

תוכן העניינים:

2	פרק 5
2	דיודת שוטקי (Schottky Diode)
2	כללי:
2	סיכום כללי:
10	שאלות:
12	תשובות סופיות:

פרק 5

דיודת שוטיקי (Schottky Diode)

כללי:

סיכום כללי:

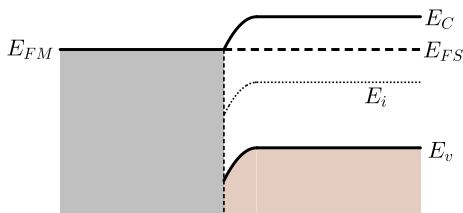
מגעים אידיאליים של מוליך למחצה ומתכת (MS Contacts):

הנחת האידיאליות כוללת מספר הנחות:

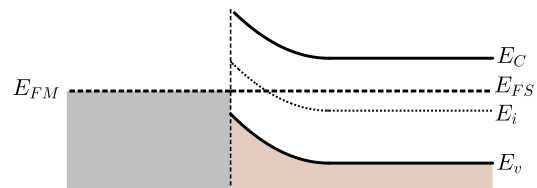
- 1) המתכת והמוליך למחצה מוצמדים זה לזה ברמה האטומית, ללא שכבות של חומר או מטען כלשהו ביניהן.
- 2) אין דיפוזיה פנימית (Interdiffusion) או שילוב פנימי (Intermixing) של המתכת והמוליך למחצה בשום צורה שהיא.
- 3) אין מטענים משטחיים במשטח החיבור של המתכת והמוליך למחצה או אילוח שאינו אחיד במשטח החיבור שבין המוליך למחצה והמתכת.

מודל פסי האנרגיה:

תיאור צומת MS (עם מ"מ מסוג N) עבור $\Phi_M < \Phi_S$



תיאור צומת MS (עם מ"מ מסוג N) עבור $\Phi_M > \Phi_S$

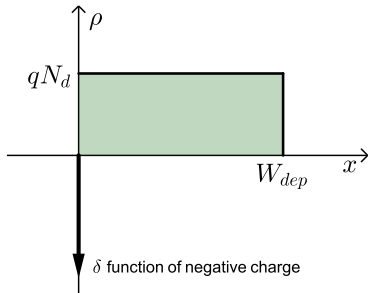


האופי החשמלי של צומת MS אידיאלי:

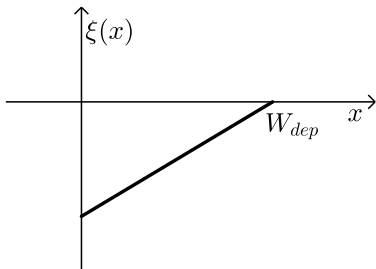
Work Function relations	<i>n</i> -Type Semiconductor	<i>p</i> -Type Semiconductor
$\Phi_M > \Phi_S$	מיישר (Rectifier)	מגע אוהמי (Ohmic Contacts)
$\Phi_M < \Phi_S$	מגע אוהמי (Ohmic Contacts)	מיישר (Rectifier)

משוואות וגרפים של צומת MS:

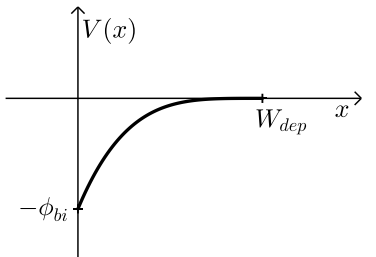
קשר בין הפוטנציאל המובנה ומחוס שוטקי: $\phi_{bi} = \frac{1}{q} [\Phi_B - (E_C - E_F)_{FB}]$



צפיפות המטען: $\rho = \begin{cases} qN_d & 0 \leq x \leq W_{dep} \\ 0 & x > W_{dep} \end{cases}$



שדה חשמלי: $\xi(x) = -\frac{qN_d}{k_s \epsilon_0} (W_{dep} - x)$, $0 \leq x \leq W_{dep}$



פוטנציאל חשמלי: $V(x) = -\frac{qN_d}{2k_s \epsilon_0} (W_{dep} - x)^2$, $0 \leq x \leq W_{dep}$

רוחב אזור המחסור: $W_{dep} = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{qN_d} (\phi_{bi} - V_A)}$

זרם כתוצאה מפליטה תרמיונית (Thermionic Emission):

תופעה פיזיקלית המתארת את עצם קיום הזרם בצומת MS. עיקרי התהליך הם כדלהלן:

- (1) רמת פרמי בסיליקון קבועה על למחסום הפוטנציאל.
- (2) אלקטרון מסוגל לעבור מחסום אנרגיה אם האנרגיה התרמית שלו לכיוון המחסום גדולה מספיק.
- (3) מניחים כי בממוצע מחצית מהאלקטרונים מסוגלים לעבור את מחסום האנרגיה.
- (4) מבצעים חישוב למציאת צפיפות זרם האלקטרונים מהמל"מ כלפי המתכת.

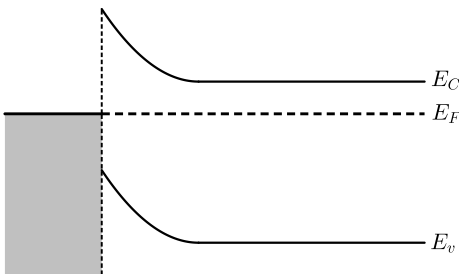
ניתוח זרם עבור 3 מקרים:

- (1) צומת ללא ממתח חיצוני ($V_A = 0$).
- (2) צומת עם ממתח חיצוני קדמי ($V_A > 0$).
- (3) צומת עם ממתח חיצוני אחורי ($V_A < 0$).

בכל מקרה נמצא את הביטוי לזרם האלקטרוניים מהמוליך למחצה כלפי המתכת $I_{S \rightarrow M}$ ואת הזרם מהמתכת כלפי המוליך למחצה $I_{M \rightarrow S}$.

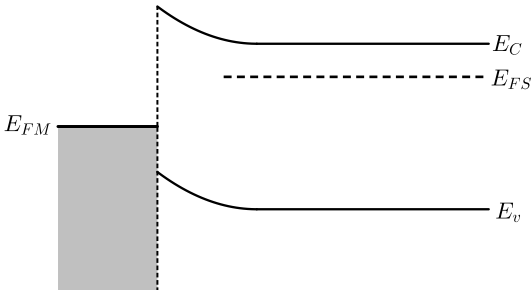
הביטוי לזרם הכולל הוא (תמיד!): $I = I_{S \rightarrow M} + I_{M \rightarrow S}$.

דיאגרמת פסי אנרגיה במצב שיווי משקל:



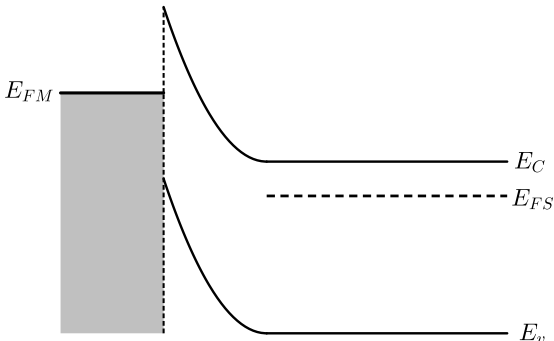
ניתן לראות כי רמת פרמי קבועה לכל אורך הצומת. עקב כך הזרמים שעוברים מהמוליך למוליך ולהיפך שווים בגודלם והפוכים בסימנם. לכן הם מבטלים זה את זה ומקבלים כי הזרם הכולל מתאפס.

דיאגרמת פסי אנרגיה בממתח קדמי:

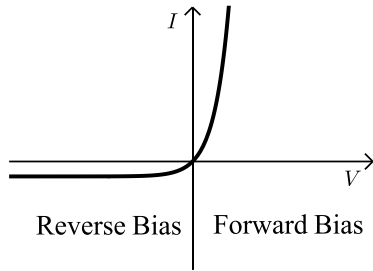


אלקטרוניים שבמוליך חווים מחסום אנרגיה קטן משמעותית ולכן יכולים לעבור מצד המוליך כלפי המתכת בקלות ויהוו את הזרם המרכזי. זאת בעוד שאלקטרוניים שנמצאים בצד המתכת חווים את אותו מחסום האנרגיה (פוטנציאל שוטקי) ולכן יעברו לצד המוליך בכמות קטנה. נקבל זרם כולל של אלקטרוניים מצד המוליך כלפי המתכת.

דיאגרמת פסי אנרגיה בממתח אחורי:



אלקטרוניים שבצד המוליך חווים מחסום אנרגיה מוגדל (גדול יותר ממחסום שוטקי הטבעי) ולכן לא יעברו כלל לצד המתכת. זאת בעוד שהאלקטרוניים שבמתכת חווים את אותו מחסום האנרגיה ולכן יעברו במינון קטן לצד המוליך והם יגדירו את זרם הזליגה (זרם אחורי) מהמתכת כלפי המוליך.



משוואת הזרמים ואופיין דיודת שוטקי:

$$I = I_0 \left(\exp \left\{ \frac{qV_A}{kT} \right\} - 1 \right)$$

$$I_0 = AKT^2 \exp \left\{ -\frac{q\Phi_B}{kT} \right\}$$

$$K = \frac{4\pi q m_n k^2}{h^3} \approx 100 \frac{A}{\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2}$$

ג- הוא קבוע ריצ'רדסון.

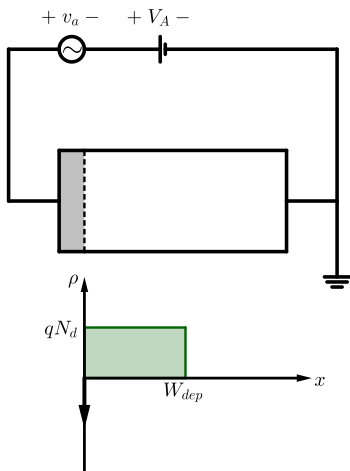
קיבול של דיודת שוטקי:

$$v(t) = V_{DC} + v_{AC}(t)$$

מניחים אות המורכב מרכיב DC ורכיב AC: (אצלנו V_{DC} הוא V_A).

$$C = \frac{k_s \epsilon_0 A}{\sqrt{2k_s \epsilon_0 (qN_d (\phi_{bi} - V_A))}}$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{qN_d k_s \epsilon_0 A^2} (\phi_{bi} - V_A)$$



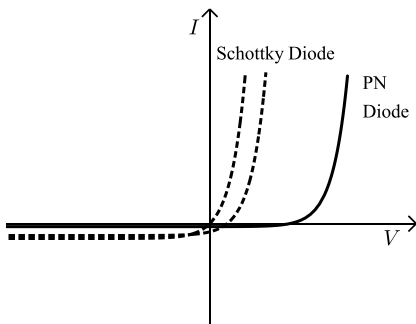
השוואה בין אופיין של דיודת שוטקי לאופיין של דיודת PN רגילה:

(1) זרם הזליגה I_0 בדיודת שוטקי גדול יותר מזרם הזליגה בדיודת PN רגילה פי $10^3 : 10^8$.

(2) מחסום האנרגיה ϕ_{bi} בדיודת שוטקי קטן יותר מאשר בדיודת PN רגילה.

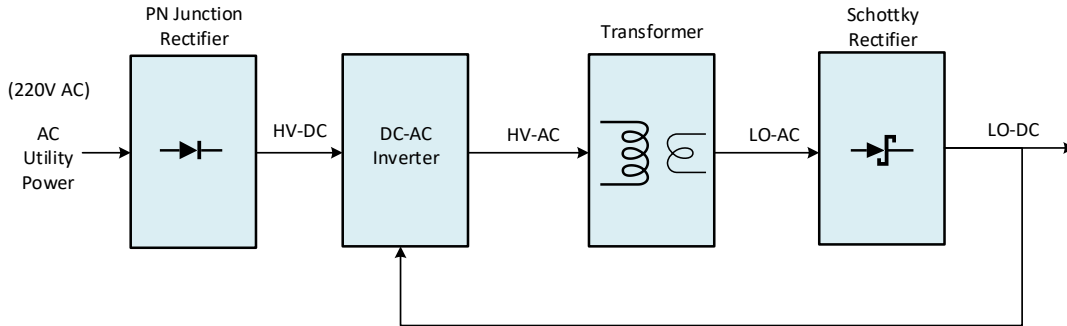
(3) בדיודת שוטקי הזרם מקורו בנושאי מטען הרוב!

בעוד שבדיודת PN הזרם נקבע ע"י נושאי מטען המיעוט העודפים. משמעות הדבר היא שיכולת הקיבול (כלומר: אגירת המטענים) של דיודת שוטקי קטנה יותר ולכן זמני התגובה שלה מהירים יותר והיא מסוגלת לפעול בתדרים גדולים יותר משל דיודת PN רגילה.



❖ **דוגמא - המרת אנרגיה למתח נמוך וזרם חזק:**

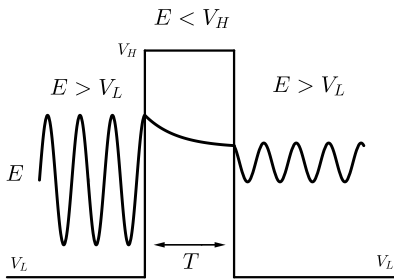
בדוגמא זו ניתן לראות שימוש פופולרי בדiodות שוטקי כהתקן המסוגל ליישר זרם חזק בתמורה להפסדי הספק מינימליים.



תופעת המינהור (Quantum Mechanical Tunneling):

ההסתברות שאלקטרון יעבור מחסום אנרגיה

בגובה V_H וברוחב T



היא:
$$P \approx \exp \left\{ -2T \sqrt{\frac{8\pi^2 m_n}{h^2} (V_H - E)} \right\}$$

חיבור מתכת ומוליך למחצה באופן מעשי:

הנחות האידיליות לא נשמרות וכעת נתאר את המקרה המעשי באמצעות תופעת הנעילה של רמת פרמי.

תופעת הנעילה של רמת פרמי (Fermi-level pinning):

תופעה בה עקב קיום דיפול בצומת שבין מתכת ומוליך למחצה, רמות האנרגיה מקבעות את Φ_{Bn} סביב ערך של 0.7V. נוכל לקרב ולומר: $\Phi_{Bn} = 0.7 + 0.2(\Phi_M - 4.75)$ [V].

במוליכים למחצה כגון Si ו-GaAs מתרחשת תופעת נעילה של מחסום הפוטנציאל עקב נעילה של רמת פרמי במצב שיווי משקל עבור רוב המתכות. המשמעות היא ש- Φ_{Bn} ישתנה יחסית מעט כתלות במתכת שבשימוש בצומת.

סיליקיד (silicide) הוא שילוב של מתכת ומוליך למחצה. מתנהג כמו מתכת אך יציב יותר כאשר מתפקד כחומר בצומת מאשר מתכת ומל"מ. כאשר נדבר על צומת שבין מתכת ומוליך למחצה, נתכוון לסיליקיד ומל"מ.

טבלה - מחסומי שוטקי בצמתים המורכבים ממתכות שונות ומוליך למחצה מסוג N ומסוג P, פונקציית העבודה של כל מתכת.

Metal	Mg	Ti	Cr	W	Mo	Pd	Au	Pt
Φ_{Bn} [V]	0.4	0.5	0.61	0.67	0.68	0.77	0.8	0.9
Φ_{Bp} [V]		0.61	0.5		0.42		0.3	
Φ_M [V]	3.7	4.3	4.5	4.6	4.6	5.1	5.1	5.7

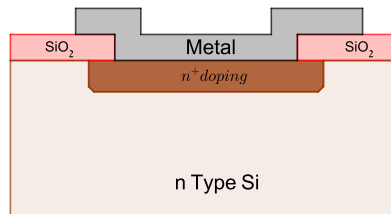
ניתן לראות כי בקירוב מתקיים: $\Phi_{Bn} + \Phi_{Bp} = E_g$.

טבלה - מחסומי שוטקי עבור סיליקידים שונים:

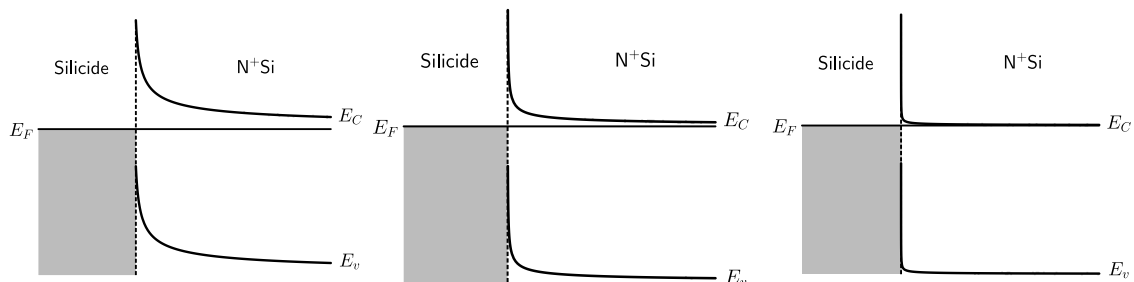
Silicide	ErSi _{1.7}	HfSi	MoSi ₂	ZrSi ₂	TiSi ₂	CoSi ₂	WSi ₂	NiSi ₂	Pd ₂ Si	PtSi
Φ_{Bn} [V]	0.28	0.45	0.55	0.55	0.61	0.65	0.67	0.67	0.75	0.87
Φ_{Bp} [V]			0.55	0.55	0.49	0.45	0.43	0.43	0.35	0.23

צומת MS כאמצעי למגעים אוהמים בין התקנים:

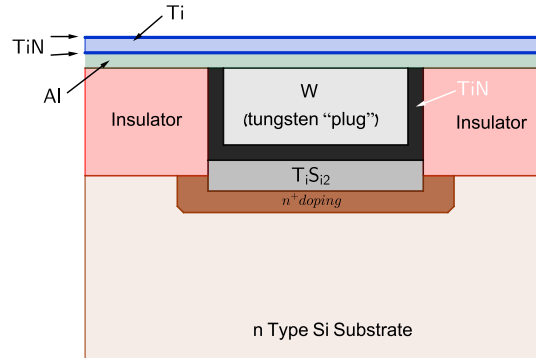
תיאור סכמטי של מבנה צומת MS בתהליך הפבריקציה:



בזיהומים שונים מקבלים עובי של מחסום שוטקי ההולך וקטן עם הגדלת הזיהום. בזיהום מספיק גדול, העובי זניח ומחסום שוטקי נהפך לדלתא - מה שמאפשר זרימה גדולה של מטענים עקב מנהור.



פבריקציה מעשית יותר של מתכות שונות על מנת למנוע תופעות לא רצויות כגון חדירה של אלומיניום לאזור המלי"ם:



משוואות למציאת זרמים של מגעים אוהמים מעשיים:

$$. T \approx \frac{W_{dep}}{2} = \sqrt{\frac{k_s \epsilon_0 \Phi_{Bn}}{2qN_d}} : \text{רוחב אזור המחסור}$$

$$. H = \frac{4\pi}{h} \sqrt{\frac{k_s \epsilon_0 m_n}{q}} : \text{כאשר, } P \approx \exp\left\{-\frac{H\Phi_{Bn}}{\sqrt{N_d}}\right\} : \text{ההסתברות}$$

עבור: $V_A = 0V$ נקבל: $J_{S \rightarrow M} = -J_{M \rightarrow S} = \frac{1}{2} q N_d v_{TH,x} P$ ולכן לא יעבור זרם כלל.

בממתח קטן יחסית, $V_A > 0V$ נקבל תנועה של מטענים בעקבות מנהור:

$$. J_{S \rightarrow M} = \frac{1}{2} q N_d v_{TH,x} \cdot \exp\left\{\frac{-H(\Phi_{Bn} - V_A)}{\sqrt{N_d}}\right\}$$

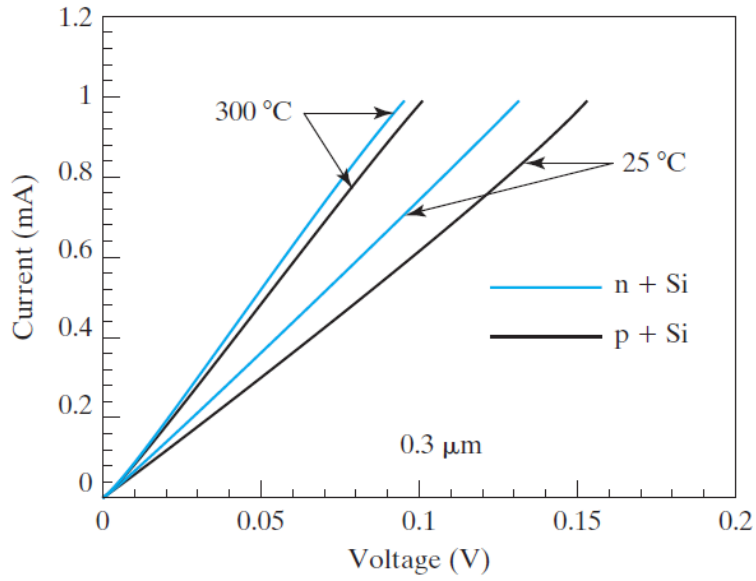
עבור ממתחי צומת קטנים ניתן להתייחס לקצב גדילת צפיפות הזרם כאל ליניארי. נקבל את הקשר הבא:

$$J \approx \left. \frac{dJ_{M \rightarrow S}}{dV} \right|_{V=0} \cdot V = V \cdot \frac{1}{2} q \cdot v_{TH,x} \cdot H \cdot \sqrt{N_d} \cdot \exp\left\{\frac{-H\Phi_{Bn}}{\sqrt{N_d}}\right\}$$

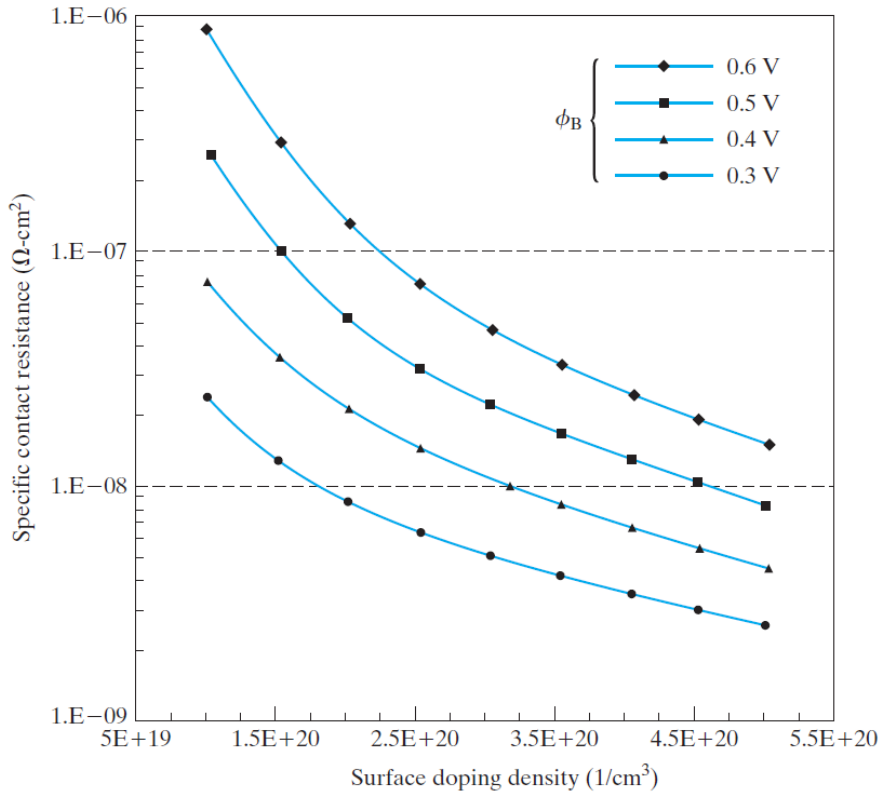
עקב כך ההתנגדות ניתנת לחישוב לפי:

$$R_C = \frac{V}{J} = \frac{2 \cdot \exp\left\{\frac{H\Phi_{Bn}}{\sqrt{N_d}}\right\}}{q \cdot v_{TH,x} \cdot H \cdot \sqrt{N_d}} \propto \exp\left\{\frac{H\Phi_{Bn}}{\sqrt{N_d}}\right\} [\Omega \text{cm}^2]$$

גרף אופייני מגע אוהמי מעשי בתלות בסוג הצומת וטמפרטורה:



גרף התנגדות ביחידת שטח כתלות בזיהום המשטחי שבאזור הצומת:



שאלות:

(1) מגע מיישר זרם (rectifying) אידאלי, נוצר על ידי נידוף של פלטינה ($\varphi_M = 5.7\text{eV}$)

על סיליקון מאולח $N_d = 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, בטמפ' החדר. ידוע כי $\chi_{Si} = 4.05\text{eV}$.

- א. מצאו את φ_B (הניחו שהצומת מקיים את הנחות האידיליות).
- ב. מצאו את הפוטנציאל המובנה של הצומת שבין הזהב והסיליקון, ϕ_{bi} .
- ג. מהו רוחב אזור המחסור תחת שיווי משקל?
- ד. מהו השדה המקסימלי בצומת תחת שיווי משקל?
- ה. האם בצומת MS מעשי, הערכים שמצאתם מתקיימים? נמקו.

(2) בשאלה זו נתמקד בצומת מתכת-מל"מ כאשר המל"מ הוא מסוג P.

- א. סרטט את דיאגרמת פסי האנרגיה עבור המקרה ש- $\phi_M < \phi_S$ במצב שיווי משקל. סמן את אזור המחסור והסבר את מהות קיומו.
- ב. סרטט את פילוג צפיפות נושאי המטען, השדה החשמלי והפוטנציאל החשמלי לאורך ציר ה- x (שים לב להגדיר את ראשית הצירים בצורה נכונה).
- ג. סרטט את דיאגרמת פסי האנרגיה עבור מקרה של ממתח קדמי ומקרה של ממתח אחורי. הראה בכל אחד מהם את כיוון הזרם הכללי. מה הוא מרכיב הזרם הדומיננטי בכל מקרה? נמק.

(3) בשאלה זו נעסוק בארבעה סוגי הזרמים:

- זרם דיפוזיה (Diffusion current).
 - זרם סחיפה (Drift current).
 - זרם מנהור (Tunneling Current).
 - זרם תרמיוני (Thermionic emission current).
- ובהשוואה ביניהם בין דיודת PN ודיודת שוטקי.
- א. הסבר מהם כל אחד מהזרמים וכיצד הם נוצרו.
 - ב. מהם הזרמים המרכזיים בכל אחת מהדיודות? נמק.
 - ג. מקובל להתעלם מזרם הנגרם כתוצאה מ-thermionic emission בדיודת PN רגילה, על אף שהוא קיים בה. מדוע זאת?
כיצד דיודת שוטקי שונה במובן זה? כיצד ניתן לחשב אותו בדיודת PN?

4) קבע לגבי כל אחד מהמשפטים האם הוא מתאר דיודת שוטקי או מגע אוהמי :

- א. ההתקן מוליך לשני כיוונים.
- ב. ההתקן כולל בתוכו מחסום פוטנציאליים משמעותי.
- ג. רמת פרמי עלולה להיות מפוצלת.
- ד. להתקן יש התנגדות אפסית.
- ה. להתקן יש מפל פוטנציאל אפסי.
- ו. ההתקן בד"כ מוליך בכיוון אחד, כאשר הכיוון השני זניח.
- ז. ההתקן נמצא בשיווי משקל בשני הצדדים בכל זמן.

5) בשאלה זו נעסוק במגעים אוהמים הנוצרים ע"י צומת של מתכת ומל"מ.

- א. צייר אופיין IV של מגע אוהמי המורכב ממתכת ומל"מ. נמק.
- ב. הסבר מדוע כדי שהתקן המורכב ממוליך למחצה מסוג N ומתכת יתפקד כמגע אוהמי צריך להתקיים: $\Phi_M < \Phi_S$ וההיפך עבור צומת שבין מוליך למחצה מסוג P ומתכת ($\Phi_M > \Phi_S$).
- ג. כיצד יראו דיאגרמות פסי האנרגיה בכל מקרה, עבור מצב שיווי משקל, ממתח קדמי וממתח אחורי?

תשובות סופיות:

(1) א. $\Phi_B = 1.65 \text{ eV}$ (או אם לוקחים כמתח: $\Phi_B = 1.65 \text{ V}$).

ב. $\phi_{bi} = 1.45 \text{ V}$ ג. $W_{dep} = 43.87 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$ ד. $\xi_{max} = 33 \text{ k} \frac{\text{V}}{\text{cm}}$.

ה. לא, מכיוון שפוטנציאל שוטקי לא עולה מעל ל- 0.9 V עקב נעילת רמת פרמי.

(2) ראה דיאגרמות וגרפים מלאים בסרטון הוידאו.

(3) א. זרם דיפוזיה:

נוצר כתוצאה משינוי בריכוז המזהמים שנמצאים בחומר או בין חומרים.

זרם סחיפה:

נוצר כתוצאה מנוכחות של שדה חשמלי בתווך בו שוררים מטענים חופשיים (נושאי מטען רוב או מיעוט) והוא גורם לתנועתם (אלקטרונים – מפוטנציאל נמוך לגבוה, חורים – חורים - מפוטנציאל גבוה לנמוך).

זרם מנהור:

נוצר כתוצאה מנוכחות של מחסום פוטנציאל בעובי כלשהו המאפשר מעבר של אלקטרונים לפי עיקרון הגליות של אלקטרון.

זרם תרמינוני:

קיים באלקטרון כתוצאה מאנרגיה תרמית שיש לו כל עוד הוא אינו באפס מוחלט. לזרם זה תרומה משמעותית כאשר האלקטרון יכול לעבור את הצומת שבין שני חומרים כתוצאה מתוספת האנרגיה הקינטית שאלקטרון מקבל בעת הפעלת ממתח קדמי.

ב. דיודת PN: זרם סחיפה וזרם דיפוזיה. דיודת שוטקי: זרם תרמינוני וזרם מנהור.

ג. אנו מתעלמים מזרם תרמינוני בדיודת PN מכיוון שמחסום הפוטנציאל (ϕ_{bi}) גדול

משמעותית מזה של דיודת שוטקי (Φ_B).

(4) דיודת שוטקי: ב, ג, ו. מגעים אוהמים: א, ד, ה, ז.

(5) א. ראה גרף אופיין והסבר בסרטון הוידאו.

ב. במקרים אלו רמת פרמי רציפה ואין מחסום פוטנציאל.

ג. ראה דיאגרמות בסרטון הוידאו.