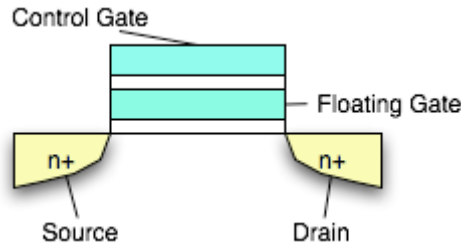


תרגול 8 – זיכרונות עמידים

נושא התרגול: התקני זיכרון שער צף (Floating-gate non-volatile memory device)

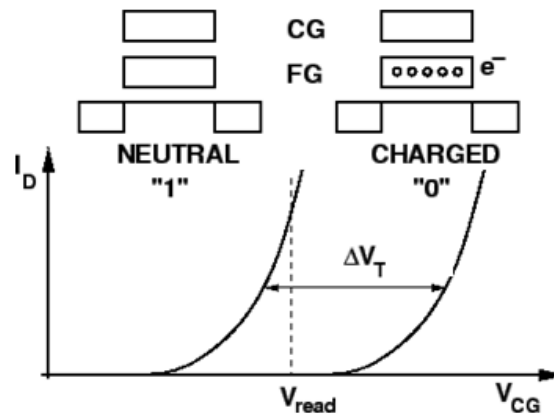
התקן MOS בעל שער צף הינו טרנזיסטור MOS בעל אלקטרודה נוספת ושכבה דיאלקטרית נוספת בין המצע לאלקטרודת השער. בניגוד לאלקטרודת השער, השער הצף אינו מחובר לממתח (ומכאן שמו).



כאשר ההתקן במצב של היפוך, באמצעות מנגנוני אלקטרונים חמים או מנהור, נ"מ יכולים לחדור את השכבה הדיאלקטרית ו"להכלא" בשער הצף. במצב זה מתקבלת הולכה עבור מתח סף שונה, בצורה דומה למצבים בהן מטען כלוא בממשק מל"מ – תחמוצת (Q_f) גורם לשינוי של מתח השער:

$$V_{FB} = (\phi_m - \phi_s) - \frac{Q_f}{C_{ox}} \quad (\text{נוסחה 20 הרצאה 3})$$

בשונה מטרנזיסטור MOS רגיל, במצב הנ"ל, כאשר לא מופעל ממתח, **המטען בשער הצף נשמר**. תופעה זו מאפשרת להתקן לשמש כ"תא" זיכרון, שכן "קריאה" של תא הזיכרון, משמעותה הפעלת ממתח (V_{read}) שערכו נמוך ממתח הסף במצב הטעון וגבוה ממתח הסף במצב הנייטרלי, תגרום/ לא תגרום לזרם בהתקן.



השדה החשמלי שנוצר בתחמוצת שבין המל"מ לשער הצף הינו:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{V_G}{d_1 + d_2 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} + \frac{Q}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \quad (\text{נוסחה 3 הרצאה 9})$$

כאשר האינדקס "1" מתייחס לתחמוצת בין המל"מ לשער הצף, והאינדקס "2" מתייחסת לתחמוצת שבין Control gate לשער הצף.

כאשר מנגנון ההולכה הוא מנהור, צפיפות הזרם הינה:

$$J_1 = C_4 \mathcal{E}_1^2 \exp \left(-\frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_1} \right) \quad (\text{נוסחה 4 הרצאה 9})$$

והשינוי במתח הסף בעקבות המטען הכלוא הינה:

$$\Delta V_T = -\frac{d_2 Q}{\epsilon_2} \quad (\text{נוסחה 5 הרצאה 9})$$

שאלה 1

עבור התקן זיכרון שער צף (floating-gate nonvolatile memory device), נתון עבור שכבת המבודד התחתונה (בין המצע לשער הצף) כי ערכו של המקדם הדיאלקטרי היחסי הוא 4, ועובי השכבה הוא 10nm. ערכו של המקדם הדיאלקטרי היחסי של שכבת המבודד העליונה הוא 10, ועוביה הוא 100nm.

נתון כי צפיפות הזרם במבודד התחתון היא $J_1 = \sigma \mathcal{E}_1$ כאשר $\sigma = 10^{-7} S/cm$, וצפיפות הזרם במבודד העליון שווה לאפס. בנוסף נתון כי מתח השער שווה ל-10V.

- מהי צפיפות הזרם במבודד התחתון בתחילת תהליך הכתיבה?
- יש לחשב את השינוי במתח הסף לאחר זמן מספיק ארוך, כך ש- J_1 נהיה זניח.

פתרון

א.

$$\mathcal{E}_1 = \frac{V_G}{d_1 + d_2 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} + \frac{Q}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)}$$

עם תחילת תהליך הכתיבה, $Q \rightarrow 0$ ולכן

$$\mathcal{E}_1 = \frac{V_G}{d_1 + d_2 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} = \frac{10 \cdot 10^7}{10 + 100 \left(\frac{4}{10} \right)} = 2 \cdot 10^6 \frac{V}{cm}$$

$$J_1 = \sigma \mathcal{E}_1 = 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^6 = 0.2 \frac{A}{cm^2}$$

ב.

$$J_1 = \sigma \mathcal{E}_1 = 10^{-7} \left(\frac{10 \cdot 10^7}{10 + 100 \left(\frac{4}{10} \right)} + \frac{Q}{\left(4 + 10 \left(\frac{10}{100} \right) \right) 8.85 \cdot 10^{-14}} \right) = 0.2 + 2.26 \cdot 10^5 |Q|$$

כאשר $J_1 = 0$

$$|Q| = \frac{0.2}{2.26 \cdot 10^5} = 8.84 \cdot 10^{-7} C$$

$$\Delta V_T = \frac{Q}{\frac{\epsilon_2}{d_2}} = \frac{8.84 \cdot 10^{-7}}{(10 \cdot 8.85 \cdot 10^{-4}) / 10^{-5}} = 10V$$

שאלה 2

עבור התקן זיכרון שער צף מבוסס סיליקון, עובי והמקדם הדיאלקטרי היחסי של שכבת המבודד הראשונה (SiO_2) הינם 3nm ו-3.9 בהתאמה, והערכים של שכבת המבודד השנייה, הם 30nm ו-30.

צפיפות הזרם במבודד העליון שווה לאפס, והזרם במבודד התחתון נוצר בעקבות מנהור. נתון כי

$$\mathcal{E}_0 = 233.5 MV/cm^2 \text{ וכי } C_4 = 1.25 \cdot 10^{-6} A/V^2$$

- א. יש להעריך את המטען ($charge/cm^2$) הכלוא בשער הצף כאשר מופעל מתח שער של 5.52V במשך 1ms. יש להניח כי בפרק זמן זה תרומת המטען במבודד לשדה הנוצר בו זניחה וכי המטען ההתחלתי בשער הצף הוא 0 (לאחר מחיקה).
- ב. יש לוודא את נכונות הטענה.
- ג. יש לשרטט את מבנה הפסים של התקן הזיכרון במצבו ההתחלתי ובמצב כתיבה. נתון כי מתח פסים ישרים שונה מאפס.

פתרון

א.

$$\mathcal{E}_1 = \frac{V_G}{d_1 + d_2 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} + \frac{Q}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)}$$

עם תחילת תהליך הכתיבה, $Q \rightarrow 0$ ולכן

$$\mathcal{E}_1 = \frac{5.52 \cdot 10^7}{3 + 30 \left(\frac{3.9}{30} \right)} = 8 \frac{MV}{cm^2}$$

$$J_1 = C_4 \mathcal{E}_1^2 \exp \left(-\frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_1} \right)$$

$$J_1 = 1.25 \cdot 10^{-6} \cdot (8 \cdot 10^6)^2 \exp \left(-\frac{233.5 \cdot 10^6}{8 \cdot 10^6} \right) = 1.64 \cdot 10^{-5} \frac{A}{cm^2}$$

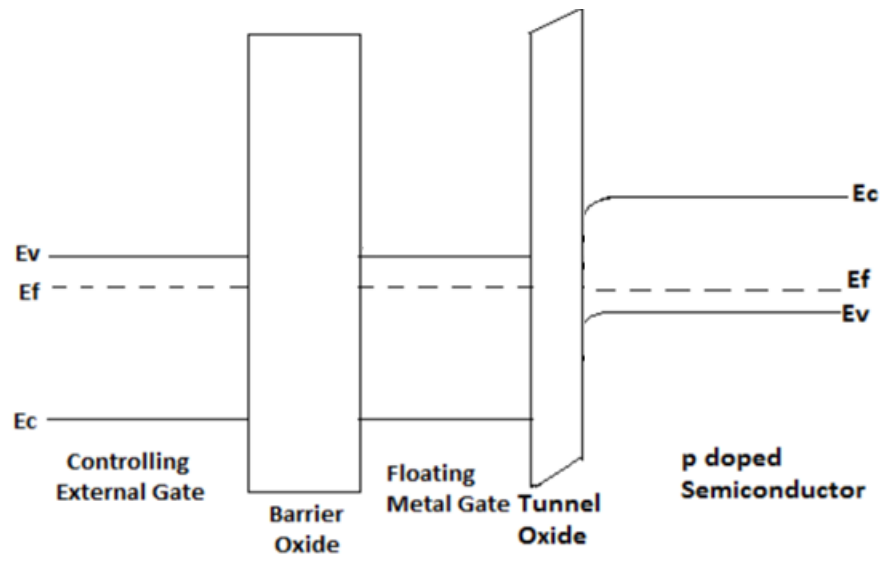
$$Q = \int J dt = 1.64 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-3} = \frac{1.64 \cdot 10^{-8}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 1.03 \cdot 10^{11} \frac{electrons}{cm^2}$$

ב. בדיקה:

$$\frac{Q}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} = \frac{1.64 \cdot 10^{-8}}{\left(3.9 + 30 \left(\frac{30}{3} \right) \right) 8.85 \cdot 10^{-14}} = 2.77 \cdot 10^4 \frac{V}{cm^2} \ll 8 \frac{MV}{cm^2}$$

ג.

מצב התחלתי:



בעת כתיבה:

