



Politecnico di Torino

Dispositivi elettronici
Ingegneria Fisica
Laboratorio Giunzione P-N

Camolese Claudio
Matricola: 297378
email: s297378@studenti.polito.it

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Ricavare i valori per l'esperimento	3
2	A	4
2.1	A.1	4
2.2	A.2	5
2.3	A.3	6
2.4	A.4	6
2.4.1	A.4.1	7
2.4.2	A.4.2	7
2.4.3	A.4.3	7
2.4.4	A.4.4	7
3	Codici	10
3.1	Padre	10
3.1.1	A.1-A.2 _A .3	10
3.1.2	A.4	10
3.2	MATLAB	11
3.2.1	A.1-A.2-A.3	11
3.2.2	A.4	15

1 Introduzione

Il secondo laboratorio del corso di *Dispositivi elettronici* riguarda la *giunzione P-N*. L'esercizio è diviso in più richieste a cui è possibile rispondere tramite l'ausilio dei software *Padre* e *MATLAB*. I codici utilizzati sono riportati alla fine della relazione.

1.1 Ricavare i valori per l'esperimento

Prima di iniziare con la simulazione, si ricavano i valori che identificano il nostro campione di silicio.

Essendo una *giunzione P-N*, il materiale sarà diviso in una regione di tipo-p e una di tipo-n dovuto al diverso tipo di drogaggio applicato. La consegna impone:

- **tipo-p:** $N_A = a \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- **tipo-n:** $N_D = b \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Per ricavare a, b si utilizza in *MATLAB* la funzione $a = \text{mod}(s, 9) + 1$ e $b = \text{mod}(n, 9) + 1$.

Per quanto riguarda le dimensioni del dispositivo in μm la consegna richiede:

- x è $(300 + n + s)$
- y è s volte la somma delle prime due cifre del numero di matricola.
- z è 1mm

con n, s rispettivamente il numero di lettere nel nome e nel cognome.

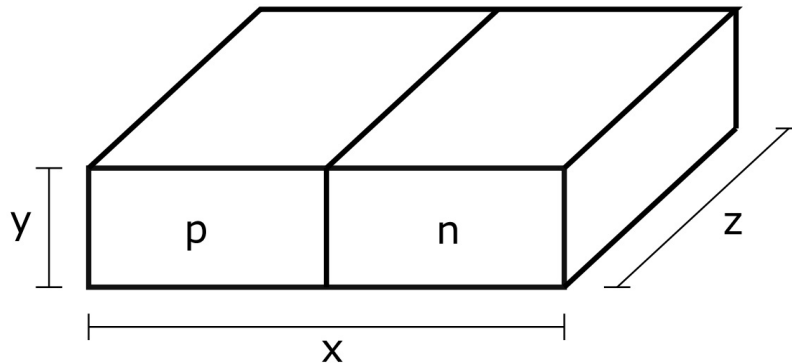


Figura 1: Dimensioni del campione di silicio

In questa simulazione, considerando che $n = 7$ e $s = 8$, si ha:

- **tipo-p:** $N_A = 9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- **tipo-n:** $N_D = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Avremo dunque un campione con i lati:

- $x = 315\mu\text{m}$
- $y = 88\mu\text{m}$
- $z = 1\text{mm}$

La giunzione si trova nel centro del dispositivo, quindi ad $\frac{x}{2} = 157.5\mu\text{m}$.

La mobilità degli elettroni e delle lacune risulta essere rispettivamente $\mu_n = 801 \text{ cm}^2/\text{V}/\text{s}$ e $\mu_p = 232 \text{ cm}^2/\text{V}/\text{s}$.

Inoltre, se non specificato, si presuppone una temperatura di $T = 300 \text{ K}$.

2 A

Di seguito si riporta lo svolgimento delle consegne articolate in 4 punti. Ciascuna consegna sarà seguita da una breve spiegazione arricchita da grafici e formulazioni analitiche quando richiesto.

2.1 A.1

Il primo punto richiede di rappresentare il diagramma a bande in condizioni di equilibrio e di commentare tale risultato. Si richiede inoltre di ricavare tramite *Padre* e successivamente analiticamente i lavori di estrazione $q\Phi_{S_n}$ e $q\Phi_{S_p}$ e il potenziale di *built-in* V_{bi} . Di seguito si riporta il grafico del diagramma a bande ottenuto tramite *Padre*:

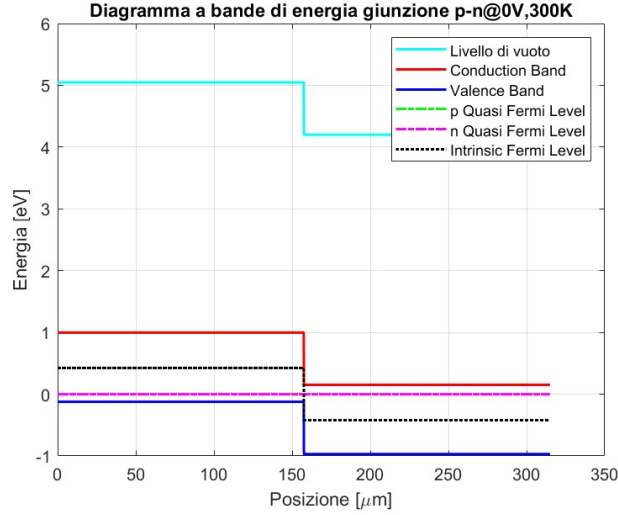


Figura 2: Diagramma a bande di energia

Tuttavia, per meglio apprezzare l'andamento delle bande di equilibrio nella zona di giunzione, è opportuno ingrandire il grafico 2 nell'intorno della giunzione, ottenendo quanto segue:

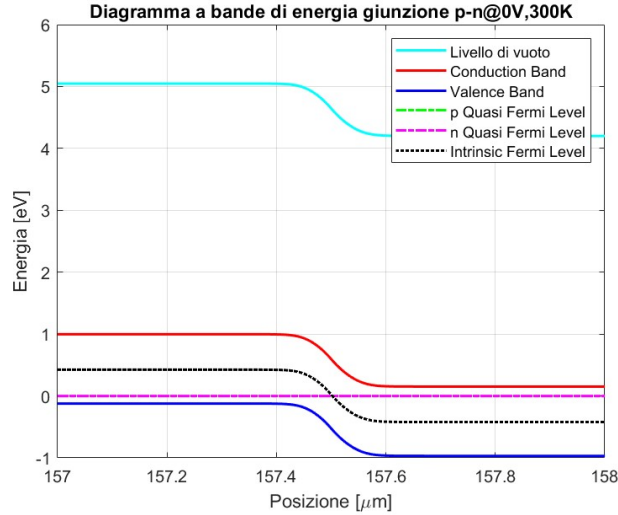


Figura 3: Diagramma a bande di energia@300k zoom in

Come ci si aspetta, sufficientemente lontano dalla giunzione, le regioni risultano all'equilibrio e, di conseguenza, i livelli energetici saranno costanti. Più interessante è sicuramente l'analisi in prossimità della giunzione. In questo tratto, poiché sappiamo che il livello di Fermi deve rimanere unico, nella regione *p* E_F deve aumentare e, necessariamente, nella regione *n* deve avvenire il processo opposto. Come conseguenza, la regione *p* deve aumentare la concentrazione dei suoi elettroni mentre la regione *n* deve diminuirla. In questo tratto, gli elettroni della regione *n* si

ricombinano con le lacune della regione p nella cosiddetta regione di svuotamento. Per quanto riguarda il calcolo del lavoro di estrazione, tramite *Padre* si ottiene per le due regioni:

- $q\Phi_{SP} = 5.04 \text{ eV}$
- $q\Phi_{SN} = 4.20 \text{ eV}$

Utilizzando le formule analitiche, si ricava :

- $q\Phi_{SP} = q\chi + \frac{1}{2}E_g + k_b T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 5.04 \text{ eV}$
- $q\Phi_{SN} = q\chi + \frac{1}{2}E_g - k_b T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = 4.20 \text{ eV}$

Con $n_i = \sqrt{N_A N_D \cdot \exp\left(\frac{E_g}{k_b T}\right)}$.

Infine si calcola il potenziale di *built-in*. Mettiamo dunque a confronto i dati ricavati tramite *Padre* e quelli analitici. Tramite il simulatore otteniamo $V_{bi} = 0.85 \text{ eV}$, mentre tramite formule si ottiene:

$$V_{bi} = \frac{k_b T}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.85 \text{ eV} \quad (1)$$

Le formule analitiche sono concordi con quanto ottenuto tramite le simulazioni.

2.2 A.2

La seconda richiesta è quella di rappresentare graficamente la concentrazione netta di carica in condizioni di equilibrio. Bisogna inoltre rappresentare tale valore ad entrambi i lati della regione di svuotamento e calcolarlo analiticamente. Ciò che otteniamo è rappresentato nel grafico 4.

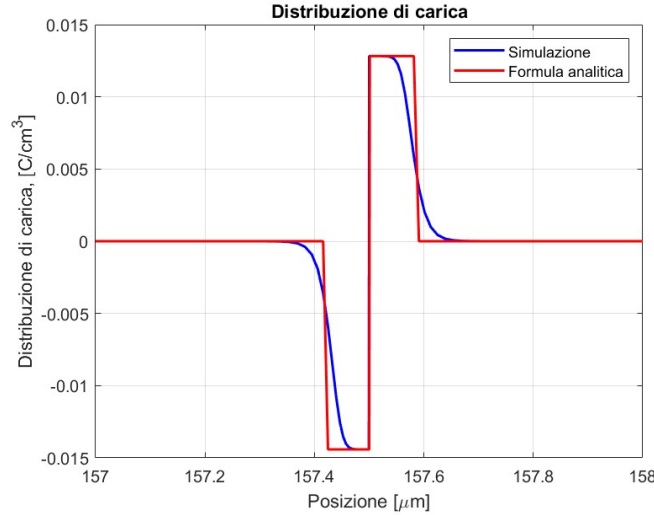


Figura 4: Distribuzione di carica

In figura 4 non solo è rappresentato l'andamento della distribuzione di carica ottenuto tramite *Padre*, ma anche quello ottenuto tramite le formule analitiche.

Possiamo suddividere il grafico 4 in 3 sotto-grafici in funzione della posizione. Otteniamo così due regioni sufficientemente vicini alla giunzione tali da apprezzare l'effetto prodotto dai drogaggi e una zona lontana in cui gli effetti della giunzione sono nulli.

$$\rho(x) = \begin{cases} -qN_A & -x_p + \bar{x} < x < \bar{x} \\ 0 & x < x_p + \bar{x} \text{ o } x > x_n + \bar{x} \\ qN_D & \bar{x} < x < \bar{x} + x_n \end{cases} \quad (2)$$

Per definizione, x_n e x_p sono gli estremi della regione svuotata. Per trovare tali valori, innanzitutto si calcola la larghezza della regione svuotata.

$$x_{d0} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_{eq}}} V_{bi} = 160.7 \text{ nm} \quad (3)$$

Ottenuta la larghezza complessiva della zona presa in esame, ci si avvale delle seguenti formule per trovare il limite sinistro e il limite destro. Si ottiene:

$$x_{n0} = x_{d0} \frac{N_A}{N_A + N_D} = 85.07 \text{ nm} \quad x_{p0} = x_{d0} \frac{N_D}{N_A + N_D} = 75.62 \text{ nm} \quad (4)$$

2.3 A.3

Il terzo punto chiede di rappresentare graficamente il campo elettrico in condizione di equilibrio e commentare i risultati. Il grafico del campo elettrico è mostrato in figura 5.

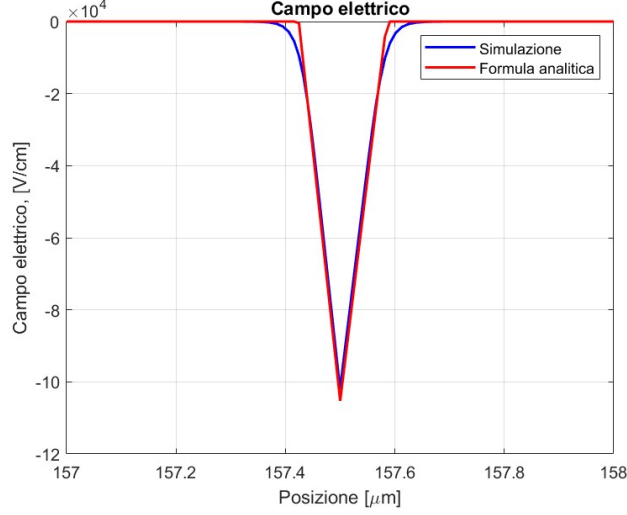


Figura 5: Campo elettrico

Il campione di silicio presenta un campo elettrico interno in quanto siamo in presenza di una giunzione P-N e quindi di una distribuzione non omogenea di carica all'interno del materiale. Il flusso di elettroni, e conseguentemente di corrente, lungo la giunzione determina la presenza di un campo elettrico. Più ci allontaniamo dalla giunzione e più torniamo in condizione di equilibrio, ovvero con campo elettrico nullo. In figura 5 è riportato il confronto del campo elettrico ottenuto tramite la simulazione di *Padre* e quelle ottenuto tramite formule analitiche. Queste ultime sono state ottenute sfruttando la legge di Gauss:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (5)$$

Consideriamo ora i due intervalli trovati e analizzati precedentemente. Se integriamo la legge di Gauss sulle due regioni si ottiene la formulazione del campo elettrico.

$$\varepsilon_p(x) = \int_{-x_p + \bar{x}}^x -qN_D dx = -\frac{qN_D}{\epsilon}(x + x_p - \bar{x}) \quad (6)$$

$$\varepsilon_p(x) = \int_x^{x_n + \bar{x}} qN_A dx \rightarrow \varepsilon_p(x) = \frac{qN_A}{\epsilon}(x - x_n - \bar{x}) \quad (7)$$

L'ottima approssimazione dei dati analitici confrontati con la simulazione ottenuta da *Padre* conferma la validità delle equazioni utilizzate.

2.4 A.4

L'ultima richiesta è quella più articolata. Si richiede innanzitutto di applicare un potenziale $V_a = +n/s = 0.9V$. Tuttavia, in questo caso, per evitare problemi con le simulazioni, nel caso in cui $V_a > V_{bi}$ si richiede di sostituire V_a con $V_a = V_{bi} - 0.2 = 0.7V$.

2.4.1 A.4.1

Il primo punto richiede di rappresentare graficamente il diagramma a bande ottenuto da *Padre* e riportare il valore della caduta di potenziale V_j sulla giunzione. Il grafico del diagramma a bande è rappresentato in figura 6.

Tuttavia, come in precedenza, per meglio apprezzare ciò che avviene intorno alla giunzione, si riporta un grafico ingrandito.

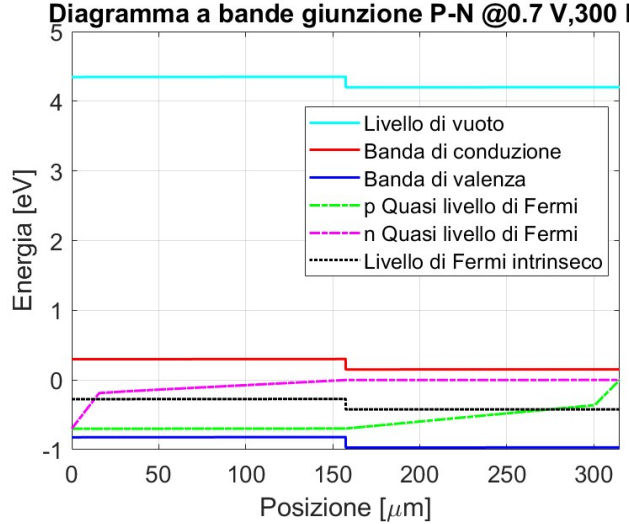


Figura 6: Diagramma a bande

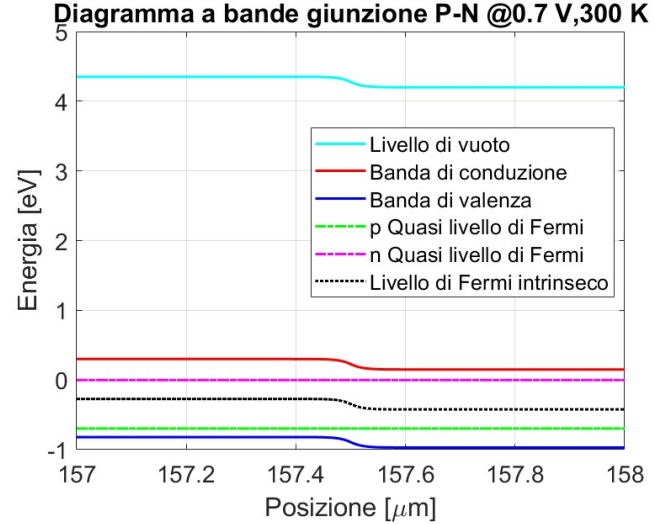


Figura 7: Diagramma a bande ingrandito

Analogamente a quanto visto nel grafico 2, sufficientemente lontani dal punto di giunzione si verifica una condizione di equilibrio. Invece, avvicinandosi al punto di giunzione, sappiamo che il livello di Fermi deve rimanere unico. Ciò accade se e solamente se il livello di Fermi nella regione p aumenta mentre quello nella regione n diminuisce. Grazie a questo procedimento, si ottiene una regione in cui gli elettroni, muovendosi dalla regione n verso la regione p, si ricombinano con le lacune. Tale regione prende il nome di regione di svuotamento. La descrizione di questo comportamento è alla base dell'equazione di Shockley fuori equilibrio. Il potenziale di contatto V_j , se riteniamo le resistenze passive trascurabili, è pari a $V_j = V_{bi} - V_a \simeq 0,15V$. Altre conseguenze dell'aggiunta di un potenziale sono una diminuzione del livello delle altezze delle bande e una restrizione della regione svuotata in quanto ci troviamo in condizioni di polarizzazione diretta.

2.4.2 A.4.2

La seconda richiesta è quella di rappresentare la distribuzione netta di carica del campione sottoposto a potenziale V_a e di sottolineare le differenze rispetto alla condizione di equilibrio. La distribuzione di carica è raffigurata nel grafico 8.

Come si può immaginare, anche la distribuzione di carica ha risentito del potenziale esterno e, come si evince dal grafico 8, l'ampiezza della regione svuotata è diminuita.

2.4.3 A.4.3

Il terzo punto richiede di riportare il grafico del campo elettrico e di spiegare le differenze rispetto alla condizione di equilibrio. Il campo elettrico è rappresentato in figura 9.

Anche il campo elettrico risente dell'applicazione di un potenziale e, poiché il potenziale sulla giunzione è minore rispetto a quanto si aveva in condizione di equilibrio, il modulo del campo elettrico con questo potenziale applicato risulta essere inferiore a quello ottenuto in condizione di equilibrio.

2.4.4 A.4.4

L'ultima richiesta riguarda invece le correnti. Si richiede di rappresentare graficamente la densità di corrente e di commentare tale risultato. Il grafico della densità di corrente è apprezzabile in figura 10.

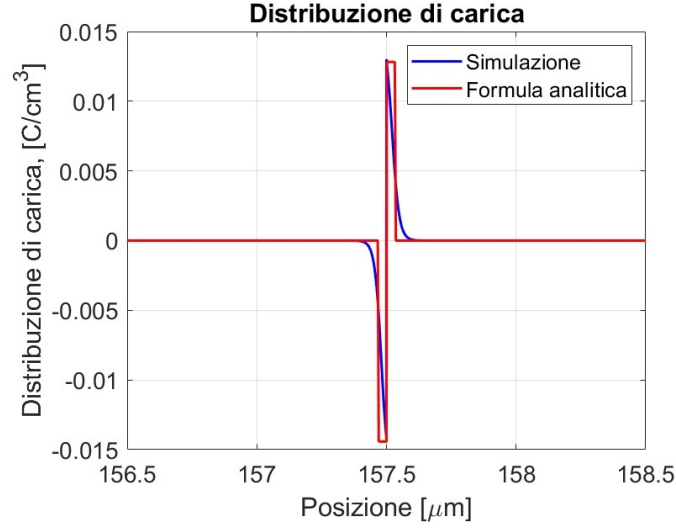


Figura 8: Distribuzione di carica bias

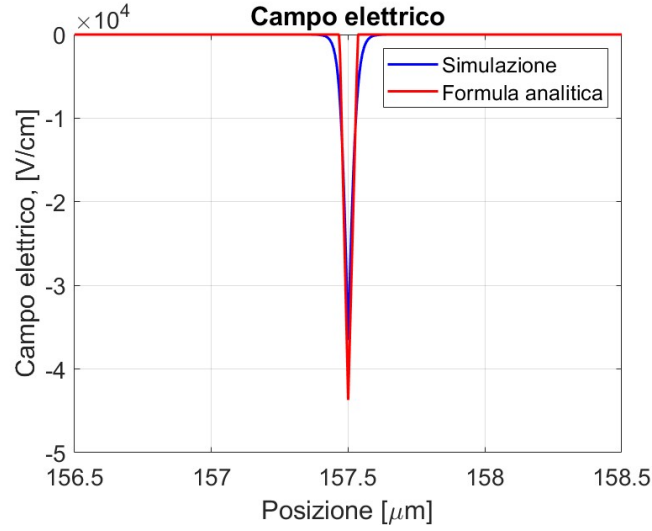


Figura 9: Campo elettrico bias

Si chiede inoltre di riportare la densità della corrente di diffusione di elettroni $J_{n,diff}(x_{left})$, lacune $J_{p,diff}(x_{right})$ e quella totale della giunzione e di confrontarle con i risultati analitici. Le grandezze appena citate sono rappresentate nel grafico 11.

Come si può apprezzare dal grafico 11, la corrente totale può essere scomposta in una corrente di trascinamento, dove lacune ed elettroni sono maggioritari e in una corrente di , dove sono minoritari. Tramite le formule della giunzione, e usando l'approssimazione di lato lungo, possiamo valutare le due componenti della corrente di diffusione. Si avrà:

$$j_{n,diff}(\bar{x} - x_p) = q \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} \left(\exp \frac{V_a}{V_t} - 1 \right) \simeq 4.640002 \cdot 10^{-1} A/cm^2 \quad (8)$$

$$j_{p,diff}(\bar{x} + x_n) = q \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \left(\exp \frac{V_a}{V_t} - 1 \right) \simeq 2.809302 \cdot 10^{-1} A/cm^2 \quad (9)$$

I dati che si ottengono tramite la simulazione di *Padre* sono:

$$J_{n,diff} = 3.981343 \cdot 10^{-1} A/cm^2 \quad J_{p,diff} = 2.381648 \cdot 10^{-1} A/cm^2$$

Come possiamo notare dal confronto dei dati teorici con quelli simulati è che le componenti della corrente presentano valori diversi. La giustificazione di tale comportamento è dovuto al diverso valore di drogaggio applicato per le due regioni n e p . Dunque ora siamo in grado di calcolare la densità di corrente totale sommando le sue componenti. La corrente totale sarà dunque data dalla

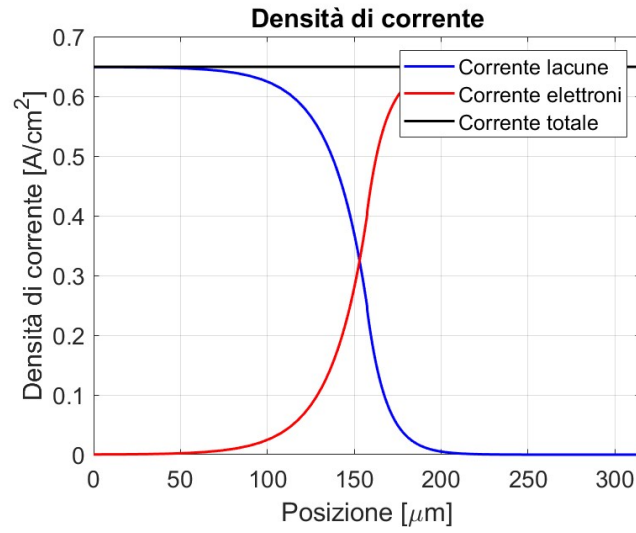


Figura 10: Densità di corrente bias

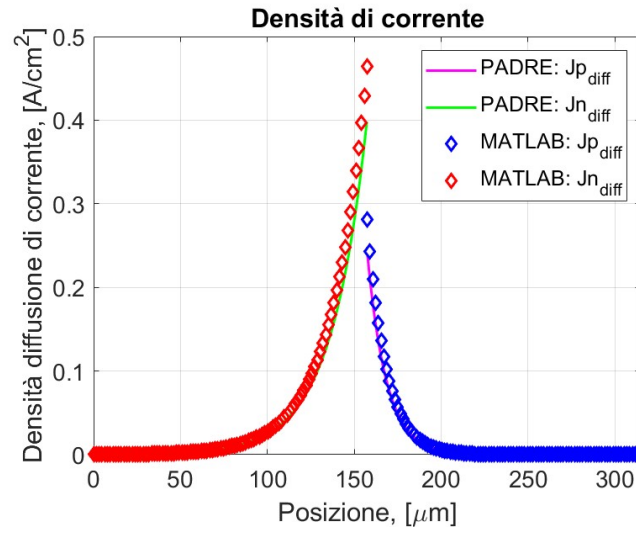


Figura 11: Densità di corrente

somma di $J_{n,diff}$ e $J_{p,diff}$. Otteniamo:

$$J_{tot,simulazione} = 7.449303 \cdot 10^{-1} A/cm^2 \quad J_{tot,analitica} = 6.492567 \cdot 10^{-1} A/cm^2$$

Le varie approssimazioni hanno portato a una leggera discrepanza tra i dati analitici e quelli simulati che è, tuttavia, trascurabile dimostrando così la correttezza delle formule usate.

3 Codici

3.1 Padre

3.1.1 A.1-A.2_{A.3}

MeshSpecifications

meshrectnx = 200*ny* = 3*outf* = *meshx.mn* = 1*l* = 0*r* = 1*x.mn* = 100*l* = 157.5*r* = 0.9*x.mn* = 200*l* = 315*r* = 1.1*y.mn* = 1*l* = 0*r* = 1*y.mn* = 3*l* = 88*r* = 1

RegionsSpecifications

regionnum = 1*ix.l* = 1*ix.h* = 100*iy.l* = 1*iy.h* = 3*siliconregionnum* = 2*ix.l* = 100*ix.h* = 200*iy.l* = 1*iy.h* = 3*siliconelecnum* = 1*ix.l* = 1*ix.h* = 1*iy.l* = 1*iy.h* = 3*elecnum* = 2*ix.l* = 200*ix.h* = 200*iy.l* = 1*iy.h* = 3

DopingSpecifications

dopreg = 1*p.typeconc* = 9*e* + 16*x.l* = 0*x.r* = 157.5*y.top* = 0*y.bot* = 88*uniformdopreg* = 2*n.typeconc* = 8*e* + 16*x.l* = 157.5*x.r* = 315*y.top* = 0*y.bot* = 88*uniform*

MaterialSpecifications

materialname = *silicon*+EG300 = 1.12*AFFINITY* = 4.05*PERMITTIVITY* = 11.7*NC300* = 2.8E19*NV300* = 1.04E19

Specifymodelsmodelsttemperature = 300*systemelectronsholesnewton*

Solveforinitialconditionssolveinitplot.1dband.vala.x = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *vbandplot.1dband.cona.x* = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *cbandplot.1dqfpa.x* = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *qfpplot.1dqfna.x* = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *qfnplot.1delea.x* = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *eleplot.1dholea.x* = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *holeplot.1dnet.cha.x* = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *netchplot.1de.fielda.x* = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *efieldplot.1dpota.x* = 0*b.x* = 315*a.y* = 44*b.y* = 44*asciioutf* = *potend*

3.1.2 A.4

title *pn Junction Pos Bias Symmetric*

\$ *Mesh Specifications*

mesh *rect nx=200 ny=3 outf=mesh*

x.m *n=1 l=0 r=1*

x.m *n=100 l=157.5 r=0.9*

x.m *n=200 l=315 r=1.1*

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=100 iy.l=1 iy.h=3 silicon*

region *num=2 ix.l=100 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 x.l=0 x.r=157.5 y.top=0 y.bot=88 uniform*

dop *reg=2 n.type conc=8e+16 x.l=157.5 x.r=315 y.top=0 y.bot=88 uniform*

\$ *Material Specifications*

material *name=silicon*

+ *EG300=1.12 AFFINITY=4.05 PERMITTIVITY=11.7 NC300=2.8E19 NV300=1.04E19*

+ *MUN=801 MUP=232 taun0=2e-7 taup0=2e-7*

\$ *Specify models*

models *srh temperature=300*

system *electrons holes newton*

solve *init*

solve *prev v1=0.7 elect=1*

```

plot.1d band.val a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=vband
plot.1d band.con a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=cband
plot.1d qfp a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=qfp
plot.1d qfn a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=qfn
plot.1d ele a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=ele
plot.1d hole a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=hole
plot.1d net.ch a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=netch
plot.1d e.field a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=efield
plot.1d pot a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=pot
plot.1d j.electr a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=jelectr
plot.1d j.hole a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=jhole
plot.1d j.total a.x=0 b.x=315 a.y=44 b.y=44 ascii outf=jtot
end

```

3.2 MATLAB

3.2.1 A.1-A.2-A.3

```

close all,
clear all,
clc

```

```
% Script for importing results
```

```

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

```

```

filename = 'ElectrostaticPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_pot = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
pot = A.data(:,2);

```

```

filename = 'ElectricField.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_ElecField = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
ElecField = A.data(:,2);

```

```

filename = 'NetChargeConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_SpaceCharge = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
SpaceCharge = A.data(:,2);

```

```

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 = 'ValenceBandPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_VB = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
VB = A.data(:,2);

```

```

filename = 'pQuasiFermiLevel.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_qfp = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
qfp = A.data(:,2);

```

```

filename = 'nQuasiFermiLevel.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_qfn = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values

```

```

qfn = A.data(:,2);

filename = 'ElectronConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Elec = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
Elec = A.data(:,2);

filename = 'HoleChargeConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Hole = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
Hole = A.data(:,2);

% Plot
%% Electron and hole concentrations
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')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Carriers concentration, [cm^{-3}]')

pp0_Simulation = Hole(1); % cm^{-3}
np0_Simulation = Elec(1); % cm^{-3}
nn0_Simulation = Elec(end); % cm^{-3}
pn0_Simulation = Hole(end); % cm^{-3}

%% Band Diagram
Affinity = 4.05; % eV
Eg = 1.12; % eV
EO = CB + Affinity; % eV

figure
plot(pos_CB,EO,'c',pos_CB,CB,'r',pos_VB,VB,'b',pos_qfp,-qfp,'g-.',pos_qfn,-qfn,'m-.',pos_pot,-pot,
grid on
title('Diagramma a bande di energia giunzione p-n@0V,300K')
legend('Livello di vuoto','Conduction Band','Valence Band','p Quasi Fermi Level','n Quasi Fermi Level')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Energia [eV]')

Ef_m_Ev_Simulation = qfp(1)-VB(1); % eV
qPhiS_p_Simulation = Affinity + Eg - Ef_m_Ev_Simulation; % eV

Ec_m_Ef_Simulation = CB(end)-qfn(end); % eV
qPhiS_n_Simulation = Affinity + Ec_m_Ef_Simulation; % eV
Vbi_Simulation = qPhiS_p_Simulation - qPhiS_n_Simulation; % V

%% Space Charge Concentration
figure,plot(pos_SpaceCharge,SpaceCharge,'b','LineWidth',1.5)
grid on
title('Space Charge Concentration')
xlabel('Position [\mum]')
ylabel('Space Charge Concentration, [C/cm^{3}]')

%% Electric Field
figure,plot(pos_ElecField,ElecField,'b','LineWidth',1.5)
grid on
title('Campo elettrico')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Campo elettrico, [V/cm]')

```

Per il confronto con i dati analitici si usa:

```

% Define constants
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Nc = 2.8e19; % cm^-3
Nv = 1.04e19; % cm^-3
Affinity = 4.05; % eV
Eg = 1.12; % eV
kB = 1.380649e-23; % Boltzmann constant, J./K
qel = 1.602176634e-19; % Elementary charge, C
c_light = 2.99792458e+10; % light velocity, cm/s
mu0 = 4*pi*1.0e-9; % H/cm
eps0 = 1/(mu0*c_light^2); % F/cm
epsR = 11.7; % silicon relative permittivity
epsSi = eps0 * epsR; % silicon permittivity, F/cm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Data
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Na = 9e16; % cm^-3
Nd = 8e16; % cm^-3
T = 300; % Temperature, K
L = 315; % pn junction length, um

Vt = kB*T/qel; % V
Nc = Nc*(T/300)^(3/2); % cm^-3
Nv = Nv*(T/300)^(3/2); % cm^-3
nint = sqrt(Nc*Nv)*exp(-Eg/2/Vt); % cm^-3

%% Electron and Hole Concentrations

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% P-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
pp0_Analytic = Na/2*(1+sqrt(1+(2*nint/Na)^2)); % cm^-3
np0_Analytic = nint^2/pp0_Analytic; % cm^-3

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% N-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nn0_Analytic = Nd/2*(1+sqrt(1+(2*nint/Nd)^2)); % cm^-3
pn0_Analytic = nint^2/nn0_Analytic; % cm^-3

fprintf('SIMULATION:  = %d cm^-3, np0 = %d cm^-3 \n',pp0_Simulation,np0_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: pp0 = %d cm^-3, np0 = %d cm^-3 \n',pp0_Analytic,np0_Analytic);
fprintf('\n')
fprintf('SIMULATION: pn0 = %d cm^-3, nn0 = %d cm^-3 \n',pn0_Simulation,nn0_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: pn0 = %d cm^-3, nn0 = %d cm^-3 \n',pn0_Analytic,nn0_Analytic);
fprintf('\n')

Elec_Analytic = @(x) (np0_Analytic).*(x<L/2) + (nn0_Analytic).*(L/2<x);
Hole_Analytic = @(x) (pp0_Analytic).*(x<L/2) + (pn0_Analytic).*(L/2<x);

figure
semilogy(pos_Elec,Elec,'b',pos_Elec,Elec_Analytic(pos_Elec),'r','LineWidth',1.5)
grid on
legend('Simulation','Analytical Formula')
title('Electron concentration')
xlabel('Position [\umum]')
ylabel('Electron concentration, [cm^{-3}]')

```

```

figure
semilogy(pos_Hole,Hole,'b',pos_Hole,Hole_Analytic(pos_Hole),'r','LineWidth',1.5)
grid on
legend('Simulation','Analytical Formula')
title('Hole concentration')
xlabel('Position [\mu m]')
ylabel('Hole concentration, [cm^{-3}]')

%% Band Diagram
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% P-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ef_m_Ev_Analytic = Vt*log(Nv/pp0_Analytic); % eV
qPhiS_p_Analytic = Affinity + Eg - Ef_m_Ev_Analytic; % V

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% N-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ec_m_Ef_Analytic = Vt*log(Nc/nn0_Analytic); % eV
qPhiS_n_Analytic = Affinity + Ec_m_Ef_Analytic; % eV

Vbi_Analytic = qPhiS_p_Analytic - qPhiS_n_Analytic; % V

fprintf('SIMULATION: Ef-Ev = %d eV, qphiS_p = %d \n',Ef_m_Ev_Simulation,qPhiS_p_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: Ef-Ev = %d eV, qphiS_p = %d eV \n',Ef_m_Ev_Analytic,qPhiS_p_Analytic);
fprintf('\n')

fprintf('SIMULATION: Ec-Ef = %d eV, qphiS_n = %d \n',Ec_m_Ef_Simulation,qPhiS_n_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: Ec-Ef = %d eV, qphiS_n = %d eV \n',Ec_m_Ef_Analytic,qPhiS_n_Analytic);
fprintf('\n')

fprintf('SIMULATION: Vbi = %d V \n',Vbi_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: Vbi = %d V \n',Vbi_Analytic);
fprintf('\n')

%% Space Charge Concentration

Neq = (Na*Nd)/(Na+Nd); % cm^{-3}
xd0 = sqrt((2*epsSi*Vbi_Analytic)/(qel*Neq)); % cm
xp0 = Nd/(Na+Nd)*xd0*1e4; % um
xn0 = Na/(Na+Nd)*xd0*1e4; % um

Charge_p = -qel*Na; % net charge density on the p-side, C/cm^3
Charge_n = qel*Nd; % net charge density on the n-side, C/cm^3
x_left = L/2 - xp0; % edge of the depleted region on the p-side, um
x_right = L/2 + xn0; % edge of the depleted region on the n-side, um

SpaceCharge_Analytic = @(x) (Charge_p).*((x_left<x)&(x<L/2)) + (Charge_n).*((L/2<x)&(x<x_right));

fprintf('ANALYTICAL FORMULA: xp0 = %d um, xn0 = %d um \n',xp0,xn0);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: x_left = %d um, x_right = %d um \n',x_left,x_right);

fprintf('\n')

figure,plot(pos_SpaceCharge,SpaceCharge,'b','LineWidth',1.5)
grid on
hold on
plot(pos_SpaceCharge,SpaceCharge_Analytic(pos_SpaceCharge),'r','LineWidth',1.5)
legend('Simulazione','Formula analitica')
title('Distribuzione di carica')
xlabel('Posizione [\mu m]')

```

```

ylabel('Distribuzione di carica, [C/cm3])')

%% Electric Field

ElecField_Analytic = @(x) (Charge_p/epsSi*(x-x_left)*1e-4).*((x_left<x)&(x<L/2)) + (Charge_n/epsSi

figure,plot(pos_ElecField,ElecField,'b','LineWidth',1.5)
hold on
plot(pos_ElecField,ElecField_Analytic(pos_ElecField),'r','LineWidth',1.5)
grid on
legend('Simulazione','Formula analitica')
title('Campo elettrico')
xlabel('Posizione [\mu m]')
ylabel('Campo elettrico, [V/cm]')

```

3.2.2 A.4

```

% close all,
clear all,
clc

% Script for importing results

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

filename = 'ElectrostaticPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_pot = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
pot = A.data(:,2);

filename = 'ElectricField.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_ElecField = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
ElecField = A.data(:,2);

filename = 'NetChargeConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_SpaceCharge = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
SpaceCharge = A.data(:,2);

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 = 'ValenceBandPotential.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_VB = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
VB = A.data(:,2);

filename = 'pQuasiFermiLevel.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_qfp = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
qfp = A.data(:,2);

filename = 'nQuasiFermiLevel.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_qfn = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
qfn = A.data(:,2);

```

```

filename = 'ElectronConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Elec = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
Elec = A.data(:,2);

filename = 'HoleChargeConcentration.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_Hole = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
Hole = A.data(:,2);

filename = 'ElectronCurrent.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_ElecCurrent = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
ElecCurrent = A.data(:,2);

filename = 'HoleCurrent.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_HoleCurrent = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
HoleCurrent = A.data(:,2);

filename = 'TotalCurrent.txt';
A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
pos_TotalCurrent = A.data(:,1); % Save in a separate vector the abscissa values
TotalCurrent = A.data(:,2);

% Plot
%% Band Diagram
Affinity = 4.05; % eV
Eg = 1.12; % eV
EO = CB + Affinity; % eV

figure
plot(pos_CB,EO,'c',pos_CB,CB,'r',pos_VB,VB,'b',pos_qfp,-qfp,'g-.',pos_qfn,-qfn,'m-.',pos_pot,-pot,
grid on
title('Diagramma a bande giunzione P-N @0.7 V,300 K')
legend('Livello di vuoto','Banda di conduzione','Banda di valenza','p Quasi livello di Fermi','n Quasi livello di Fermi')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Energia [eV]')
set(gca,'FontSize', 14)

Ef_m_Ev_Simulation = abs(qfp(1)+VB(1)); % eV
qPhiS_p_Simulation = Affinity + Eg - Ef_m_Ev_Simulation; % eV

Ec_m_Ef_Simulation = abs(CB(end)-qfn(end)); % eV
qPhiS_n_Simulation = Affinity + Ec_m_Ef_Simulation; % eV
Vbi_Simulation = qPhiS_p_Simulation - qPhiS_n_Simulation; % V
Vj_Simulation = CB(1) - CB(end); % V

%% Electron and hole concentrations
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')
xlabel('Position, [\mum]')
ylabel('Carriers concentration, [cm-3]')
set(gca,'FontSize', 14)

pp_Simulation = Hole(1); % cm-3
nn_Simulation = Elec(end); % cm-3

pos_left = 64;

```



```

pos_right = 131;
x_left_Simulation = pos_Hole(pos_left); % um
x_right_Simulation = pos_Hole(pos_right); % um
np_xleft_Simulation = Elec(pos_left); % cm^-3
pn_xright_Simulation = Hole(pos_right); % cm^-3

%% Space Charge Concentration
figure,plot(pos_SpaceCharge,SpaceCharge,'b','LineWidth',1.5)
grid on
title('Space Charge Concentration')
xlabel('Position, [\mum]')
ylabel('Space Charge Concentration, [C/cm^{3}]')
set(gca,'FontSize', 14)
xlim([149.5 150.5])

%% Electric Field
figure,plot(pos_ElecField,ElecField,'b','LineWidth',1.5)
grid on
title('Electric Field')
xlabel('Position, [\mum]')
ylabel('Electric Field, [V/cm]')
set(gca,'FontSize', 14)
xlim([149.5 150.5])

Emax_Simulation = ElecField(100); % V/cm

%% Electrons and Holes Current
figure,plot(pos_HoleCurrent,HoleCurrent,'b',pos_ElecCurrent,ElecCurrent,'r',pos_TotalCurrent,TotalCurrent,'g','LineWidth',1.5)
grid on
legend('Corrente lacune','Corrente elettronici','Corrente totale')
title('Densità di corrente')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Densità di corrente [A/cm^{2}]')
set(gca,'FontSize', 14)

ElecCurrent_diff = ElecCurrent; % A/cm^2
HoleCurrent_diff = HoleCurrent; % A/cm^2
Jn_xleft_Simulation = ElecCurrent(pos_left); % A/cm^2
Jp_xright_Simulation = HoleCurrent(pos_right); % A/cm^2
Jtot_Simulation = TotalCurrent(1); % A/cm^2, segno meno perché PADRE da solo il valore assoluto

Per il confronto con i dati analitici:

% Define constants
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Nc = 2.8e19; % cm^-3
Nv = 1.04e19; % cm^-3
Affinity = 4.05; % eV
Eg = 1.12; % eV
kB = 1.380649e-23; % Boltzmann constant, J./K
qel = 1.602176634e-19; % Elementary charge, C
c_light = 2.99792458e+10; % light velocity, cm/s
mu0 = 4*pi*1.0e-9; % H/cm
eps0 = 1/(mu0*c_light^2); % F/cm
epsR = 11.7; % silicon relative permittivity
epsSi = eps0 * epsR; % silicon permittivity, F/cm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Data
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
VA = 0.7; % Applied voltage, V

```

```

Na = 9e16; % cm^-3
Nd = 8e16; % cm^-3
T = 300; % Temperature, K
L = 315; % pn junction length, um
taun0 = 2e-7; % intrinsic minority carrier lifetimes, s
taup0 = 2e-7; % intrinsic minority carrier lifetimes, s
mu_n = 801; % cm^2/V/s
mu_p = 232; % cm^2/V/s

Vt = kB*T/qel; % V
Nc = Nc*(T/300)^(3/2); % cm^-3
Nv = Nv*(T/300)^(3/2); % cm^-3
nint = sqrt(Nc*Nv)*exp(-Eg/2/Vt); % cm^-3

%% Electron and Hole Concentrations

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% P-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
pp_Analytic = Na/2*(1+sqrt(1+(2*nint/Na)^2)); % cm^-3
np0_Analytic = nint^2/pp_Analytic; % cm^-3
np_xleft_Analytic = np0_Analytic*(exp(VA/Vt)); % cm^-3

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% N-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nn_Analytic = Nd/2*(1+sqrt(1+(2*nint/Nd)^2)); % cm^-3
pn0_Analytic = nint^2/nn_Analytic; % cm^-3
pn_xright_Analytic = pn0_Analytic*(exp(VA/Vt)); % cm^-3

fprintf('SIMULATION: pp = %d cm^-3, np(xleft) = %d cm^-3 \n',pp_Simulation,np_xleft_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: pp = %d cm^-3, np(xleft) = %d cm^-3 \n',pp_Analytic,np_xleft_Analytic);
fprintf('\n')
fprintf('SIMULATION: pn(xright) = %d cm^-3, nn = %d cm^-3 \n',pn_x_right_Simulation,nn_Analytic);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: pn(xright) = %d cm^-3, nn = %d cm^-3 \n',pn_xright_Analytic,nn_Analytic);
fprintf('\n')

%% Band Diagram
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% P-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ef_m_Ev_Analytic = Vt*log(Nv/pp_Analytic); % eV
qPhiS_p_Analytic = Affinity + Eg - Ef_m_Ev_Analytic; % V

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% N-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ec_m_Ef_Analytic = Vt*log(Nc/nn_Analytic); % eV
qPhiS_n_Analytic = Affinity + Ec_m_Ef_Analytic; % eV

Vbi_Analytic = qPhiS_p_Analytic - qPhiS_n_Analytic; % V
Vj_Analytic = Vbi_Analytic - VA; % V

fprintf('SIMULATION: Ef-Ev = %d eV, qphiS_p = %d \n',Ef_m_Ev_Simulation,qPhiS_p_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: Ef-Ev = %d eV, qphiS_p = %d eV \n',Ef_m_Ev_Analytic,qPhiS_p_Analytic);
fprintf('\n')

fprintf('SIMULATION: Ec-Ef = %d eV, qphiS_n = %d \n',Ec_m_Ef_Simulation,qPhiS_n_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: Ec-Ef = %d eV, qphiS_n = %d eV \n',Ec_m_Ef_Analytic,qPhiS_n_Analytic);
fprintf('\n')

```

```

fprintf('SIMULATION: Vbi = %d V, Vj = %d \n',Vbi_Simulation,Vj_Simulation);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: Vbi = %d V, Vj = %d \n',Vbi_Analytic,Vj_Analytic);
fprintf('\n')

%% Space Charge Concentration

% Depleted regions
Neq = (Na*Nd)/(Na+Nd); % cm^-3
xd = sqrt(2*epsSi/qel/Neq*(Vbi_Analytic-VA)); % cm
xp = Nd/(Na+Nd)*xd*1e4; % um
xn = Na/(Na+Nd)*xd*1e4; % um
x_left_Analytic = L/2 - xp; % edge of the depleted region on the p-side, um
x_right_Analytic = L/2 + xn; % edge of the depleted region on the n-side, um

Charge_p = -qel*Na; % net charge density on the p-side, C/cm^3
Charge_n = qel*Nd; % net charge density on the n-side, C/cm^3

SpaceCharge_Analytic = @(x) (Charge_p).*((x_left_Analytic<x)&(x<L/2)) + (Charge_n).*((L/2<x)&(x<x_
right_Analytic));

fprintf('FORMULA ANALITICA: xp = %d um, xn = %d um \n',xp,xn);
fprintf('FORMULA ANALITICA: x_left = %d um, x_right = %d um \n',x_left_Analytic,x_right_Analytic);
fprintf('\n')

figure,plot(pos_SpaceCharge,SpaceCharge,'b','LineWidth',1.5)
grid on
hold on
plot(pos_SpaceCharge,SpaceCharge_Analytic(pos_SpaceCharge),'r','LineWidth',1.5)
legend('Simulazione','Formula analitica')
title('Distribuzione di carica')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Distribuzione di carica, [C/cm^3]')
xlim([L/2-1 L/2+1])
set(gca,'FontSize', 14)

%% Electric Field

ElecField_Analytic = @(x) (Charge_p/epsSi*(x-x_left_Analytic)*1e-4).*((x_left_Analytic<x)&(x<L/2)) +
(Charge_n/epsSi*(x-x_right_Analytic)*1e-4).*((x>L/2)&(x<x_right_Analytic));

figure,plot(pos_ElecField,ElecField,'b','LineWidth',1.5)
hold on
plot(pos_ElecField,ElecField_Analytic(pos_ElecField),'r','LineWidth',1.5)
grid on
legend('Simulazione','Formula analitica')
title('Campo elettrico')
xlabel('Posizione [\mum]')
ylabel('Campo elettrico, [V/cm]')
xlim([L/2-1 L/2+1])
set(gca,'FontSize', 14)

Emax_Analytic = -2*Vj_Analytic/xd;
fprintf('FORMULA ANALITICA: Emax = %d V/cm \n',Emax_Analytic);
fprintf('SIMULAZIONE: Emax = %d V/cm \n',Emax_Simulation);
fprintf('\n')

%% Depletion Capacitance

Cdep_Analytic = sqrt(qel*epsSi*Neq/2/(Vbi_Analytic-VA)); % F/cm^2
Cdep_Simulation = sqrt(qel*epsSi*Neq/2/(Vbi_Simulation-VA)); % F/cm^2

fprintf('SIMULATION: Cdep = %d F/cm^2 \n',Cdep_Analytic);
fprintf('ANALYTICAL FORMULA: Cdep = %d F/cm^2 \n',Cdep_Simulation);

```

```

fprintf('\n')

%% Total Current Density
Dn_p = mu_n*Vt; % cm^2/s
Dp_n = mu_p*Vt; % cm^2/s
Ln_p = sqrt(Dn_p*taun0); % diffusion length, cm
Lp_n = sqrt(Dp_n*taup0); % diffusion length, cm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% N-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
pn_prime_xright_Analytic = pn0_Analytic*(exp(VA/Vt)-1); % cm^-3
Jp_xright_Analytic = qel*Dp_n/Lp_n*pn_prime_xright_Analytic; % A/cm^2
% Long semiconductor: L/2 >> Lp
x1 = linspace(x_right_Analytic,L,100); % um
Jp_Analytic = Jp_xright_Analytic.*exp(-(x1-x_right_Analytic)/Lp_n*1e-4); % cm^-3

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% P-type region
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
np_prime_xleft_Analytic = np0_Analytic*(exp(VA/Vt)-1); % cm^-3
Jn_xleft_Analytic = qel*Dn_p/Ln_p*np_prime_xleft_Analytic; % A/cm^2
% Long semiconductor: L/2 >> Ln
x2 = linspace(0,x_left_Analytic,100); % um
Jn_Analytic = Jn_xleft_Analytic.*exp((x2-x_left_Analytic)/Ln_p*1e-4); % cm^-3

Jtot_Analytic = Jp_xright_Analytic + Jn_xleft_Analytic; % A/cm^2

fprintf('SIMULAZIONE: Jn_diff = %d A/cm^2 \n',Jn_xleft_Simulation);
fprintf('FORMULA ANALITICA: Jn_diff = %d A/cm^2 \n',Jn_xleft_Analytic);
fprintf('\n')
fprintf('SIMULAZIONE: Jp_diff = %d A/cm^2 \n',Jp_xright_Simulation);
fprintf('FORMULA ANALITICA: Jp_diff = %d A/cm^2 \n',Jp_xright_Analytic);
fprintf('\n')

fprintf('SIMULAZIONE: Jtot = %d A/cm^2 \n',Jtot_Analytic);
fprintf('FORMULA ANALITICA: Jtot = %d A/cm^2 \n',Jtot_Simulation);
fprintf('\n')

figure,plot(pos_HoleCurrent(pos_right:end),HoleCurrent_diff(pos_right:end),'m',pos_ElecCurrent(1:pos_right),'b',x1,Jp_Analytic,'bd',x2,Jn_Analytic,'rd','LineWidth',1.5)
grid on
legend('PADRE: Jp_{diff}','PADRE: Jn_{diff}','MATLAB: Jp_{diff}','MATLAB: Jn_{diff}','NumColumns',2)
title('Densità di corrente')
xlabel('Posizione, [\mum]')
ylabel('Densità diffusione di corrente, [A/cm^2]')
set(gca,'FontSize', 14)

```