



## הדיודה

### מחבר: איל רוטמן

מסמך זה הורד מהאתר <http://www.underwar.co.il>.

אין להפיץ מסמך זה במדיה כלשהי, ללא אישור מפורש מאת המחבר. מחבר המסמך עשה כל שביכולתו למנוע טעויות. עם זאת, מחבר המסמך אינו אחראי לכל נזק, ישיר או עקיף, שיגרם עקב השימוש במידע המופיע במסמך, וכן לנכונות התוכן של הנושאים המופיעים במסמך.

## הדיודה

### מטרת המסמך

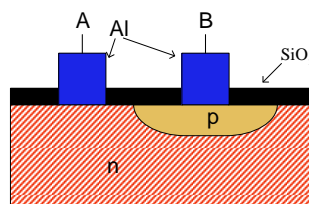
**דיודה** הינה התקן נפוץ בטכנולוגית ה-VLSI על כל היבטיה: אנלוגית ודיגיטאלית. הבנה עמוקה של דיודה חיונית ובסיסית לצורך הבנת התקנים מורכבים יותר כגון טרנזיסטור MOS. מסמך זה בונה את הבנת הדיודה בשלבים, החל מהפיסיקה הבסיסית ועד שימושה בתור התקן חשמלי. ניתוח חשמלי מכיל ניתוח לאות גדול ולאות קטן ומתעמק גם בנושאים הבעייתיים להבנה כגון ביטויים לקיבולי הדיודה הלא ליניאריים. מסמך זה מובנה כאחד להבנה בסיסית של הדיודה והבנה עמוקה עבור קורא מנוסה.

### הקדמה

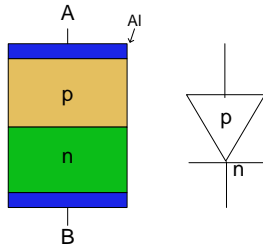
דיודות כמעט אינן ממומשות באופן עצמאי במעגלים דיגיטליים אך הן מצויות כמעט בכל מקום כחלק מהמבנה הפנימי של התקני מל"מ. בכל טרנזיסטור MOS ישנם מספר דיודות בממתח אחורי המשפיעות על התנהגות הרכיב. למשל הקיבול תלוי המתח של דיודות פרזיטיות אלו, משפיע רבות על מיתוג שער הטרנזיסטור וכניסתו להולכה.

ממשק בין מל"מ סוג n לבין מל"מ סוג p היוצר דיודה נקרא בד"כ צומת מדרגה או step/ abrupt junction. שני המל"מים כמובן ניטרליים אך כל אחד רווי מטענים חופשיים שונים והם אלו שיכולים לנוע לחלקים שונים במעגל. במפגש בין שני המל"מים יש מעבר של מטען בדיפוזיה אך הסיגים הנחשפים מאזנים זאת עם היווצרות שדה חשמלי. נוצרת צומת שמתח הסף הטבעי שלה הוא 0.7V בקירוב. מתח נוצר רק באזור הצומת ומכיוון ששאר המל"מ נטרלי המתח החיצוני המוזן במגעים על המל"מים נופל ישירות על הצומת. ניתן לייצר מגעים מתכתיים, בד"כ מאלומיניום ולכן יש מעבר חופשי של מטען מהמל"מ למגעי המתכת.

מבנה פנימי של דיודה:



סימון:



מתח מובנה בצומת דיודה:

$$\phi_0 = \phi_T \ln \left[ \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right], \quad \phi_T = \frac{kT}{q} = 26mV \text{ at } 300^0 k$$

$$n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \left[ \frac{1}{cm^3} \right] \text{ at } 300^0 k$$

אופיין זרם הדיודה הינו:

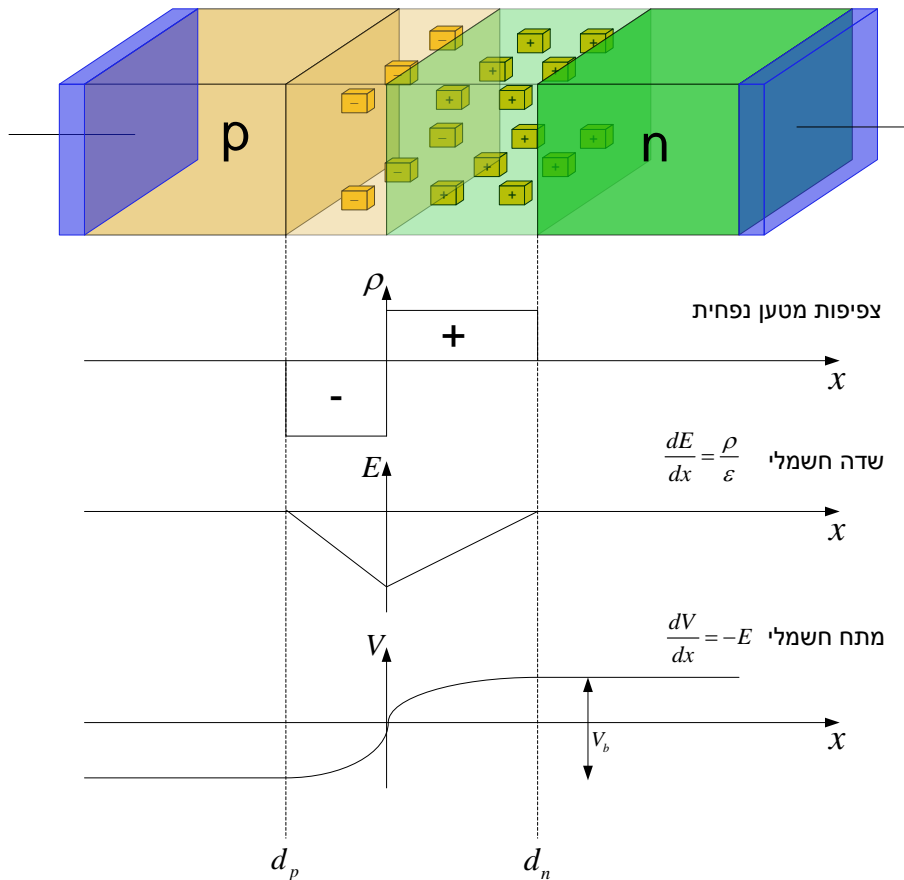
$$I_D = I_s (e^{V_D/\phi_T} - 1)$$

זרם הדיודה מתנהג אקספוננציאלית על פני כל טווח המתחים החיוביים החל ממתחים נמוכים מאוד, נח לראות זאת בסקלה לוגריתמית בה מתקבל פשוט קו ישר. בממתח אחורי ישנו זרם זליגה  $I_s$  מהקתודה לאנודה. ערכים תיאורטיים הינם  $10^{-17} A / \mu m^2$  בקירוב אך בפועל ערכים אלו גדולים בשלושה סדרי גודל בערך.

תגובה דינאמית (פתיחה להולכה, הפסקת הולכה) של הדיודה קובעת מהי המהירות המקסימלית בה המעגל המכיל אותה יכול לפעול. פעולת הדיודה קשורה למטען באזורים הניטראליים וגם למטען באיזור המיחסור ולכן התנהגותה דינאמית נקבעת ע"י כמה מהר אזורים יכולים לאגור מטען או להיפטר ממנו.

טענה – על פי חוק גאוס האינטגרלי סה"כ מטען סיגים באזור P צריך לשוות לסה"כ מטען סיגים אזור N ונקבל:

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$



**משוואת פואסון לאזור המחסור**

סה"כ המטען ליחידת נפח באזור המחסור הינו:

$$Q \left[ \frac{cb}{cm^3} \right] = q(N_D + \bar{p}(x) - N_A - \bar{n}(x))$$

$$= q \left[ N_D - N_A - 2n_i \sinh \left( \frac{qV(x)}{kT} \right) \right]$$

כאשר  $\bar{p}(x), \bar{n}(x)$  הינם כמות האלקטרונים והחורים, ו- $N_A, N_D$  הם ריכוזי הסיגים הסטאטיים.

אזי משוואת פואסון באזור המחסור הינה:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} \left[ N_D - N_A - 2n_i \sinh \left( \frac{qV(x)}{kT} \right) \right]$$

לפי קירוב המחסור מניחים:

1. צומת מדרגה
2. נושאי מטען ניידים אינם קיימים באזור המחסור.
3. השינוי ממחסור מלא לניטרליות מתבצע גם כן בצורת מדרגה.

משוואת פואסון לאחר קירוב המחסור:

$$\begin{cases} \frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} & -d_n \leq x \leq 0 \\ \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{qN_A}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} & 0 \leq x \leq d_p \end{cases}$$

פיתרון המשוואה ע"י הצבת שני תנאי שפה:

1. תנאי שפה לאינטגרציה ראשונה – השדה מתאפס בשפות המחסור.
2. תנאי שפה לאינטגרציה שנייה – פוטנציאל ב- $x=0$  (מרכז הדיודה) הוא אפס (נקודת ייחוס שרירותית).

מתקבלות התוצאות הבאות:

**רוחב אזור המחסור**

$$d_n = \left[ \frac{2\epsilon_{Si}\epsilon_0(V_b - V_A)N_A}{qN_D(N_D + N_A)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$d_p = \left[ \frac{2\epsilon_{Si}\epsilon_0(V_b - V_A)N_D}{qN_A(N_D + N_A)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$d = d_n + d_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}\epsilon_0(V_b - V_A)}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

מקבלים כי שדה מקסימאלי במעבר בין N ל-P

$$E_{\max} = \frac{qN_D d_n}{\epsilon_{Si} \epsilon_0} = \frac{qN_A d_p}{\epsilon_{Si} \epsilon_0} = \left[ \frac{2q(V_b - V_A)N_A N_D}{\epsilon_{Si} \epsilon_0 (N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

מטען ליחידת שטח באזור P ובאזור N באופן שווה

$$Q_j = Q_N = Q_P = \sqrt{\frac{2q\epsilon_{Si}\epsilon_0(V_b - V_A)N_A N_D}{(N_D + N_A)}}$$

$$\epsilon_{Si} = 1.053 \times 10^{-10} F/m$$

### קיבול הצומת

מנקודת מבט פשטנית ניתן לתאר את אזור המחסור כקיבול אף אל פי שיש לו את התכונות המיוחדות הבאות:

1. המחסור אינו כולל מטענים ניידים (קרוב המחסור) אזי הוא מבודד בעל דיאלקטריות של  $\epsilon_{Si}$ .
2. אזור N ואזור P פועלים כלוחות הקבל.

שינוי קטן במתח המופעל על הצומת  $V_A$  גורר שינוי במטען המרחבי במחסור. לכן קיבול המחסור ליחידת שטח מוגדר כ:

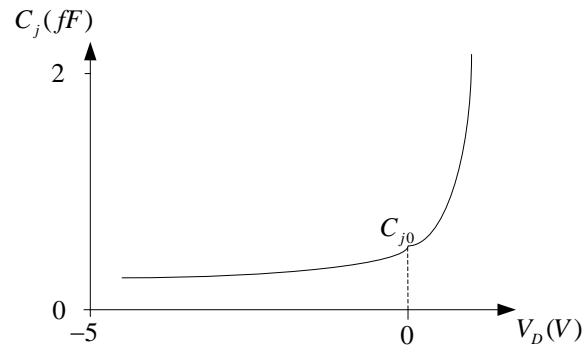
$$C_j = \frac{dQ_j}{dV_A} = \sqrt{\frac{q\epsilon_{Si}\epsilon_0 N_A N_D}{2(N_D + N_A)}} \frac{1}{(V_b - V_A)}$$

$$= \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{V_A}{V_b}}}, \quad C_{j0} = \sqrt{\frac{q\epsilon_{Si}\epsilon_0 N_A N_D}{2(N_D + N_A)}} \frac{1}{V_b}$$

$C_{j0}$  הוא קיבול הצומת בממתח חיצוני אפס. את ערך הקיבול הזה (קיבול ליחידת שטח) ניתן לקבל אם נחשב על קבל בעל מטען על הלוחות  $Q_j$ , מרחק בין הלוחות  $d$  וחומר דיאלקטרי סיליקון  $\epsilon_{Si}\epsilon_0$ .

$$C_j = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0}{d}$$

**קיבול זה אינו ליניארי** כתלות במתח המופעל על הדיודה (הצומת). לכן איננו יכולים להסיק ממנו לגבי השתנות אות גדול שמשמעותו - שינוי גדול במתח המופעל על הצומת, מהו שינוי המטען? קיבולים להם אנו רגילים הם ליניאריים ולכן יחס השינויים באות קטן הוא גם היחס באות גדול. כאן הדבר מסובך יותר.



**הערה** – הנחנו כי המחזור משתנה כמדרגה. בד"כ לא כך הדבר והוא לפחות משתנה ליניארית לכן קיבול הצומת יהיה

$$C_j = \frac{dQ_j}{dV_A} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V_A}{V_b}\right)^m}$$

כאשר  $m = 1/2$  עבור צומת מדרגה ו- $m = 1/3$  עבור צומת ליניארית.

**קיבול לאות גדול**

ראינו כי הקיבול אינו ליניארי כתלות במתח הדיודה. במעגלים דיגיטליים יש נטייה למתח על הדיודה לנוע בתחום רחב מקדמי לאחורי ולהיפך. במקום לעבוד עם קיבול לא ליניארי ולבצע אינטגרל נחליף אותו בקיבול אקוויולנטי התואם תחום שינוי מתחים מוגדר. לכל שינוי מתחים יוגדר קיבול תואם.

נשתמש בביטוי  $Q_j$  כדי לקבל קיבול אפקטיבי:

$$C_{eq} = \frac{\Delta Q_j}{\Delta V_A} = \frac{Q_j(\text{high}) - Q_j(\text{low})}{V_{\text{high}} - V_{\text{low}}} = K_{eq} C_{j0}$$

$$K_{eq} = \frac{2V_b^{\frac{1}{2}}}{\Delta V_A} \left[ (V_b - V_{\text{high}})^{\frac{1}{2}} - (V_b - V_{\text{low}})^{\frac{1}{2}} \right]$$

זהו  $K_{eq}$  עבור צומת מדרגה בלבד.

**דיודה מעשית – אפקטים נוספים**

1. **התנגדות אזורים אוהמים** – לא כל המתח על הדיודה נופל על הצומת. ישנה נפילת מתח גם באזורים הניטראליים. התנגדות זו בד"כ קטנה בתחומים  $[1, 100] \Omega$  תלוי ברמת הסימום. המתח הנופל נהיה משמעותי בזרמים הגדולים מ-  $1mA$ . אפקט זה ממודל ע"י הוספת נגד טורי לדיודה.
2. **פריצת דיודה** – עד כה הונח כי בממתח אחורי קיים זרם זליגה אחורי בדיודה שהוא בקירוב אפס. בפועל בממתח אחורי מסויים ישנה עלייה דרמטית בזרם האחורי הקרוי מתח פריצה. בדיודות בתהליך CMOS עליית הזרם קוראת עקב תהליך מפולת. אלקטרונים החוצים את אזור המחסור מוצאים למהירות גבוהה. בשדה מסוים  $E_{crit}$  נושאי המטען המתנגשים באטום סיליקון יוצרים זוג אלקטרון-חור. אלקטרון זה מתנגש שוב בעודו באזור המחסור. ערך  $E_{crit}$  הוא בקירוב  $2 \times 10^5 V/cm$  עבור ריכוזי סמם של  $10^{16} cm^{-3}$  בקירוב.

מפולת הינה אפקט לא רברסבילי. היא מפסיקה כאשר ממתח אחורי קטן אל מתחת ל-  $E_{crit}$ . מצד שני אין להחזיק את הדיודה במצב מפולת לאורך זמן כיוון שהחום הנוצר עקב פיזור ההספק עלול לגרום נזק למבנה.

עבור דיודות מאוד מסוממות קורה אפקט מפולת נוסף הקרוי זנר – zener breakdown.

3. הזרם החשמלי של הדיודה מושפע מטמפרטורה בשני אופנים:

a. המתח התרמי  $\phi_T = \frac{kT}{q}$  תלוי ליניארית בטמפ' (קלווין). עליה בטמפ' גורמת לזרם לקטון.

b. זרם הזליגה (נקרא זרם רוויה בספרות) תלוי טמפ'. ש"מ תרמי של נושאי מטען באזור הצומת עולה עם הטמפ'. תאורטית זרם הזליגה מוכפל כל  $5^{\circ}C$  בפועל הזרם מוכפל כל  $8^{\circ}C$ . נושא בעייתי מאוד בבידודים שהדיודות מבצעות.

**מודל Spice לדיודה**

מודל סטנדרטי המקשר בין המתח לזרם של דיודה:

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{n\phi_T}} - 1 \right)$$

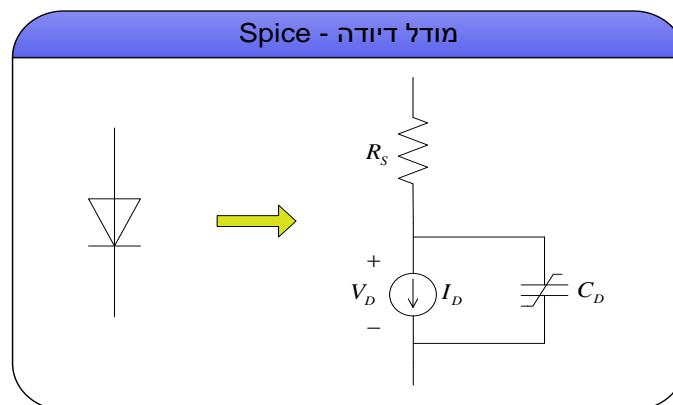
כאשר  $n$  הוא קבוע הנקרא emission coefficient.

בנוסף מוסיפים למקור הזרם הלא ליניארי התנגדות טורית הממדת את המתח הנופל באזורים הנטרליים משני צידי המחסור. עבור זרמים גבוהים יחסית להתנגדות גורעת מהמתח המאולץ על הצומת ולכן הזרם נמוך מאשר היינו מצפים.

ההתנהגות הדינאמית של הדיודה ממודלת ע"י קיבול לא ליניארי המאחד שני אפקטים:

1. מטען אזור המחסור.
  2. מטען נושאי המיעוט המבצעים דיפוזיה תחת ממתח קדמי.
- הקיבול הלא ליניארי הינו:

$$C_D = \frac{C_{j0}}{(1 - V_D / \phi_0)^m} + \frac{\tau_T I_S}{\phi_T} e^{V_D / n\phi_T}$$



פרמטרי המודל

Parameter name	Symbol	Spice name	Units	Default Value
Saturation Current	$I_S$	IS	A	$1 \times 10^{-14}$
Emission Coefficient	$n$	N	-	1
Series Resistance	$R_S$	RS	$\Omega$	0
Transit Time	$\tau_T$	TT	s	0
Zero-bias junction capacitance	$C_{j0}$	CJ0	F	0
Grading Coefficient	$m$	M	-	0.5
Junction Potential	$\phi_0$	VJ	V	1

פרמטרים נוספים כגון מתח פריצה, הזרקה חזקה, רעש ועוד לא כלולים כאן.