



# Politecnico di Torino

Dispositivi elettronici  
Ingegneria Fisica  
Laboratorio Silicio omogeneo

Camolese Claudio  
Matricola: 297378  
email: [s297378@studenti.polito.it](mailto:s297378@studenti.polito.it)

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	Ricavare i valori per l'esperimento . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Esercizio A: Silicio omogeneo senza illuminazione</b>	<b>3</b>
2.1	A.1 . . . . .	3
2.2	A.2 . . . . .	4
2.3	A.3 . . . . .	5
2.4	A.4 . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Esercizio B: Silicio omogeneo sotto illuminazione</b>	<b>8</b>
3.1	B.1 . . . . .	9
3.2	B.2 . . . . .	9
3.3	B.3 . . . . .	10
3.4	B.4 . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Codice</b>	<b>12</b>
4.1	<i>Padre</i> . . . . .	12
4.1.1	A . . . . .	12
4.1.2	B . . . . .	14
4.2	<i>MATLAB</i> . . . . .	15
4.2.1	A . . . . .	15
4.2.2	B . . . . .	19

# 1 Introduzione

La relazione qui di seguito riportata riguarda il primo di due laboratori dell'esame di *Dispositivi elettronici*. In questo laboratorio si svolgono diverse simulazioni su un campione di silicio.

## 1.1 Ricavare i valori per l'esperimento

Prima di iniziare, è necessario indicare come sono state ottenute le dimensioni del campione preso in esame e del rispettivo drogaggio, in quanto si richiede espressamente di usare delle particolari formule per stabilire le dimensioni del modello, il valore e il tipo di drogaggio.

Le dimensioni sono state calcolate inserendo in *MATLAB* le formule, tenendo in considerazione le informazioni personali:

- $n$ : numero di lettere nel nome;
- $s$ : numero di lettere nel cognome.

Per il valore del drogaggio, la formula da utilizzare è  $N = a \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , con  $a = \text{mod}(s, 9) + 1$ . Invece, per quanto riguarda il tipo di drogaggio, si usa la formula  $D = \text{mod}(s + n, 2)$  dove se:

- $D = 0$ : il drogaggio è di tipo n
- $D \neq 0$ : il drogaggio è di tipo p

Le dimensioni del campione, in micrometri  $\mu\text{m}$ , sono calcolate come segue:

- $x = (n + s)$  moltiplicato per la somma degli ultimi 4 numeri della mia matricola
- $y = s$  moltiplicato per la somma dei primi due numeri della mia matricola
- $z = 1 \cdot 10^3 \mu\text{m}$

In questo caso, basandoci sulle informazioni personali, i calcoli sono eseguiti utilizzando  $n = 7$  e  $s = 8$ . Il dispositivo avrà le seguenti caratteristiche:

- $x = (8 + 7) * (7 + 3 + 7 + 8) = 375 \mu\text{m}$
- $y = 8 * (2 + 9) = 88 \mu\text{m}$
- $z = 1 * 10^3 \mu\text{m}$
- $N = 9 * 10 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$
- tipo di drogaggio :  $p$

Il campione verrà analizzato, quando non specificato, ad una temperatura  $T = 300\text{K}$ .

Nella relazione sono riportati diversi grafici, i quali sono stati ottenuti tramite il tool *PADRE* integrando i risultati su *MATLAB*. Per completezza, a fine relazione, vengono riportati i codici utilizzati.

## 2 Esercizio A: Silicio omogeneo senza illuminazione

In questo esercizio, si richiede di rispondere a diverse domande circa un campione di silicio drogato non sottoposto a illuminazione.

### 2.1 A.1

La prima richiesta consiste nel riportare il diagramma a bande in condizioni di equilibrio e di commentare tale risultato. Inoltre, si chiede di riportare il valore di energy-gap  $E_g$ , la differenza  $E_F - E_v$  e di calcolare queste stesse quantità con le formule analitiche al fine di comparare i risultati. Di seguito viene riportato il grafico del diagramma a bande in condizione di equilibrio del campione di silicio dopato-p.

Poiché il nostro campione è silicio con un drogaggio di tipo p, sappiamo che il livello di Fermi si trova in prossimità della banda di valenza. Come è possibile evincere dal grafico 1, questa deduzione è confermata anche dal plot eseguito tramite *PADRE*.

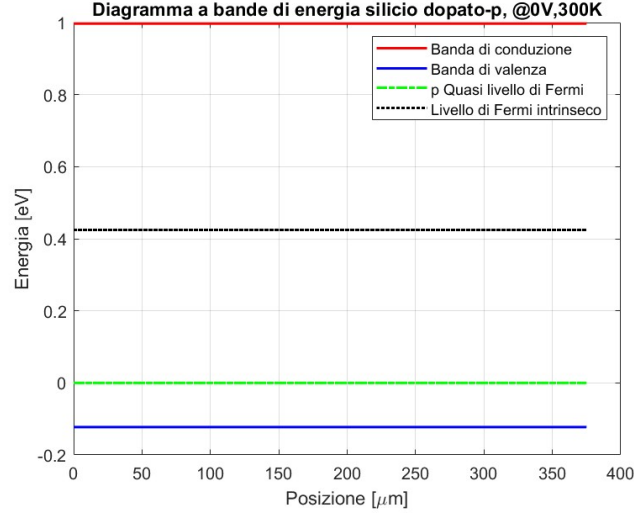


Figura 1: Diagramma a bande @0V 300K

Per calcolare  $E_g$  tramite *PADRE* è sufficiente applicare la definizione di energy-gap. Ricordando che, all'equilibrio, le bande sono costanti, si scrive la formula:

$$E_g = \langle \vec{E}_c - \vec{E}_v \rangle = 1.12 \text{ eV}^1 \quad (1)$$

dove  $\vec{E}_c$  e  $\vec{E}_v$  sono i vettori ricavati tramite la simulazione.

Invece, analiticamente,  $E_g$ , si ottiene tramite la seguente formula:

$$n_i^2 = N_c N_v e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad (2)$$

Da cui si ricava  $E_g$ :

$$E_g = -\ln\left(\frac{n_i^2}{N_c N_v}\right) \cdot kT = 1.12 \text{ eV} \quad (3)$$

Per calcolare  $E_F - E_v$ , si usano i valori trovati da *Padre* e si scrive:

$$\langle \vec{E}_F - \vec{E}_v \rangle = 0.12 \text{ eV} \quad (4)$$

Per quanto riguarda il procedimento analitico, essendo un drogaggio di tipo *p* dove i portatori maggioritari sono le lacune, si ha:

$$E_F - E_v = k_b T \ln \frac{p}{N_v} \simeq k_b T \ln \frac{N}{N_v} = 0.12 \text{ eV} \quad (5)$$

Come si può vedere, in entrambi i casi, i valori ricavati tramite *Padre* coincidono con il calcolo analitico.

## 2.2 A.2

Nel secondo punto si richiede di riportare i grafici delle concentrazioni di lacune ed elettroni ottenuti tramite *Padre* e di ricavare questi valori utilizzando anche le formule analitiche.

Di seguito sono riportati i grafici delle concentrazioni dei portatori.

Come si può notare dal grafico 2, essendo un drogaggio di tipo-*p*, i portatori maggioritari sono le lacune mentre i minoritari sono gli elettroni. Il motivo per cui vi è questa discrepanza tra il numero di lacune e il numero di elettroni, è che abbiamo adoperato un drogaggio accettore il quale ha aumentato la concentrazione delle lacune portandola fino al valore di drogaggio  $N$  applicato al campione di silicio. Inoltre, sappiamo dalla *legge di azione di massa* che, all'equilibrio termodinamico, il prodotto tra le concentrazioni dei portatori deve essere costante. I valori delle concentrazioni dei portatori ottenuti da *Padre* e deducibili dalla figura 2 sono:

<sup>1</sup>la notazione  $\langle \rangle$  indica una media calcolata su  $n$  vettori, tuttavia, poiché all'equilibrio le concentrazioni sono costanti, è sufficiente calcolare tale valore per un vettore solo.

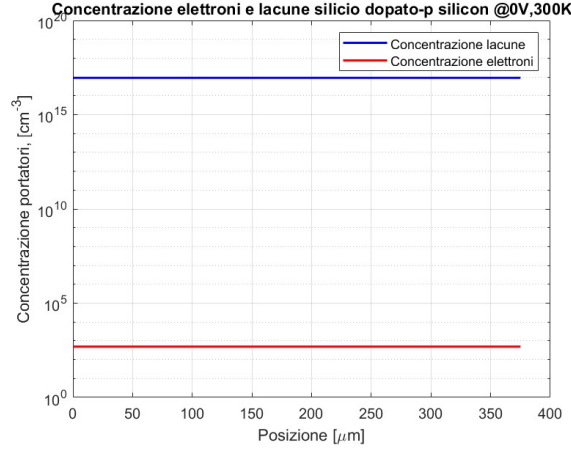


Figura 2: Concentrazione dei portatori silicio dopato-p @0V,300K

$$p = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{lacune}}{\text{cm}^3} \quad (6)$$

$$n = 4.9 \cdot 10^2 \frac{\text{elettroni}}{\text{cm}^3} \quad (7)$$

Ci si occupa ora di ottenere i valori delle concentrazioni dei portatori tramite formule analitiche. Ricordando le equazioni di Boltzmann:

$$n = N_c e^{\frac{E_F - E_c}{k_b T}} \quad (8)$$

$$p = N_v e^{\frac{E_v - E_F}{k_b T}} \quad (9)$$

Si ha:

$$n_i = n \cdot p = \sqrt{N_c N_v e^{\frac{E_v - E_c}{k_b T}}} \quad (10)$$

Sapendo che i maggioritari possono essere approssimati al valore di drogaggio:

$$N = p = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{lacune}}{\text{cm}^3} \quad (11)$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} \simeq \frac{n_i^2}{N} = 4.9 \cdot 10^2 \frac{\text{elettroni}}{\text{cm}^3} \quad (12)$$

Ecco quindi che, usando le equazioni di Boltzmann e la legge di azione di massa, abbiamo dimostrato la validità delle formule analitiche e avuto un riscontro positivo con i dati ricavati da *Padre* riportati nel grafico 2.

### 2.3 A.3

La terza parte dell'esercizio chiede di applicare al campione di silicio un potenziale  $V_A$  e in seguito di rappresentare graficamente e calcolare tramite formule analitiche il diagramma a bande, il campo elettrico e la corrente totale.

Il potenziale  $V_A$  da imporre, ha modulo  $\frac{n}{s} V$ , in questo caso:

$$V_A = \frac{n}{s} = \frac{7}{8} \simeq 0,8 V \quad (13)$$

Una volta trovati i valori tramite *Padre* e elaborati tramite *MATLAB*, si è in grado di riportare il grafico 4 che rappresenta il diagramma a bande di energia per un campione di silicio dopato-p sottoposto a 0.8V a 300K.

Si può immediatamente notare come, a differenza del grafico 1, i livelli di energia non sono costanti, in quanto, applicando un potenziale, usciamo dalla condizione di equilibrio. Sappiamo

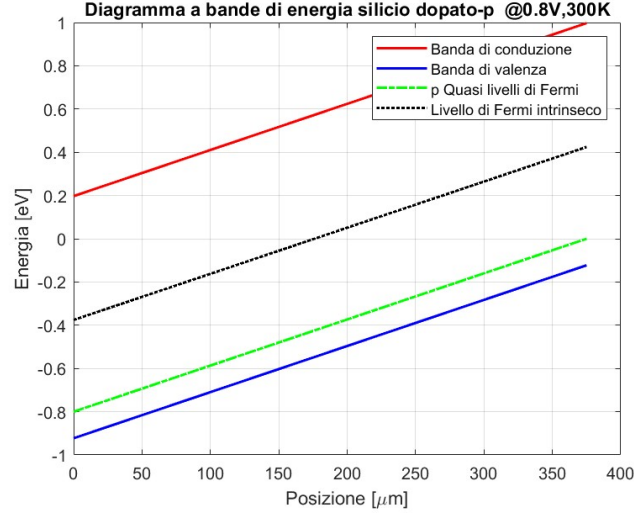


Figura 3: Diagramma a bande di energia silicio p-dopato @0.8V, 300K

che un campo elettrico ha direzione opposta rispetto al potenziale. Tuttavia, il verso del vettore dipende dal sistema di riferimento scelto. *Padre*, di default, inserisce un segno negativo poiché prende il verso del potenziale come positivo. Per completezza, si riporta anche il grafico con il sistema di riferimento invertito.

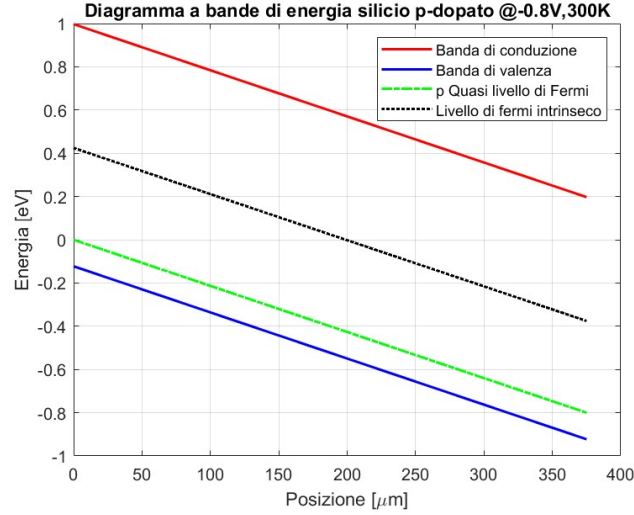


Figura 4: Diagramma a bande di energia silicio p-dopato @-0.8V, 300K

Per quanto riguarda il campo elettrico, ciò che si ottiene con *Padre* è rappresentato in figura 5.

Analiticamente, il campo elettrico può essere calcolato tramite la formula di Poisson. Considerando una sola dimensione abbiamo quanto segue:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -\varepsilon_x \Rightarrow V_a = -\varepsilon_x \cdot x \Rightarrow \varepsilon_x = \frac{V_a}{x} = 21.3 \text{ V/cm} \quad (14)$$

Come vediamo dal grafico 5 le formule analitiche rispettano le valutazioni effettuate da *Padre*.

Si richiede di rappresentare e calcolare anche la corrente totale che scorre nel semiconduttore. Tramite plot si ottiene il grafico 6.

Il valore ricavato da *Padre* ci fornisce  $i = 0.0799 \text{ A}$ .

Un semiconduttore percorso da corrente si comporta come un resistore. Possiamo dunque considerare la conducibilità elettrica. In questo caso, possiamo approssimare e trascurare il contributo degli elettroni in quanto sono i portatori minoritari. Usando come mobilità  $\mu_n = 831.0986 \text{ cm}^2\text{C}^{-1}\text{V}^{-1}$  e  $\mu_p = 308.4246 \text{ cm}^2\text{C}^{-1}\text{V}^{-1}$  si ha:

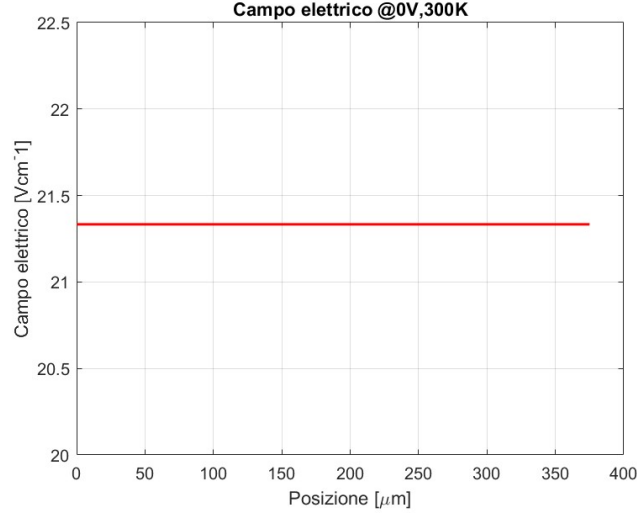


Figura 5: Campo elettrico silicio drogato-p @0.8V, 300K

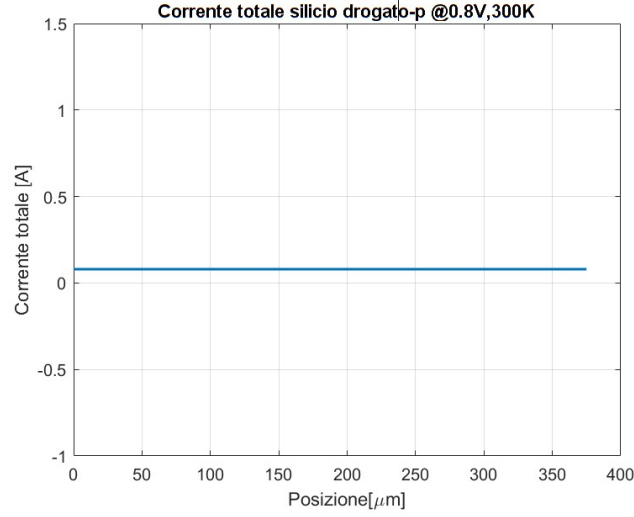


Figura 6: Corrente totale silicio drogato-p @0.8V,300K

$$\sigma = q(\mu_p p + \mu_n n) \Rightarrow \sigma = q\mu_n p \quad (15)$$

Una volta ottenuta la conducibilità, si ricava la resistenza generata dal campione:

$$R = \frac{l}{\sigma A} \quad (16)$$

Considerando che gli elettrodi sono posizionati agli estremi del lato  $x$ ,  $A$  è la superficie, valutata in  $cm^2$ , calcolata come  $A = yz$  in quanto sono le superficie perpendicolari a  $x$ .

Si può finalmente ricavare la corrente come:

$$i = \frac{V}{R} = 0.08 \text{ A} \quad (17)$$

Il risultato coincide con quanto ottenuto tramite *Padre* e riportato nel grafico 6.

## 2.4 A.4

L'ultima richiesta è quella di ripetere il punto A.2 imponendo una temperatura di  $T = 600K$ . Di seguito si riportano i valori di concentrazione dei portatori a questa temperatura.

Come si può vedere graficamente in figura 7, l'aumento della temperatura ha prodotto significative variazioni rispetto al grafico 2 ottenuto in condizione di equilibrio. L'uscita dalla condizione

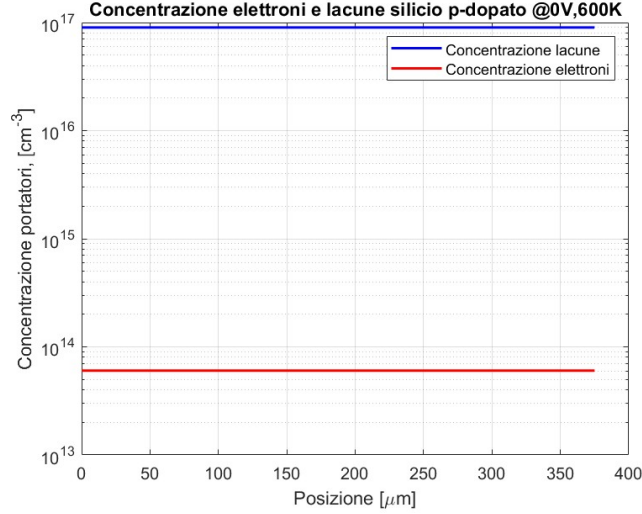


Figura 7: Concentrazione dei portatori silicio dopato-p @0V,600K

di equilibrio, dovuta all'aumento di  $T$  fa sì che i valori delle concentrazioni dei portatori vengano modificate. In figura 7, come ci aspettavamo, il valore dei portatori delle lacune, essendo i maggioritari, è rimasto pressoché invariato, mentre quello degli elettroni, essendo i minoritari, è aumentato notevolmente. I valori forniti da *Padre* sono:

$$p = 9.006 \cdot 10^{16} \text{ lacune/cm}^3 \quad (18)$$

$$n = 6.025 \cdot 10^{13} \text{ elettroni/cm}^3 \quad (19)$$

Analiticamente si procede come quanto visto in 2.2, ricordandosi però che anche  $N_c$  e  $N_v$  dipendono dalla temperatura  $T$ . Usando  $T = 600K$  e  $T_0 = 300K$ , si ha:

$$N_c(T) = N_c(T_0) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} = 7.9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^3 \quad (20)$$

$$N_v(T) = N_v(T_0) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} = 2.9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^3 \quad (21)$$

Tramite le equazioni di Boltzmann siamo in grado di ricavarci le concentrazioni dei portatori.

$$p = N_v(T) e^{\frac{E_v - E_F}{k_b T}} = 9.00 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad (22)$$

$$n = N_c(T) e^{\frac{E_F - E_c}{k_b T}} = 6.01 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \quad (23)$$

I calcoli analitici confermano dunque quanto ottenuto tramite l'elaborazione dei dati con *Padre* e il grafico ottenuto tramite l'elaborazione dei valori in *MATLAB*.

È interessante, soffermarsi anche su ciò che accade circa i livelli di energia quando si aumenta la temperatura. Sappiamo che, poiché la concentrazione degli elettroni è aumentata, si ha un energy-gap  $E_g$  ridotto rispetto alla condizione di equilibrio. Anche il valore  $E_F - E_V$  ha ovviamente riscontrato dei cambiamenti, e in particolare, ciò che ci aspettiamo, è un aumento di questo dato in quanto il numero di elettroni è notevolmente aumentato. I dati tramite *Padre* confermano quanto appena detto infatti si ha:

$$E_g = \langle \vec{E}_c - \vec{E}_v \rangle = 1.027 \text{ eV} \quad (24)$$

$$\langle \vec{E}_F - \vec{E}_v \rangle = 0.299 \text{ eV} \quad (25)$$

### 3 Esercizio B: Silicio omogeneo sotto illuminazione

Il secondo esercizio chiede di considerare il campione di silicio precedentemente citato e di illuminarlo sul lato  $x = 0$  tramite una fonte di luce. Quest'ultima determinerà un tasso di generazione



ottica  $G_{opt} = s \cdot 10^a \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$  dove  $a = \text{mod}(n \cdot s, 3)$ . In questo caso si ha  $G_{opt} = 8 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ . Si chiede inoltre di porre il tempo di vita di elettroni e lacune pari a  $1 \mu\text{s}$ . I calcoli vengono svolti per  $T = 300 \text{K}$ .

### 3.1 B.1

Il primo punto chiede di calcolare la lunghezza di diffusione  $L$  per determinare se il nostro campione è a lato lungo, medio o corto. Usiamo quindi le formule:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau} = \sqrt{\nu_t \mu_n \tau} = 46.35 \mu\text{m} \quad (26)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau} = \sqrt{\nu_t \mu_p \tau} = 28.23 \mu\text{m} \quad (27)$$

Dato che il rapporto fra la lunghezza del campione e la lunghezza di diffusione è inferiore a 10, allora possiamo considerare il campione come un dispositivo avente lato intermedio.

### 3.2 B.2

Il secondo punto chiede di rappresentare graficamente la concentrazione di elettroni e lacune sotto illuminazione e di commentare tale risultato. Sotto illuminazione ciò che otteniamo è:

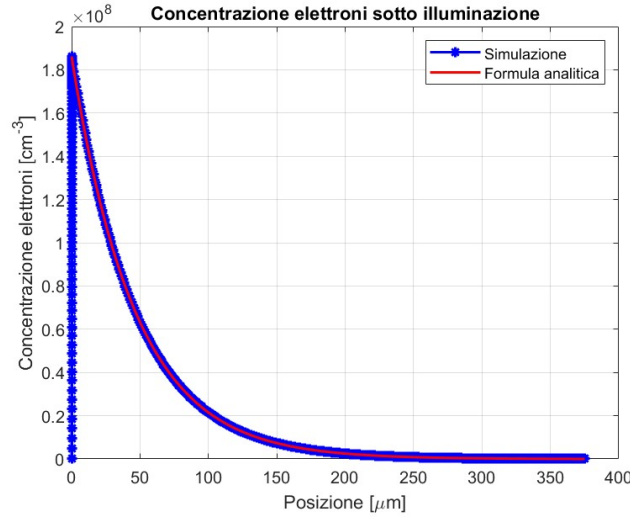


Figura 8: Concentrazione elettroni sotto illuminazione

La formula analitica è stata ottenuta tramite:

$$n'_p(x) = n'_p(0) \cdot \frac{\sinh(\frac{L-x}{L_n})}{\sinh(\frac{L}{L_n})} + n(0) \quad (28)$$

dove per  $n(0)$  si utilizza la concentrazione a riposo degli elettroni calcolata in 11.

Come si vede graficamente in figura 8, i valori ricavati tramite simulazione coincidono con quelli ottenuti tramite formule analitiche. Il risultato è concorde con quanto ci aspettavamo in quanto è alla base del principio dell'effetto fotoelettrico: un materiale sottoposto a radiazioni elettromagnetiche emette elettroni. Questi ultimi aumentano seguendo una *delta di Dirac* per  $x=0$  per poi decrescere in maniera esponenziale al crescere della posizione poiché ci allontaniamo dal lato del campione illuminato.

Per quanto riguarda invece le lacune, essendo i portatori maggioritari, risulta inefficiente calcolare i valori tramite *Padre* e analiticamente, in quanto la loro concentrazione deve rimanere costante rispetto a quanto calcolato in 1.1. Tuttavia, per completezza si riporta il grafico ottenuto.

Come si vede in figura 9, i dati analitici rispettano i valori ottenuti da *Padre* solo per  $x \rightarrow \infty$ . Inoltre, coerentemente a quanto detto prima, il valore delle lacune sotto illuminazione si assume coerente al valore di drogaggio iniziale.

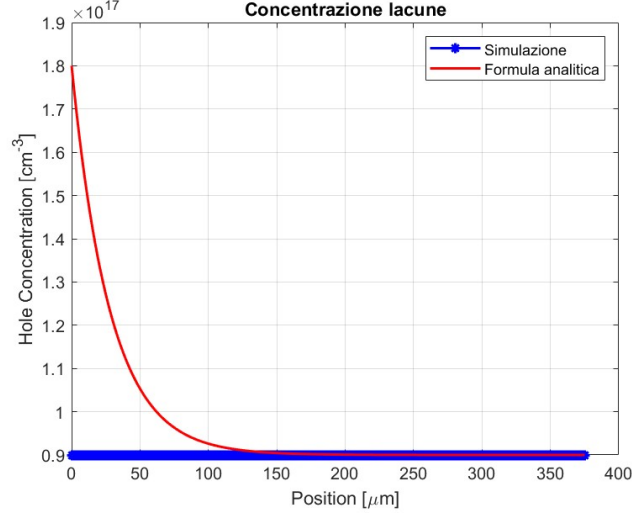


Figura 9: Concentrazione lacune sotto illuminazione

### 3.3 B.3

In questa sezione, la richiesta è di ripetere il punto 3.1 e 3.2 cambiando la lunghezza  $x$  in  $x = s$ . In questo caso avremo  $x = 8\mu m$ . Con questo nuovo valore della lunghezza del dispositivo, considerando le lunghezze di diffusione calcolate precedentemente nella formula 26, possiamo stimare il nostro campione come un dispositivo avente lato corto. Ciò che si ottiene tramite *Padre* è riportato in figura 10.

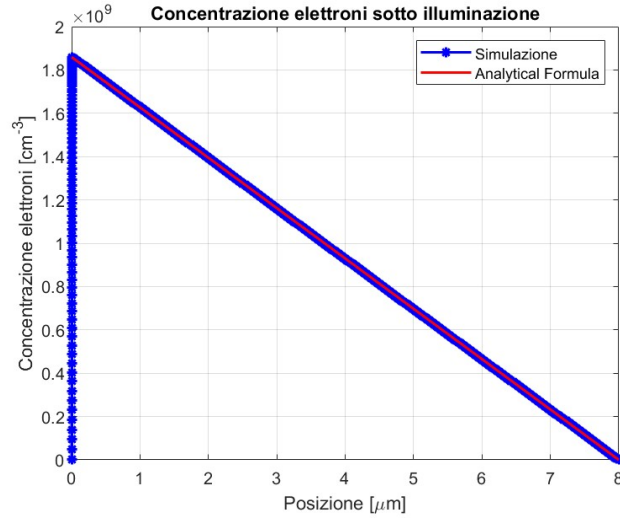


Figura 10: Concentrazione elettroni lato corto

Ciò che immediatamente notiamo confrontando i grafici 8 e 10 è la pendenza più accentuata a tendere a zero del lato corto. Il motivo per cui questo accade è indubbiamente legato al fatto che nel grafico 10 è stata utilizzata l'ipotesi di lato corto. Da una più attenta analisi, tuttavia, i due grafici evidenziano che, per un lato corto, la concentrazione diminuisce in maniera costante fino a tendere a zero, mentre per un lato medio, dopo un primo tratto costante, vi è un andamento esponenziale.

### 3.4 B.4

L'ultima parte ha come obiettivo quello di applicare un voltaggio  $V_A = [-0.5; 0.5]$  al campione sotto illuminazione e rappresentare la concentrazione di lacune ed elettroni ottenuti da *Padre*. Di seguito, si riportano i grafici relativi alle concentrazioni dei portatori analizzati per due diversi potenziali.

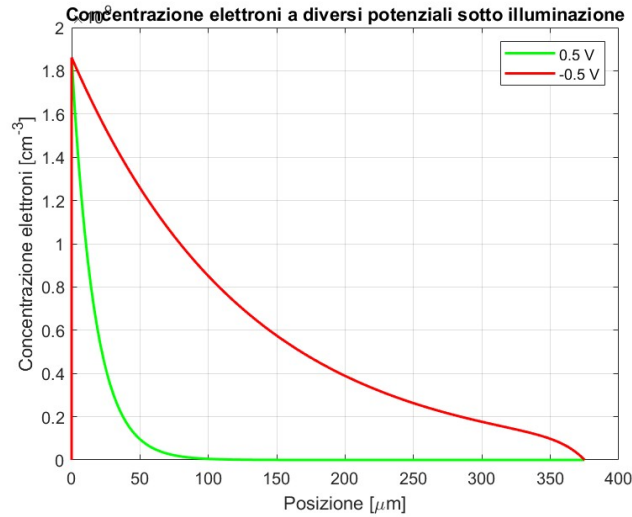


Figura 11: Concentrazione elettroni a diversi potenziali sotto illuminazione

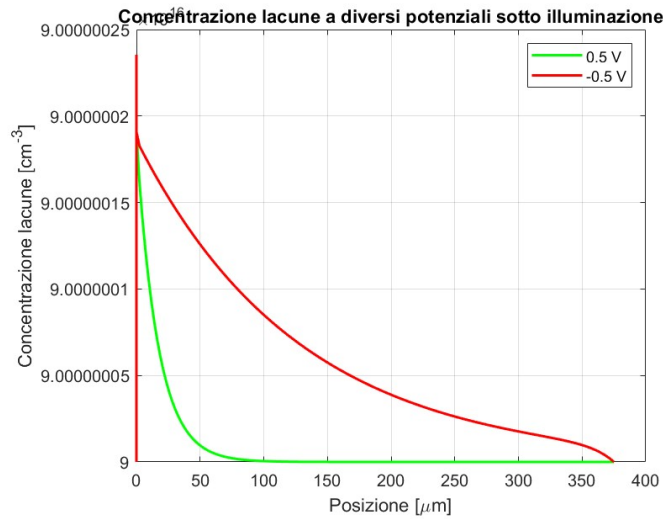


Figura 12: Concentrazione lacune a diversi potenziali sotto illuminazione

Analizzando il grafico 11 notiamo che, applicando una tensione positiva, si induce una ricombinazione più rapida con i maggioritari. Ciò comporta che gli elettroni, ovvero i portatori minoritari, raggiungano l'equilibrio prima rispetto a quanto visto nel grafico 8. Al contrario, se si applica una tensione negativa, la concentrazione dei portatori raggiungerà la condizione di equilibrio analizzata in 8 in un secondo momento.

## 4 Codice

### 4.1 *Padre*

#### 4.1.1 A

A1,A2)

```
title      Doped semiconductor p type

$Mesh Specifications
mesh      rect nx=200 ny=3 width=1000 outf=mesh
x.m       n=1  l=0 r=1
x.m       n=200 l=375 r=1
y.m       n=1  l=0 r=1
y.m       n=3  l=88 r=1

$ Regions Specifications
region    num=1 ix.l=1 ix.h=200 iy.l=1 iy.h=3 silicon
elec      num=1 ix.l=1 ix.h=1  iy.l=1 iy.h=3
elec      num=2 ix.l=200 ix.h=200 iy.l=1 iy.h=3

$ Doping Specifications
dop       reg=1 p.type conc=9e+16 uniform
plot.1d   dop a.x=0 b.x=375 b.y=44 a.y=44 points ascii outf=dop

$ Material Specifications
material name=silicon
+ EG300=1.12 PERMITTIVITY=11.7 NC300=2.8E19 NV300=1.04E19

$ Specify models
models temperature=300
system newton

$ Solve for initial conditions
solve init
plot.1d pot a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=pot
plot.1d band.val a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=vb
plot.1d band.con a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=cb
plot.1d qfn a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=qfn
plot.1d qfp a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=qfp
plot.1d ele a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=ele
plot.1d hole a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=hole
plot.1d e.field a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=efield
end
```

A.3)

```
title      Doped semiconductor n type PosBias

$Mesh Specifications
mesh      rect nx=200 ny=3 width=1000 outf=mesh
x.m       n=1  l=0 r=1
x.m       n=200 l=375 r=1
y.m       n=1  l=0 r=1
y.m       n=3  l=88 r=1

$ Regions Specifications
region    num=1 ix.l=1 ix.h=200 iy.l=1 iy.h=3 silicon
elec      num=1 ix.l=1 ix.h=1  iy.l=1 iy.h=3
elec      num=2 ix.l=200 ix.h=200 iy.l=1 iy.h=3

$ Doping Specifications
```

```

dop          reg=1 p.type conc=9e+16  uniform

$ Material Specifications
material name=silicon
+ EG300=1.12 PERMITTIVITY=11.7 NC300=2.8E19 NV300=1.04E19 MUN=831.0986 MUP=308.4246

$ Specify models
models  temperature=300
system electrons holes newton

$ Solve for initial conditions
log outf=iv
solve init
solve vstep=0.1 nsteps=8 elect=1
plot.1d pot a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=potiv
plot.1d band.val a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=vbiv
plot.1d band.con a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=cbiv
plot.1d qfn a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=qfniv
plot.1d qfp a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=qfpiv
plot.1d ele a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=eleiv
plot.1d hole a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=holeiv
plot.1d e.field a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=efieldiv
plot.1d j.electr a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=jelectr
plot.1d j.hole a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=jhole
plot.1d j.total a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=jtot
end

```

A.4)

```

          title      Doped semiconductor p type

$Mesh Specifications
mesh      rect nx=200 ny=3 width=1000 outf=mesh
x.m       n=1  l=0 r=1
x.m       n=200 l=375 r=1
y.m       n=1  l=0 r=1
y.m       n=3  l=88 r=1

$ Regions Specifications
region    num=1 ix.l=1 ix.h=200 iy.l=1 iy.h=3 silicon
elec      num=1 ix.l=1 ix.h=1  iy.l=1 iy.h=3
elec      num=2 ix.l=200 ix.h=200 iy.l=1 iy.h=3

$ Doping Specifications
dop       reg=1 p.type conc=9e+16  uniform
plot.1d   dop a.x=0 b.x=375 b.y=44 a.y=44 points ascii outf=dop

$ Material Specifications
material name=silicon
+ EG300=1.12 PERMITTIVITY=11.7 NC300=2.8E19 NV300=1.04E19

$ Specify models
models  temperature=600
system newton

$ Solve for initial conditions
solve init
plot.1d pot a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=pot
plot.1d band.val a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=vb
plot.1d band.con a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=cb
plot.1d qfn a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=qfn
plot.1d qfp a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=qfp

```

```

plot.1d ele a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=ele
plot.1d hole a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=hole
plot.1d e.field a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=efield

end

```

#### 4.1.2 B

B.1)

```

title Semiconduttore intermedio con generazione ottica
$ Costruzione dispositivo
mesh rect nx=250 ny=2 outf=mesh
x.m n=1 l=0 r=1
x.m n=40 l=0.01 r=1
x.m n=250 l=375 r=1
y.m n=1 l=0 r=1
y.m n=2 l=88 r=1
$ Regioni
region num=1 ix.l=1 ix.h=40 iy.l=1 iy.h=2 silicon
region num=2 ix.l=40 ix.h=250 iy.l=1 iy.h=2 silicon
elec num=1 ix.l=1 ix.h=1 iy.l=1 iy.h=2
elec num=2 ix.l=250 ix.h=250 iy.l=1 iy.h=2
$ Drogaggio
dop reg=1 p.type conc=9e+16 uniform
dop reg=2 p.type conc=9e+16 uniform
$ Materiali
material name=silicon
+ taun0=1e-06 taup0=1e-06 MUN=831.0986 MUP=308.4246
$ Modelli
models srh temperature=300
system electrons holes newton
solve init
solve prev gen=8e21 reg.gen=1 dir.gen=x
plot.1d ele a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=ele
plot.1d hole a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=hole
end

```

B.2)

```

title Semiconduttore intermedio con generazione ottica
$ Costruzione dispositivo
mesh rect nx=250 ny=2 outf=mesh
x.m n=1 l=0 r=1
x.m n=40 l=0.01 r=1
x.m n=250 l=375 r=1
y.m n=1 l=0 r=1
y.m n=2 l=88 r=1
$ Regioni
region num=1 ix.l=1 ix.h=40 iy.l=1 iy.h=2 silicon
region num=2 ix.l=40 ix.h=250 iy.l=1 iy.h=2 silicon
elec num=1 ix.l=1 ix.h=1 iy.l=1 iy.h=2
elec num=2 ix.l=250 ix.h=250 iy.l=1 iy.h=2
$ Drogaggio
dop reg=1 p.type conc=9e+16 uniform
dop reg=2 p.type conc=9e+16 uniform
$ Materiali
material name=silicon
+ taun0=1e-06 taup0=1e-06 MUN=831.0986 MUP=308.4246
$ Modelli
models srh temperature=300
system electrons holes newton

```

```

solve init
solve prev gen=8e21 reg.gen=1 dir.gen=x
plot.1d ele a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=ele
plot.1d hole a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=hole
end

```

B.3) ripete il B.2 modificando la lunghezza del segmento.

B.4)

```

title      Doped semiconductor n type light lungo bias

$Mesh Specifications
mesh      rect nx=200 ny=4 width=1000 outf=mesh
x.m       n=1 l=0 r=1
x.m       n=40 l=0.01 r=1
x.m       n=200 l=375 r=1
y.m       n=1 l=0 r=1
y.m       n=4 l=88 r=1

$ Regions specifications
region    num=1 ix.l=1 ix.h=40 iy.l=1 iy.h=4 silicon
region    num=2 ix.l=40 ix.h=200 iy.l=1 iy.h=4 silicon

elec num=1 ix.l=1 ix.h=1 iy.l=1 iy.h=4
elec num=2 ix.l=200 ix.h=200 iy.l=1 iy.h=4

dop reg=1 p.type conc=9e+16 uniform
dop reg=2 p.type conc=9e+16 uniform

$ Material Specifications
material name=silicon
+ taun0=1e-06 taup0=1e-06 MUN=831.0986 MUP=308.4246

$ Specify models
models srh temperature=300
system electrons holes newton

$ Solve for initial conditions
solve init

$ Solve for applied bias: V1=0.5 V
solve v1=0.5 elect=1
solve gen=8e22 reg.gen=1 dir.gen=x
plot.1d ele a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=v1.ele
plot.1d hole a.x=0 b.x=375 a.y=44 b.y=44 ascii outf=v1.hole
end

```

## 4.2 MATLAB

### 4.2.1 A

A1)

```

close all,
clear all,
clc
%% 300 K!!!!
% Script for importing results

delimiterIn = ','; % Data delimiter
headerlinesIn = 4; % Number of header lines in the file

filename = 'ConductionBandPotential.txt'; % Name of the file to be imported

```

```

A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn); % Save the imported data in the variable A
pos_CB = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
CB = A.data(:,2); % Save in a separate vector the ordinate values

filename = 'ElectronConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Elec = A.data(:,1);
Elec = A.data(:,2);

filename = 'ElectrostaticPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_pot = A.data(:,1);
pot = A.data(:,2);

filename = 'HoleChargeConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Hole = A.data(:,1);
Hole = A.data(:,2);

filename = 'pQuasiFermiLevel.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_qpf = A.data(:,1);
qfp = A.data(:,2);

filename = 'ValenceBandPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_VB = A.data(:,1);
VB = A.data(:,2);

% Plot
figure,plot(pos_pot,pot,'b','LineWidth',1.5)
grid on
title('Electrostatic Potential @0V,300K')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Electrostatic Potential, [V]')

figure
plot(pos_CB,CB,'r',pos_VB,VB,'b',pos_qpf,qfp,'g-.',pos_pot,-pot,'k:', 'LineWidth',1.5)
grid on
title('Energy Band Diagram p-doped silicon @0V,300K')
legend('Conduction Band','Valence Band','p Quasi Fermi Level','Intrinsic Fermi Level')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Energy [eV]')

Ef_m_Ev_Simulation = qfp(1)-VB(1); % eV

figure,semilogy(pos_Hole,Hole,'b',pos_Elec,Elec,'r','LineWidth',1.5)
grid on
legend('Hole concentration','Electron Concentration')
title('Electron and hole concentrations p-doped silicon @0V,300K')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Carriers concentration, [cm^{-3}]')

pp0_Simulation = Hole(1); % cm^{-3}
np0_Simulation = Elec(1); % cm^{-3}

A2)

    close all,
clear all,
clc

```



```

% Script for importing results

delimiterIn = ','; % Data delimiter
headerlinesIn = 4; % Number of header lines in the file

filename = 'ConductionBandPotential.txt'; % Name of the file to be imported
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn); % Save the imported data in the variable A
pos_CB = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
CB = A.data(:,2); % Save in a separate vector the ordinate values

filename = 'ElectrostaticPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_pot = A.data(:,1);
pot = A.data(:,2);

filename = 'nQuasiFermiLevel.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_qfn = A.data(:,1);
qfn = A.data(:,2);

filename = 'TotalCurrent.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_TotalCurrent = A.data(:,1);
TotalCurrent = A.data(:,2);

filename = 'ValenceBandPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_VB = A.data(:,1);
VB = A.data(:,2);

filename = 'ivI1.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
Vsemic_300K = A.data(:,1);
Isemic_300K = A.data(:,2);

%% Plot
figure,plot(pos_pot,pot,'b','LineWidth',1.5)
grid on
title('Electrostatic Potential @1V,300K')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Electrostatic Potential, [V]')

figure
plot(pos_CB,CB,'r',pos_VB,VB,'b',pos_qfn,-qfn,'g-.',pos_pot,-pot,'k:', 'LineWidth',1.5)
grid on
title('Energy Band Diagram n-doped silicon @1V,300K')
legend('Conduction Band','Valence Band','n Quasi Fermi Level','Intrinsic Fermi Level')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Energy [eV]')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Nella figura seguente vi Ã la Total Current, ovvero la corrente lungo il
% semiconduttore che nel plot di PADRE viene espressa in AMPERE. In realtÃ
% c'Ã un errore: quella che vediamo nel grafico non Ã una corrente ma una
% densitÃ di corrente espressa in A/cm^2.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure
plot(pos_TotalCurrent,TotalCurrent,'LineWidth',1.5)
grid on
title('Corrente totale silicio drogato-p @0.8V,300K')

```

```

xlabel('Posizione[\mum]')
ylabel('Corrente totale [A]')

TotalCurrent_Simulation = TotalCurrent(1); % A

figure
plot(Vsemic_300K,Isemic_300K,'Linewidth',1.5)
grid on
title('Semiconductor Current as a function of the Applied Bias @300K')
xlabel('Applied Bias [V]')
ylabel('Current [A]')

filename = 'ElectricField.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_EF = A.data(:,1);
Fie = A.data(:,2);

figure
plot(pos_EF,-Fie,'r','LineWidth',1.5)
grid on
title("Eletric Field @0V,300K")
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Campo elettrico [Vcm-1]')

%% T=600 K
filename = 'ivI1.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
Vsemic_600K = A.data(:,1);
Isemic_600K = A.data(:,2);

figure
plot(Vsemic_300K,Isemic_300K,'Linewidth',1.5)
hold on
plot(Vsemic_600K,Isemic_600K,'Linewidth',1.5)
grid on
legend('T=300 K','T=600 K')
title('Semiconductor Current as a function of the Applied Bias')
xlabel('Applied Bias [V]')
ylabel('Current [A]')

A4)

    close all,
clear all,
clc
%% 600 K!!!!
% Script for importing results

delimiterIn = ','; % Data delimiter
headerlinesIn = 4; % Number of header lines in the file

filename = 'ConductionBandPotential.txt'; % Name of the file to be imported
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn); % Save the imported data in the variable A
pos_CB = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
CB = A.data(:,2); % Save in a separate vector the ordinate values

filename = 'ElectronConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Elec = A.data(:,1);
Elec = A.data(:,2);

```

```

filename = 'ElectrostaticPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_pot = A.data(:,1);
pot = A.data(:,2);

filename = 'HoleChargeConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Hole = A.data(:,1);
Hole = A.data(:,2);

filename = 'pQuasiFermiLevel.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_qpf = A.data(:,1);
qfp = A.data(:,2);

filename = 'ValenceBandPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_VB = A.data(:,1);
VB = A.data(:,2);

% Plot
figure,plot(pos_pot,pot,'b','LineWidth',1.5)
grid on
title('Electrostatic Potential @0V,600K')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Electrostatic Potential, [V]')

figure
plot(pos_CB,CB,'r',pos_VB,VB,'b',pos_qpf,qfp,'g-.',pos_pot,-pot,'k:', 'LineWidth',1.5)
grid on
title('Diagramma a bande di energia silicio dopato-p @0V,600K')
legend('Banda di conduzione','Banda di valenza','p Quasi livelli di Fermi','Livello intrinseco di
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Energy [eV]')

Ef_m_Ev_Simulation = qfp(1)-VB(1); % eV

figure,semilogy(pos_Hole,Hole,'b',pos_Elec,Elec,'r','LineWidth',1.5)
grid on
legend('Hole concentration','Electron Concentration')
title('Electron and hole concentrations p-doped silicon @0V,600K')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Carriers concentration, [cm^{-3}]')

pp0_Simulation = Hole(1); % cm^{-3}
np0_Simulation = Elec(1); % cm^{-3}

```

#### 4.2.2 B

B2)

```

close all
clear all
clc

```

```

tau_p=1e-6; % Lifetime constant for holes, s
kB=1.380649e-23;% % Boltzmann constant, J./K
qel=1.602176634e-19; % Elementary charge, C
T=300; % Temperature, K
Vt=kB*T/qel; % V
mu_n=831.0986; % Hole mobility, cm^2/V/s

```

```

mu_p=308.4246;
Dn=mu_n*Vt; % Hole diffusivity, cm^2/s
Dp=mu_p*Vt;
Ln=sqrt(Dn*tau_p)*1e4; % um
Lp=sqrt(Dp*tau_p)*1e4;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% HOLES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% L=50 um
delimiterIn = ','; % Data delimiter
headerlinesIn = 4; % Number of header lines in the file
filename = 'ElectronConcentrationa.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Medium = A.data(:,1);
Hole_Medium = A.data(:,2);

figure
plot(pos_Medium,Hole_Medium,'LineWidth',1.5)
grid on
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Concentrazione elettroni [cm^{-3}]')
title('Concentrazione elettroni sotto illuminazione')

% Comparision with analytical formulas
% Medium semiconductor
L=375; % um
x=linspace(0,L,200); % um
pp_n0=max(Hole_Medium); % cm^-3
n_p0= 494.3674813573;
n_p_Medium_Analytic=pp_n0.*sinh((L-x)./Ln)./sinh(L./Ln)+n_p0;

figure
plot(pos_Medium,Hole_Medium,'b-*','LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(x,n_p_Medium_Analytic,'r','LineWidth',1.5)
legend('Simulazione','Formula analitica')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Concentrazione elettroni [cm^{-3}]')
title('Concentrazione elettroni sotto illuminazione')

%% L=50 um
delimiterIn = ','; % Data delimiter
headerlinesIn = 4; % Number of header lines in the file
filename = 'HoleChargeConcentrationa.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Medium = A.data(:,1);
Hole_Medium = A.data(:,2);

figure
plot(pos_Medium,Hole_Medium,'LineWidth',1.5)
grid on
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Hole Concentration [cm^{-3}]')
title('Hole Concentration Under Illumination for L=50 \mum')

% Comparision with analytical formulas
% Medium semiconductor
L=375; % um

```

```

x=linspace(0,L,200); % um
pp_n0=max(Hole_Medium); % cm-3
p_n0=9e+16;
p_n_Medium_Analytic=pp_n0.*sinh((L-x)./Lp)./sinh(L./Lp)+p_n0;

```

```

figure
plot(pos_Medium,Hole_Medium,'b-*','LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(x,p_n_Medium_Analytic,'r','LineWidth',1.5)
legend('Simulazione','Formula analitica')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Hole Concentration [cm-3]')
title('Concentrazione lacune')

```

B3)

```

close all
clear all
clc

```

```

tau_p=1e-6; % Lifetime constant for holes, s
kB=1.380649e-23;% Boltzmann constant, J./K
qe1=1.602176634e-19; % Elementary charge, C
T=300; % Temperature, K
Vt=kB*T/qe1; % V
mu_n=831.0986; % Hole mobility, cm2/V/s
mu_p=308.4246;
Dn=mu_n*Vt; % Hole diffusivity, cm2/s
Dp=mu_p*Vt;
Ln=sqrt(Dn*tau_p)*1e4; % um
Lp=sqrt(Dp*tau_p)*1e4;

```

```

%% L=5 um
delimiterIn = ','; % Data delimiter
headerlinesIn = 4; % Number of header lines in the file
filename = 'ElectronConcentrationa.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Short = A.data(:,1);
Hole_Short = A.data(:,2);

```

```

figure
plot(pos_Short,Hole_Short,'LineWidth',1.5)
grid on
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Hole Concentration [cm-3]')
title('Hole Concentration Under Illumination for L=5 \mum')

```

```

% Comparision with analytical formulas
% Short semiconductor
L=8; % um
x=linspace(0,L,200); % um
pp_n0=max(Hole_Short); % cm-3
n_p0= 494.3674813573;
p_n_Short_Analytic=pp_n0.*((L-x)./L)+n_p0;

```

```

figure
plot(pos_Short,Hole_Short,'b-*','LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(x,p_n_Short_Analytic,'r','LineWidth',1.5)

```

```

legend('Simulazione','Analytical Formula')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Concentrazione elettroni [cm^{-3}]')
title('Concentrazioni elettroni sotto illuminazione')

%% L=50 um
delimiterIn = ','; % Data delimiter
headerlinesIn = 4; % Number of header lines in the file
filename = 'HoleChargeConcentrationa.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Medium = A.data(:,1);
Hole_Medium = A.data(:,2);

figure
plot(pos_Medium,Hole_Medium,'LineWidth',1.5)
grid on
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Hole Concentration [cm^{-3}]')
title('Hole Concentration Under Illumination for L=50 \mum')

% Comparision with analytical formulas
% Medium semiconductor
L=375; % um
x=linspace(0,L,200); % um
pp_n0=max(Hole_Medium); % cm^{-3}
p_n0=9e+16;
p_n_Medium_Analytic=pp_n0.*sinh((L-x)./Lp)./sinh(L./Lp)+p_n0;

figure
plot(pos_Medium,Hole_Medium,'b-*','LineWidth',1.5)
hold on
grid on
plot(x,p_n_Medium_Analytic,'r','LineWidth',1.5)
legend('Simulazione','Formula analitica')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Hole Concentration [cm^{-3}]')
title('Concentrazione lacune')

B4)

clear all
close all
clc
format long e

delimiterIn = ',';
headerlinesIn = 4;

filename = 'ElectronConcentration.txt'; % Name of the file to be imported
B = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn); % Save the imported data in the variable A
pos_Elec=B.data(:,1);
elec_pos = B.data(:,2); % Save in a separate vector the ordinate values

filename = 'ElectronConcentration-0.5.txt'; % Name of the file to be imported
C = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn); % Save the imported data in the variable A
elec_neg = C.data(:,2); % Save in a separate vector the ordinate values % um

figure
plot(pos_Elec,elec_pos,'g',pos_Elec,elec_neg,'r','Linewidth',1.5)
grid on
title('Concentrazione elettroni a diversi potenziali sotto illuminazione')
legend('0.5 V',' -0.5 V')

```

```

xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Concentrazione elettroni [cm^{-3}]')
filename = 'HoleChargeConcentration.txt'; % Name of the file to be imported
B = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn); % Save the imported data in the variable A
a=B.data(:,1);
b = B.data(:,2); % Save in a separate vector the ordinate values

filename = 'HoleChargeConcentration-0.5.txt'; % Name of the file to be imported
C = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn); % Save the imported data in the variable A
c = C.data(:,2); % Save in a separate vector the ordinate values % um

figure
plot(a,b,'g',a,c,'r','Linewidth',1.5)
grid on
title('Concentrazione lacune a diversi potenziali sotto illuminazione')
legend('0.5 V',' -0.5 V')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Concentrazione lacune [cm^{-3}]')

```