 10^{15}$ atomi/cm^2 e una concentrazione di centri di ricombinazione superficiale di 10^{10} centri/cm^3. (a) Trovare all'interno del corpo del semiconduttore il tempo di vita dei portatori minoritari, la lunghezza di diffusione e la velocità di ricombinazione superficiale in condizioni di basso livello di iniezione. I valori di σ_p e σ_s sono rispettivamente $5\ 10^{-15}$ cm^2 e $2\ 10^{-16}$ cm^2. (b) Se il campione è illuminato con una luce che viene assorbita uniformemente e crea 10^{17} coppie elettrone-lacuna/cm$^2 s$, quanto vale la concentrazione delle lacune alla superficie?

Questa è una incongruenza dimensionale.
E' evidente che abbiamo

$$N_t = 2\times10^{15} \quad atomi/cm^3$$
$$N_{st} = 10^{10} \quad centri/cm^2$$

Inoltre, NON avendo altri dati, assumiamo trappole profonde, ossia

$$E_t \approx E_i$$

Ricordiamo anche che siamo in **DEBOLE INIEZIONE**

8 Un pezzo di semiconduttore di tipo n ha un drogaggio di arsenico di $2\ 10^{16}$ atomi/cm^3, una densità di centri di ricombinazione nel corpo del materiale di $2\ 10^{15}$ atomi/cm^2 e una concentrazione di centri di ricombinazione superficiale di 10^{10} centri/cm^3. (a) Trovare all'interno del corpo del semiconduttore il tempo di vita dei portatori minoritari, la lunghezza di diffusione e la velocità di ricombinazione superficiale in condizioni di basso livello di iniezione. I valori di σ_p e σ_s sono rispettivamente $5\ 10^{-15}$ cm^2 e $2\ 10^{-16}$ cm^2. (b) Se il campione è illuminato con una luce che viene assorbita uniformemente e crea 10^{17} coppie elettrone-lacuna/$cm^2 s$, quanto vale la concentrazione delle lacune alla superficie?

$$\tau_p = \frac{1}{v_{th}\sigma_p N_t} \qquad S_{lr} = v_{th}\sigma_p N_{st}$$

$$N_D = 2\times 10^{16}\, cm^{-3} \Rightarrow D_p \approx 10\, cm^2/s$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$$p_n(x) = p_{n0} + \tau_p G_L\left(1 - \frac{\tau_p S_{lr}}{L_p + \tau_p S_{lr}} e^{-\frac{x}{L_p}}\right) \qquad \boxed{p_n(0) = p_{n0} + \tau_p G_L\left(1 - \frac{\tau_p S_{lr}}{L_p + \tau_p S_{lr}}\right)}$$

9 Su di una superficie laterale di una stretta striscia di silicio di tipo n lunga W vengono iniettati portatori minoritari; questi vengono poi estratti dalla superficie opposta dove $p_n(W) = p_{no}$. Nella regione $0 < x < W$ non vi è campo elettrico. Si ricavi l'espressione delle densità di corrente sulle due superfici. Sapendo che il tempo di vita dei portatori è 50 μs e che $W = 0{,}1$ mm, si calcoli la frazione di corrente iniettata che raggiunge per diffusione la superficie opposta. Sia $D = 50$ cm^2/s.

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{50 \times 50 \times 10^{-6}} = 5 \times 10^{-4}\, cm = 5 \mu m$$

$$J_p(x) = q \frac{D_p}{L_p}\left[p_n(0) - p_{n0}\right] \frac{\cosh\left(\frac{W-x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_p}\right)}$$

$$\frac{J_p(W)}{J_p(0)} = \frac{1}{\cosh\left(\frac{W}{L_p}\right)} = \text{a voi il calcolo}$$

10 In un esperimento di Haynes-Schockley i massimi valori dei portatori minoritari per $t_1 = 100\ \mu s$ e per $t_2 = 200\ \mu s$ differiscono di un fattore 5. Si calcoli il tempo di vita dei portatori minoritari.

$$p_n(x,\ t) = \frac{N}{\sqrt{4\pi D_p t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_p t} - \frac{t}{\tau_p}\right) + p_{no} \qquad (2.93).$$

$$p_{\max}(t) - p_{n0} = \frac{N}{\sqrt{4\pi D_p t}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

$$\frac{p_{\max}(t_1) - p_{n0} = \dfrac{N}{\sqrt{4\pi D_p t_1}} \exp\left(-\dfrac{t_1}{\tau_p}\right)}{p_{\max}(t_2) - p_{n0} = \dfrac{N}{\sqrt{4\pi D_p t_2}} \exp\left(-\dfrac{t_2}{\tau_p}\right)} = \sqrt{\frac{t_2}{t_1}} \exp\left(\frac{t_2 - t_1}{\tau_p}\right)$$

$$5 = \sqrt{2} \exp\left(\frac{100 \times 10^{-6}}{\tau_p}\right)$$