

פתרון תרגיל בית 4

זיכרונות עמידים- Nonvolatile memories

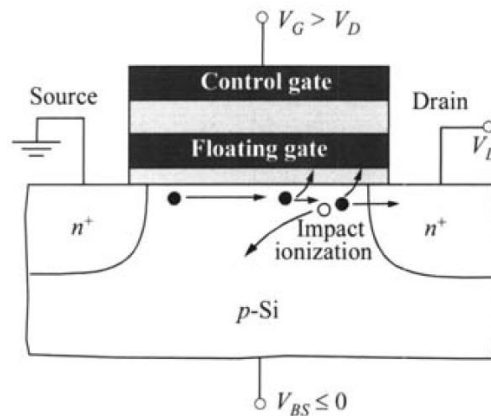
- עבור שאלה מספר 1 לכתוב קוד, אופן ההגשה – יש לצרף את הגרפים לקובץ ההגשה ולצרף את קובץ הקוד

שאלה 1

עבור התקן זיכרון שער צף, (floating-gate nonvolatile memory device) באיור 1.

הזרקת המטען אל השער הצף מבוססת על מינהור ומתוארת על ידי:

$$J = C \varepsilon_1^2 \exp\left(-\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1}\right) \quad (1)$$

כאשר $\varepsilon_0 = 270 \frac{MV}{cm}$ ו- $C = 9 \cdot 10^{-13} \frac{A}{V^2}$. ε_1 הוא השדה החשמלי בשכבת התחמוצת שבין השער הצף והמליימ.

איור 1: צבירת מטען בשער הצף באמצעות נשאי מטען חמים בתעלה ו- impact ionization.

כאשר :נתון עבור שכבת המבודד התחתונה עשויה מתחמוצת סיליקון: SiO_2

$$\varepsilon_1 = 3.8$$

$$d_1 = 3nm$$

כאשר :נתון עבור שכבת המבודד העליונה ZrO_2

$$\varepsilon_2 = 30$$

$$d_2 = 50nm$$

בנוסף נתון כי מתח השער שווה ל-40 V, הניחו כי בזמן 0 אין מטען אגור בשער הצף.

כיתבו סימולציית Matlab (או Python) אשר מחשבת את עקומות השינוי במתח הסף כתלות בזמן הכתיבה לזיכרון.

הדרכה: החישוב יעשה בצעדים קטנים בזמן כאשר בכל צעד נניח כי השדה $\mathcal{E}_1$ קבוע. כך נוכל להניח כי הזרם אל השער קבוע ולסכום את כמות המטען הנאגרת בשער הצף במשך הצעד. בסיום הצעד, נחשב מחדש את השדה בהתקן בהתאם לכמות המטען שנצברה בשער. השדה הזה ישמש לחישוב הזרם בצעד הבא. ולהזכירכם:

המטען האגור הוא פונקציה של הזמן :

$$Q(t) = \int_0^t J dt \quad [\text{coul}/\text{cm}^2]$$

1. ציירו גרפים המתארים את השינוי של הפרמטרים הבאים עם זמן הכתיבה: המטען בשער הצף, השינוי במתח הסף, הזרם והשדה החשמלי $\mathcal{E}_1$. השתמשו בציר אופקי בסקאלה לוגריתמית.

פתרון סעיף 1 :

```
clear all
close all
clc

res=500000;

t=logspace(-10,-5,res+1);
Q=zeros(res+1,1); %The stored charge
J=zeros(res+1,1); %The gate current
E=zeros(res+1,1); %The field in the bottom oxide

d1=3e-7; %bottom oxide thickness
e1=3.8; %bottom oxide dielectric constant

d2=50e-7; %Top oxide thickness
e2=30; %Top oxide dielectric constant

Vg=40;

%tunneling parameters from https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-
1726/1/3/002/pdf
eps0=8.85e-14; %in F/cm
q=1.6e-19;
C=9e-13; %Fitted to give the same current as in Sze
E0=270e6; %in volt/cm taken from table 2 in the reference above

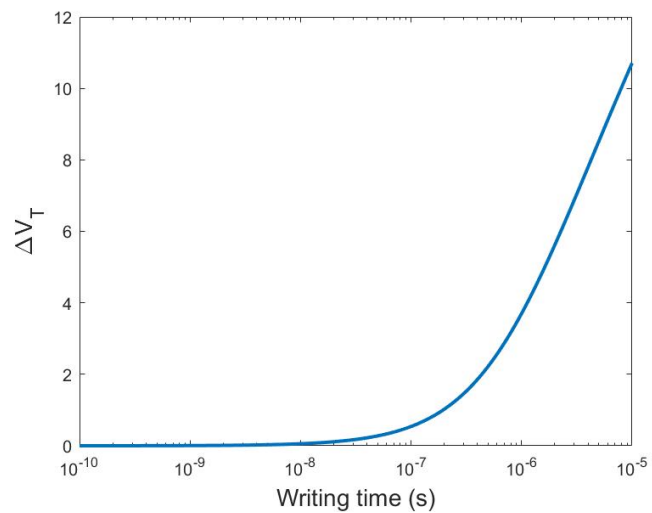
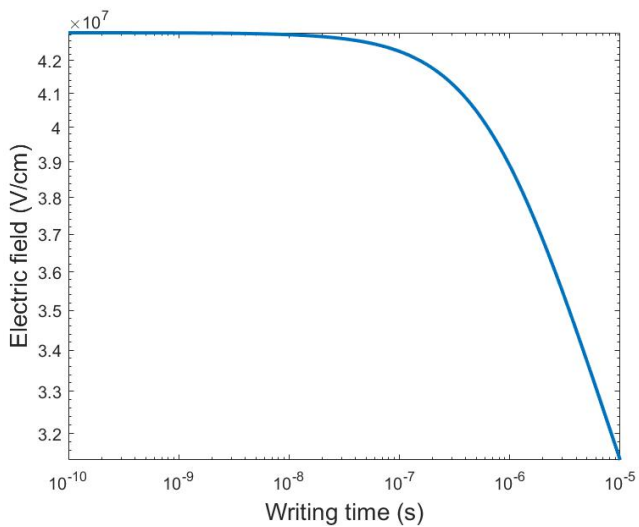
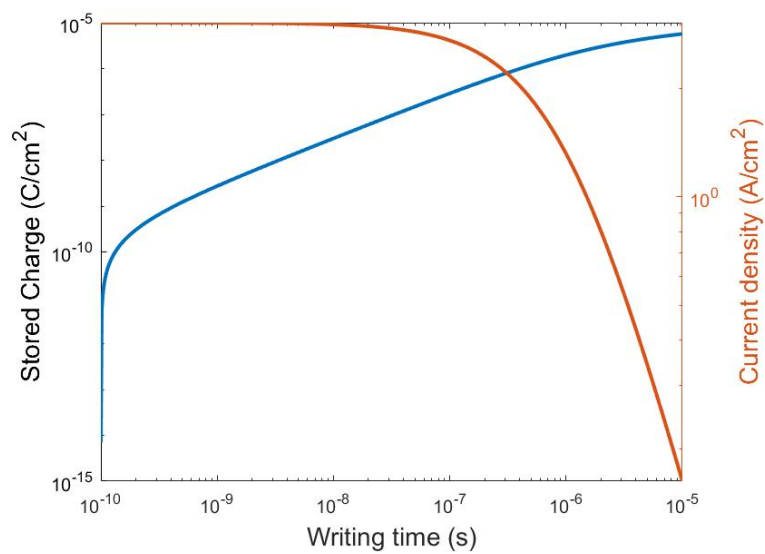
for r=2:res+1
    E(r)=Vg/(d1+d2*(e1/e2))-Q(r-1)/(eps0*e1+eps0*e2*(d1/d2));
    J(r)=C*E(r)^2*exp(-E0/E(r));
    dQ=J(r)*(t(r)-t(r-1));
    Q(r)=Q(r-1)+dQ;
end;
dVT=d2*Q./(e2*eps0);

figure
loglog(t,Q,'LineWidth',2);
ylabel('Stored Charge (C/cm^2)','FontSize',14)
yyaxis right
```

```
loglog(t,J,'LineWidth',2);
ylabel('Current density (A/cm^2)','FontSize',14)
xlabel('Writing time (s)','FontSize',14)
```

```
figure
loglog(t,E,'LineWidth',2);
ylabel('Electric field (V/cm)','FontSize',14)
xlabel('Writing time (s)','FontSize',14)
```

```
figure
semilogx(t,dVT,'LineWidth',2);
ylabel('\Delta V_T','FontSize',14)
xlabel('Writing time (s)','FontSize',14)
```



2. מהו השינוי במתח הסף המתקבל לאחר כתיבה של $1\mu\text{s}$?

פתרון סעיף 2 :

כפי שניתן לראות בגרף השינוי של מתח הסף המתפרש על פני $1\mu\text{s}$, השינוי המתקבל לאחר כתיבת של זמן זה הוא $\sim 4\text{V}$.

3. על מנת לצמצם את צריכת ההספק של הזיכרון, אנו מעוניינים להקטין את מתח שער הבקרה ל- 20V . כיצד יש לשנות את מבנה הטרנזיסטור על מנת לאפשר שינוי מתח סף של לפחות 2V תוך זמן כתיבה של לא יותר מ $1\mu\text{s}$ (הקבועים משוואת זרם המינהור לא ניתנים לשינוי)?

פתרון סעיף 3 :

על מנת להקטין את המתח שער הבקרה נדרש שמתח הסף ישתנה לשם כך עלינו להקטין את שכבות התחמוצות d_1 ו- d_2 , באמצעות הקטנה של השכבות ניתן יהיה ליצור מנהור ולשנות את מתח הסף.

אפשר לראות את זה לפי המשוואה :

$$\Delta V_T = \frac{Q \cdot d_2}{\epsilon_2}$$

ולפי הנוסחאות הבאות :

$$Q(t) = \int_0^t J dt = \int_0^t \left(C \epsilon_1^2 e^{-\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1}} \right) dt$$

$$\epsilon_1 = \frac{V_g}{d_1 + d_2 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} + \frac{Q}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)}$$

נוכל לראות את התלות בין עובי התחמוצות וגם לשנות את החומר הדיאלקטרי כך שאפסילון ישתנה יגרום לשינוי במתח הסף

```
clear all
close all
clc

res=500000;

t=logspace(-9,-3,res+1);
Q=zeros(res+1,1); %The stored charge
J=zeros(res+1,1); %The gate current
E=zeros(res+1,1); %The field in the bottom oxide

d1=3e-7; %bottom oxide thickness
e1=3.8; %bottom oxide dielectric constant

d2=5e-7; %Top oxide thickness
e2=30; %Top oxide dielectric constant

Vg=20;

%tunneling parameters from https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-
1726/1/3/002/pdf
eps0=8.85e-14; %in F/cm
q=1.6e-19;
C=9e-13; %Fitted to give the same current as in Sze
```

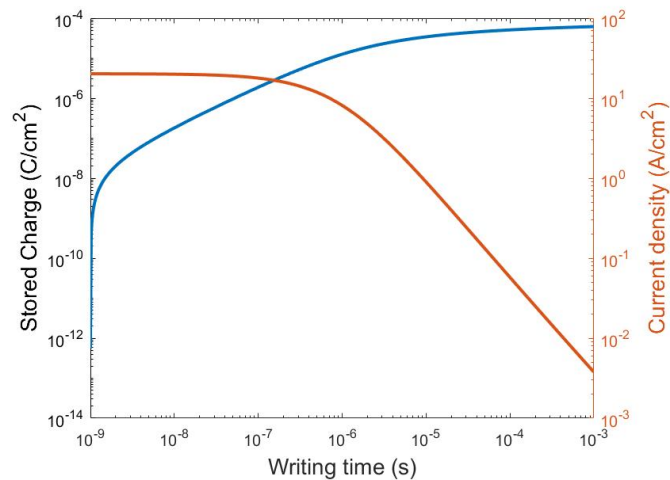
```
E0=270e6; %in volt/cm taken from table 2 in the reference above
```

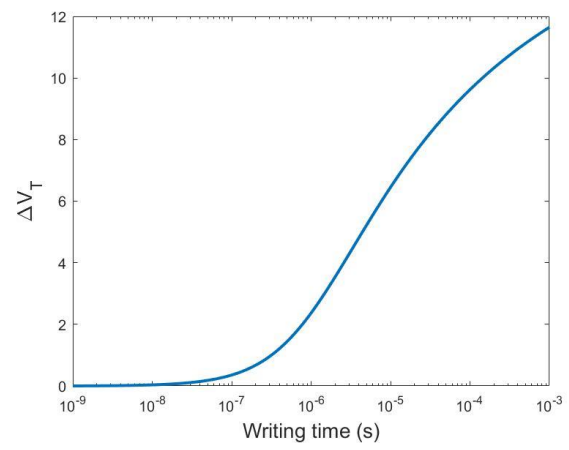
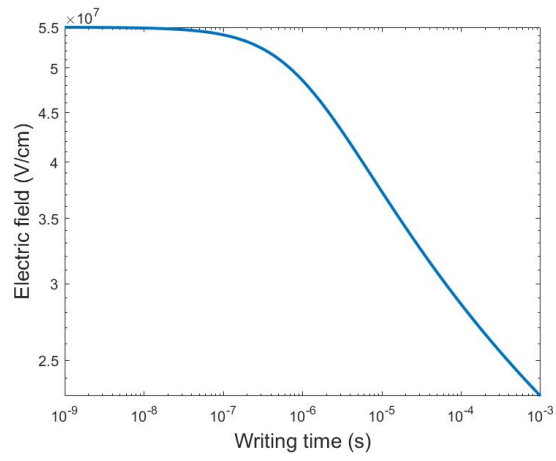
```
for r=2:res+1
    E(r)=Vg/(d1+d2*(e1/e2))-Q(r-1)/(eps0*e1+eps0*e2*(d1/d2));
    J(r)=C*E(r)^2*exp(-E0/E(r));
    dQ=J(r)*(t(r)-t(r-1));
    Q(r)=Q(r-1)+dQ;
end;
dVT=d2*Q./(e2*eps0);
```

```
figure
loglog(t,Q,'LineWidth',2);
ylabel('Stored Charge (C/cm^2)','FontSize',14)
yyaxis right
loglog(t,J,'LineWidth',2);
ylabel('Current density (A/cm^2)','FontSize',14)
xlabel('Writing time (s)','FontSize',14)
```

```
figure
loglog(t,E,'LineWidth',2);
ylabel('Electric field (V/cm)','FontSize',14)
xlabel('Writing time (s)','FontSize',14)
```

```
figure
semilogx(t,dVT,'LineWidth',2);
ylabel('\Delta V_T','FontSize',14)
xlabel('Writing time (s)','FontSize',14)
```





שאלה 2 :

עבור התקן זיכרון שער צף, (floating-gate nonvolatile memory device),

כאשר :

הקיבול הכולל הוא :

$$C_{total} = 3.71 \text{ fF}$$

והקיבול של Control gate to floating gate :

$$C_{CF} = 2.59 \text{ fF}$$

והקיבול של ה drain to floating gate :

$$C_{DF} = 0.49 \text{ fF}$$

והקיבול של ה floating gate to substate :

$$C_{FS} = 0.14 \text{ fF}$$

כמה אלקטרונים דרושים כדי לשנות את מתח הסף V_{th} ב- 0.5 V , כאשר השינוי במספר האלקטרונים

הדרוש נמדד ביחס ל:

1. control gate

פתרון 2:

$$\Delta V_t = \frac{Q_{FG}}{C_{CG}} \quad 1.$$

$$Q_{FG} = C_{CG} \cdot \Delta V_t$$

עבור control gate :

$$n_{FG} = \frac{(C_{FG-CG}) \cdot \Delta V_t}{q} = \frac{2.59 \cdot 10^{-15} \cdot 0.5}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 8093.75 \approx 8094 \text{ electrons}$$