

הרצאה 5- מתח תת סף

בהרצאה הקודמת בחנו כיצד הקטנת מימדי הטרנזיסטור משפיעה על פעולתו. ראינו כי הצרה של התעלה מעצימה את השדה החשמלי בתעלה וכתוצאה מכך ישנה רוויה של מהירות נשאי המטען. רוויה זו באה לידי ביטוי ברווית זרם מוקדמת יותר ומקטינה את הזרמים המקסימליים שניתן להעביר בהתקן. בהרצאה הזו, נתרכז בצידן השני של עקומות המתח- זרם- נקודות העבודה הסמוכות למתח הסף. הבנה של פעולת ההתקן במתחים הנמוכים ממתח הסף חשובה מאוד באפליקציות שבהן נדרשת צריכת הספק נמוכה ובהתקנים אשר פועלים במתחים נמוכים.

מתח הסף

בקורס המבוא ראינו כי מתח הסף, V_T , מקיים:

$$\begin{aligned} V_T &= V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} \\ &= \left(\phi_{ms} - \frac{Q_f}{C_{ox}} \right) + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q N_A \psi_B}}{C_{ox}} \end{aligned} \quad (1)$$

כאשר ϕ_{ms} היא הפרש פונקציות העבודה בין המתכת והמל"מ, Q_f הוא צפיפות המטען הכלוא בממשק שבין התחמוצת והמל"מ. באופן איכותי, ניתן לומר כי מתח הסף הוא המתח שמעליו מתחילה להופיע שכבת היפוך דקה בפני השטח שבין המל"מ והתחמוצת. האיבר הימני במשוואה הוא מפל המתח על שכבת התחמוצת, האיבר אמצעי הוא כיפוף הפסים שדרוש במל"מ בכדי להגיע לסף היפוך, והאיבר השמאלי הוא המתח הדרוש בכדי ליישר את הפסים בגלל השפעת פונקציות העבודה של המתכת ממנה עשוי השער, פונקציית העבודה של המל"מ, והמטען הכלוא בפני השטח בין התחמוצת והמל"מ. כאשר מופעל מתח V_{BS} , בין המצע וה- Source (מתח שלילי עבור תעלה מסוג n ומתח חיובי עבור תעלה מסוג p), מתח הסף מקבל את הצורה הבאה:

$$\begin{aligned} V_T &= V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B - V_{BS})}}{C_{ox}} \\ &= \left(\phi_{ms} - \frac{Q_f}{C_{ox}} \right) + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q N_A (2\psi_B - V_{BS})}}{C_{ox}} \end{aligned} \quad (2)$$

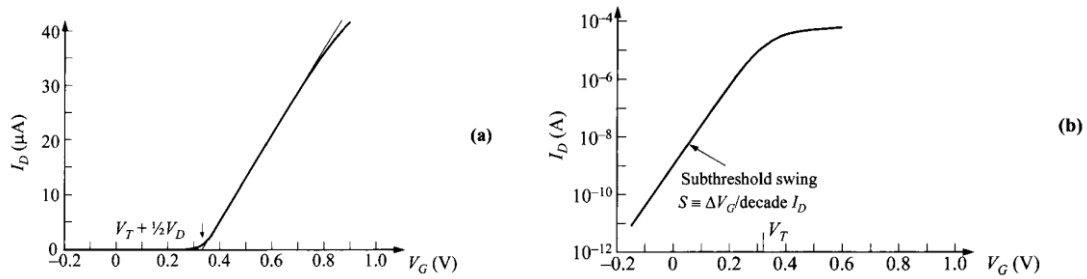
והשינוי במתח הסף כתוצאה מהפעלת מתח מצע הוא:

$$\Delta V_T = V_T(V_{BS}) - V_T(V_{BS} = 0) = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_{ox}} (\sqrt{2\psi_B - V_{BS}} - \sqrt{2\psi_B}) \quad (3)$$

נציין כי בדרך כלל נרצה לצמצם שינויים במתח הסף כתוצאה ממתח המצע. צמצום זה נעשה על ידי הקטנה של סימון המצע ושימוש בתחמוצת בעובי קטן יותר.

על מנת למדוד את מתח הסף, נרצה להפעיל את הטרנזיסטור בתחום הליניארי על ידי הפעלה של מתח $V_D \ll V_G$ ונשרטט את עקומת זרם הטרנזיסטור כתלות במתח השער. איור 1(a) מציג את זרם הטרנזיסטור כתלות במתח השער. נזכור כי כאשר $V_D \ll V_G - V_T$ מתקיים:

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} \left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D \quad (4)$$



איור 1: (a) זרם הטרנזיסטור כתלות במתח השער בתחום הליניארי. אקסטרפולציה של הזרם ל-0 מאפשרת להעריך את מתח הסף. (b) זרם התת-סף כתלות במתח השער.

ניתן לראות כי כאשר נבצע אקסטרפולציה של התחום הליניארי לזרם 0 נקבל- כי מתח נקודת החיתוך של הישר עם הציר האופקי היא במתח $V_G = V_T + V_D/2$. מאחר ו- V_D ידוע, קל לחלץ את המתח הסף מתוך עקומה זו.

תחום התת-סף

כאשר מתח השער בטרנזיסטור נמוך ממתח הסף, הטרנזיסטור נמצא במצב של היפוך חלש או מיחסור של נשאי מטען. זרם הטרנזיסטור במצב הזה נקרא זרם תת-סף. הזרם בתחום התת-סף מעיד עד כמה חדה הירידה של הזרם עם הירידה במתח השער, עניין שהוא בעל חשיבות רבה באפליקציות כמו לוגיקה וזיכרונות במכשירים שעובדים עם מתחים נמוכים או שנדרשים לצריכת הספק נמוכה.

במצב של היפוך חלש, ריכוז הנשאים בתעלה נמוך ועל כן, זרם הסחיפה של נשאי המטען יהיה נמוך גם כן. מסיבה זו, הזרם בטרנזיסטור יקבע בעיקר על ידי דיפוזיה באופן דומה לצורה בה אנו מחשבים את יחסי המתח והזרם בטרנזיסטורים ביפולריים. בהתחשב בשינוי בריכוז נשאי המטען בתעלה, זרם הדיפוזיה נתון על ידי:

$$I_D = -qZD_n \frac{dN'(y)}{dy} \approx qZD_n \frac{N'(0) - N'(L)}{L} \quad (5)$$

$N'(y)$ היא צפיפות המטען ליחידת שטח בתעלה לאחר אינטגרציה לעומק התעלה (בכיוון x) לאורך כל אזור המיחסור. סמוך ל-source, מתקבל כי ריכוז האלקטרונים הוא:

$$N'(0) = \int_0^{w_D} n(x) dx = n_{p0} \int_{\psi_s}^0 \exp(\beta\psi_p) d\psi_p \quad (6)$$

מאחר והתפלגות הפוטנציאל בתוך ההתקן ידועה, ניתן לחשב את ריכוז האלקטרונים להיות:

$$N'(0) = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{\epsilon_s}{2qN_A\psi_s}} n_{p0} \exp(\beta\psi_s) \quad (7)$$

ריכוז הנשאים בסמוך ל-drain נמוך אקספוננציאלית על פי מתח ה-drain.

$$N'(L) = N'(0) \exp(-\beta V_D) \quad (8)$$

נציב את משוואות (7) ו-(8) במשוואה (5):

$$I_D = \frac{Z\mu_n}{L\beta^2} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\psi_s}} \left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2 \exp(\beta\psi_s) [1 - \exp(-\beta V_D)]$$

$$\approx \frac{Z\mu_n}{L\beta^2} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\psi_s}} \left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2 \exp(\beta\psi_s) \quad (9)$$

הקירוב האחרון תקף כאשר $V_D \gg kT/q$. המשמעות של משוואה (9) היא שבתחום תת הסף הזרם תלוי אקספוננציאלית ב- ψ_s , הפוטנציאל בפני השטח, ועבור מתחי drain הגבוהים מבערך $3kT/q$ זרם

התת סף לא תלוי במתח ה-drain. כעת עלינו לקשר בין זרמים אלו למתחי השער המתאימים. ראינו בעבר את הקשר בין מתח השער לפוטנציאל בפני השטח:

$$V_G - V_{FB} = \psi_s + \frac{\sqrt{2\epsilon_s \psi_s q N_A}}{C_{ox}} \quad (10)$$

למשוואה זו אין פתרון פשוט עבור מתח מתח שער נתון. עם זאת, בהינתן פוטנציאל פני שטח ψ_s , ניתן לחשב את זרם תת הסף. הפרמטר אשר מתאר באיזו חדות הטרנזיסטור נפתח ונסגר נקרא subthreshold swing, הוא מסומן S , ומוגדר כהופכי לשיפוע הזרם בתחום מתחי התת סף. משמע- השינוי במתח השער הדרוש על מנת לגרום לשינוי של סדר גודל אחד בזרם. ראשית נמצא את השינוי במתח השער כתלות בשינוי בפוטנציאל פני השטח. נגזור את משוואה (10):

$$\frac{dV_G}{d\psi_s} = 1 + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{\frac{\epsilon_s q N_A}{2\psi_s}} = \frac{C_{ox} + C_D}{C_{ox}} \quad (11)$$

נשים לב כי:

$$\begin{aligned} \frac{d(\ln(I_D))}{dV_G} &\approx \frac{d}{dV_G} \ln \left(\frac{Z\mu_n}{L\beta^2} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\psi_s}} \left(\frac{n_i}{N_A} \right)^2 \exp(\beta\psi_s) \right) \\ &= \frac{d}{dV_G} \ln \left(\frac{Z\mu_n}{L\beta^2} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\psi_s}} \left(\frac{n_i}{N_A} \right)^2 \right) + \frac{d}{dV_G} \ln(\exp(\beta\psi_s)) \\ &\approx \frac{d}{dV_G} \ln(\exp(\beta\psi_s)) = \frac{d}{dV_G} \beta\psi_s \end{aligned} \quad (12)$$

מאחר והאיבר בשורש משתנה לאט בהרבה מהאיבר באקספוננט, ניתן להזניח אותו במקרה הזה.

כעת נחשב את S על פי ההגדרה:

$$S = \ln(10) \frac{dV_G}{d(\ln(I_D))} = \ln(10) \frac{dV_G}{d(\beta\psi_s)} = \ln(10) \frac{kT}{q} \frac{C_{ox} + C_D}{C_{ox}} \quad (13)$$

ננתח את התוצאה שקיבלנו במשוואה (13). כאשר עובי התחמוצת שואף ל-0 קיבול התחמוצת גדול מאוד ומתקבל כי השינוי בזרם הוא אקספוננציאלי בדומה לזרם בצומת $p-n$. לעומת זאת, כאשר עובי שכבת התחמוצת גדול יותר וקיבול הוא סופי, S גדל על פי מחלק מתח בין שני רכיבי קיבול- קיבול שכבת התחמוצת וקיבול שכבת המיחסור. המשמעות היא שעבור שכבת תחמוצת בעלת עובי סופי (שונה מ-0), הרגישות של הטרנזיסטור לשינוי במתח השער נפגעת על פי היחס $(C_{ox} + C_D)/C_{ox}$. נשים לב גם כי מאחר וקיבול שכבת המיחסור משתנה עם הפוטנציאל בפני השטח (ולכן גם עם מתח השער), S גם משתנה לאט עם מתח השער.

כאשר יש צפיפות גבוהה של מלכודות בפני השטח בין המל"מ והתחמוצת (נסמן את צפיפות המלכודות בפני השטח D_{it}), ניתן לייחס למלכודות אלו קיבול $C_{it} = q^2 D_{it}$. קיבול זה נמצא במקביל לקיבול שכבת המיחסור. לכן, S בהשפעת מלכודות בפני השטח יהיה:

$$S = \ln(10) \frac{kT}{q} \frac{C_{ox} + C_D + C_{it}}{C_{ox}} \quad (14)$$

והיחס בין S עם וללא מלכודות הוא:

$$S(D_{it} > 0) = S(D_{it} = 0) \frac{C_{ox} + C_D + C_{it}}{C_{ox} + C_D} \quad (15)$$

לכן, בהינתן שכל שאר הפרמטרים של ההתקן ידועים והם קבועים, ניתן לחלץ את צפיפות המלכודות בפני השטח בעזרת מדידה של S . שיטה זו היא אטרקטיבית למדי" שכן היא מאפשרת למצוא את צפיפות המלכודות בפני השטח בעזרת מדידות זרם ישר שהן פשוטות יותר ממדידות של קיבול והתנגדות.

איור b1 מתאר את עקומת הזרם כתלות במתח השער בטרנזיסטור ועליה סימון של S . על מנת שלטרנזיסטור תהיה רגישות גבוהה למתח השער (שיפוע גבוה יותר באיור b1, ו- S נמוך יותר) דרוש שעובי שכבת התחמוצת יהיה קטן, שיהיו מינימום מלכודות בפני השטח בין התחמוצת והמל"מ, וכי ריכוז המזהמים במל"מ יהיה נמוך. נשים לב גם כי S גם עולה עם הטמפרטורה (ולחלופין, רגישות הטרנזיסטור יורדת ככול שהטמפרטורה עולה). כמו כן, נזכור כי עליה מתח המצע (V_{BS}) בנוסף לשינוי במתח הסף, גם מעלה את הפוטנציאל בפני השטח ψ_s . כתוצאה מכך קיבול שכבת המיחסור C_D קטן וכך גם S .

כפי שניתן לראות באיור a1, במתחי התת-סף זרם הטרנזיסטור סוטה מהקירוב הליניארי והוא דועך לאט יותר עם המתח. זאת בגלל זרמי הדיפוזיה אותם ניתחנו במשוואות (5) - (9). עם זאת, בניתוח זרמי הדיפוזיה הזנחנו את השפעת הסחיפה. על כן, משוואות אלו מתארות רק את ביצועי הטרנזיסטור בסמוך למתח הסף. על מנת לחשב את ביצועי הטרנזיסטור תוך התחשבות גם הרכיבי הדיפוזיה וגם ברכיבי הסחיפה יש צורך במודל מורכב יותר. כידוע הזרם הכולל בנוי מרכיב דיפוזיה ומרכיב סחיפה וכן ניתן לתאר אותו בעזרת שינוי בקוואזי רמת פרמי לאלקטרונים E_{Fn} :

$$J_D = q\mu_n n \mathcal{E}_y + qD_n \frac{dn}{dy} = D_n n(x, y) \frac{dE_{Fn}}{dy} \quad (16)$$

ניתן להציב בתוך משוואה זו ביטויים שקיבלנו עבור השדה וצפיפות הנשאים תחת ה- gradual channel approximation:

$$\begin{aligned} I_D &= Z \int_0^{x_i} J_D dx = \frac{ZD_n}{L} \int_0^{x_i} \frac{dE_{Fn}}{dy} \int_0^L n(x, y) dx dy \\ &= \frac{Z \varepsilon_s \mu_n}{L L_D} \int_0^{V_D} \int_{\psi_B}^{\psi_s} \frac{\exp(\beta\psi_p - \beta\Delta\psi_i)}{F(\beta\psi_p, \Delta\psi_i, n_{p0}/p_{p0})} d\psi_p d\Delta\psi_i \end{aligned} \quad (17)$$

כאשר:

$$\begin{aligned} &F(\beta\psi_p, \Delta\psi_i, n_{p0}/p_{p0}) \\ &= \sqrt{\exp(-\beta\psi_p) + \beta\psi_p - 1 + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \exp(-\beta\Delta\psi_i) [\exp(\beta\psi_p) - \beta\psi_p \exp(\beta\Delta\psi_i) - 1]} \end{aligned} \quad (18)$$

ואורך דב"י הוא:

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\varepsilon_s}{N_A q^2}} \quad (19)$$

ביטויים אלו מאפשרים לחשב את ביצועי הטרנזיסטור בטווח רחב יותר של נקודות עבודה. עם זאת, מאחר ולא ניתן לפתור את משוואות אלו בצורה אנליטית, יש להשתמש לשם כך בכלים נומריים. הקשר בין מתח השער והפוטנציאל בפני השטח הוא:

$$V_G - V_{FB} = -\frac{Q_s}{C_{ox}} + \psi_s = \frac{2kT\varepsilon_s}{C_{ox} q L_D} F(\beta\psi_p, \Delta\psi_i, n_{p0}/p_{p0}) + \psi_s \quad (20)$$

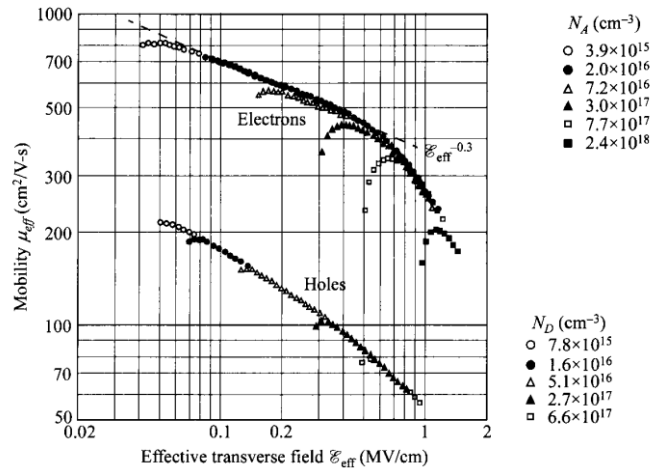
מוביליות אפקטיבית

מאחר ונשאי המטען בתעלה נמצאים רק בתוך שכבת היפוך דקה, מהירות הסחיפה שלהם והמוביליות שלהם μ תלויים בעובי של שכבת ההיפוך. כאשר מופעל שדה אורכי ($\mathcal{E}_y$), במקביל לפני השטח של המל"מ) חלש, מהירות הסחיפה ליניארית עם השדה האורכי והיחס בין השדה האורכי למהירות הסחיפה הוא המוביליות תחת שדה נמוך. עם זאת, למרות שהמוביליות היא קבועה עבור שדות אורכיים חלשים, ניסויים מראים כי היא משתנה עם השדה הניצב לפני השטח, $\mathcal{E}_x$. תלות זו, לא מושפעת באופן ישיר מעובי שכבת התחמוצת או הסימום במל"מ, אלא על ידי השפעתם על השדה הניצב בתוך שכבת ההיפוך. איור 2 מציג את תוצאות מדידת המוביליות האפקטיבית של אלקטרונים וחורים בתוך שכבת היפוך בסיליקון כתלות בשדה הניצב לפני השטח עבור מספר ערכי סימום. ניתן לראות כי גם עבור

רמות זיהום שונות, העקומות מתכנסות לעקומה אחת שמוגדרת על ידי גודל השדה הניצב. עבור טמפרטורה נתונה, המוביליות יורדת עם עליה בשדה הניצב האפקטיבי. השדה הניצב האפקטיבי הוא השדה הניצב לאחר מיצוע על התפלגות האלקטרונים בתעלה.

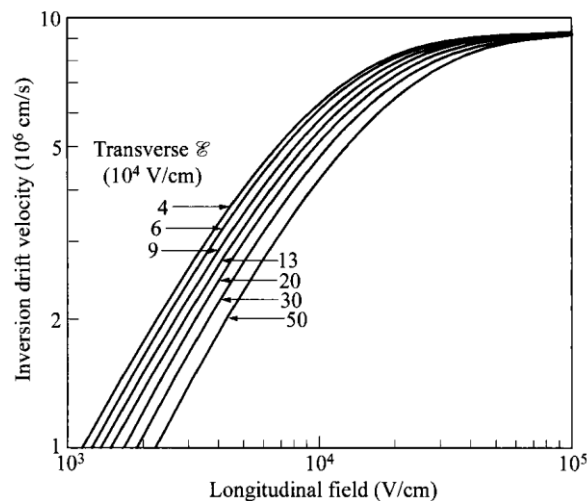
$$\varepsilon_{x,\text{eff}} = \frac{1}{\varepsilon_s} \left(Q_B + \frac{1}{2} Q_n \right) \quad (21)$$

המשמעות של משוואה זו היא שבאופן אפקטיבי, נשא מטען ממוצא בתוך שכבת ההיפוך, חווה את ההשפעה של על המטען בשכבת המיחסור, Q_B , אבל רק חצי מהמטען שבשכבת ההיפוך, Q_n . יש לשים לב כי ניתן להשתמש במוביליות זו בביטוי המתח-זרם שלמדנו עד כה, אך לא בביטויים ל- g_m מאחר וביטויים אלו מניחים כי המוביליות היא קבועה.



איור 2: המוביליות האפקטיבית של אלקטרונים וחורים בתוך שכבת היפוך בגודל השדה הניצב עבור ריכוזי מזהמים שונים.

כפי שראינו בהרצאה הקודמת, המוביליות משתנה עם השדה האורכי $\mathcal{E}_y$. מכאן נובע כי המוביליות תלויה בשדה החשמלי האורכי והניצב גם יחד. איור 3 מציג זאת מהירות הסחיפה בתוך שכבת ההיפוך כתלות בשדה האורכי עבור כמה ערכים של שדה ניצב. מאחר והמוביליות היא למעשה היחס $v/\mathcal{E}_y$, קל לראות כי היא יורדת עם התחזקות השדה האורכי עד שהיא מגיעה למהירות הרוויה הדומה לערכה בתוך שכבת סיליקון עבה. קל לראות כי בדומה להשפעת השדה הניצב שראינו באיור 2, המוביליות תחת שדה אורכי נמוך יורדת עם השדה הניצב, וכי השפעה זו יורדת ככל שהשדה האורכי גדל. השפעת השדה הניצב קטנה ככל שהשדה האורכי גדל כך שמהירות הרוויה כמעט ואיננה מושפעת מהשדה הניצב.



איור 3: מהירות הסחיפה של אלקטרונים בתוך שכבת ההיפוך בשדה האורכי והשדה הניצב.

השפעת הטמפרטורה

לטמפרטורה יש השפעה רבה על ביצועי ההתקן ובפרט על המוביליות, מתח הסף ועל מאפייני הפעולה מתחת למתח הסף. לדוגמא, המוביליות האפקטיבית בשכבת ההיפוך משתנה לפי T^{-2} בטמפרטורות סביב 300K ומתחי שער הגבוהים בהרבה ממתח הסף. כתוצאה מכך, הזרם בטרנזיסטור גדל ככל שהטמפרטורה יורדת. על מנת לבחון את השפעת הטמפרטורה על מתח הסף, נתבונן שוב בביטוי עבורו:

$$V_T = \phi_{ms} - \frac{Q_f}{C_{ox}} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\epsilon_s q N_A \psi_B}}{C_{ox}} \quad (22)$$

מאחר והפרש פונקציות העבודה, ϕ_{ms} , והמטען הקבוע בממשק בין שכבת התחמוצת והמל"מ, Q_f , קבועים עם הטמפרטורה, גזירה לפי הטמפרטורה של מתח הסף תיתן:

$$\frac{dV_T}{dT} = \frac{d\psi_B}{dT} \frac{dV_T}{d\psi_B} = \frac{d\psi_B}{dT} \left(2 + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{\frac{\epsilon_s q N_A}{\psi_B}} \right) \quad (23)$$

נזכור כי:

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (24)$$

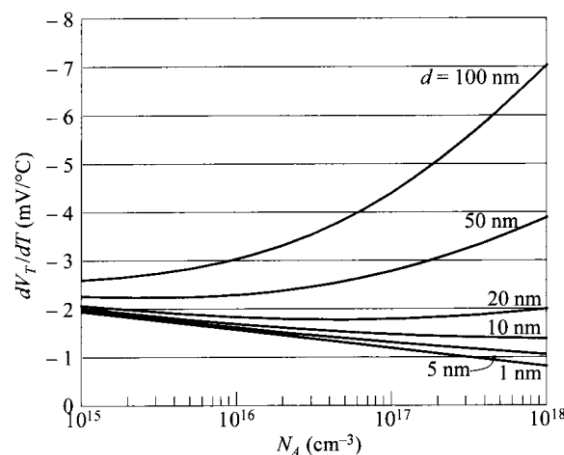
וכי:

$$n_i \propto T^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{E_{g0}}{2kT} \right) \quad (25)$$

כאשר E_{g0} הוא פער האנרגיה בטמפרטורה של 0K. על ידי גזירה והצבה נקבל כי:

$$\frac{d\psi_B}{dT} \approx \frac{1}{T} \left(\psi_B - \frac{E_{g0}}{2q} \right) \quad (26)$$

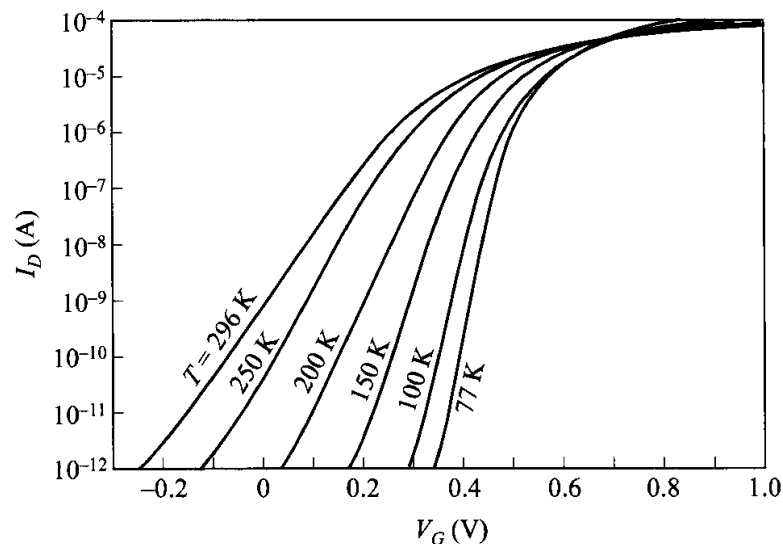
איור 4 מציג את תוצאת משוואה (23) עבור טרנזיסטור עשוי סיליקון, עם שער עשוי תחמוצת סיליקון בעוביים שונים כאשר הטמפרטורה היא טמפרטורת החדר. נשים לב כי עבור עוביים שונים של התחמוצת השינוי במתח הסף, $|dV_T/dT|$, יכול לגדול או לקטון.



איור 4: השינוי במתח הסף עם הטמפרטורה כתלות בריכוז המצע עבור טרנזיסטור סיליקון עם שכבת תחמוצת סיליקון בעוביים שונים בריכוז המצע. הטמפרטורה היא טמפרטורת החדר.

ככל שהטמפרטורה יורדת מאפייני הטרנזיסטור משתפרים ובמיוחד הביצועים שלו בתחום תת הסף. איור 5 מציג את אפיינים של טרנזיסטור בעל תעלה ארוכה ($L=9\mu m$) בטמפרטורות בין טמפרטורת החדר ל-77K. בין שתי הטמפרטורות האלו, מתח הסף עולה מ-0.25V ל-0.5V, וה- subthreshold swing יורד מ-80 מיליוולט לדקדה ל-22 מיליוולט לדקדה, שיפור של כמעט פי 4. שיפור זה נובע

בעיקר מהאיבר kT/q במשוואה (13). בנוסף לכך, זרם הטרנזיסטור גבוה יותר מאחר והמוביליות וה-transconductance עולות עם הירידה בטמפרטורה. בנוסף לאלו, עם הירידה בטמפרטורה גם זרמי הזליגה קטנים והתנגדות המוליכים יורדת כך שצריכת ההספק של הטרנזיסטור יורדת. כמובן שהחיסרון הגדול בעובדה בטמפרטורה נמוכה הוא הצורך לקרר את ההתקן. לדוגמא, על מנת להביא את ההתקן לטמפרטורה של 77K, על ההתקן להימצא בתוך חנקן נוזלי, מה שמגדיל בהרבה את המורכבות של המערכת.



איור 5: אופייני מתח זרם של טרנזיסטור בעל תעלה ארוכה ($L=9\mu\text{m}$) עבור כמה טמפרטורות שונות

סיכום

בהרצאה זו עסקנו בפעולת ההתקן כאשר המתח נמוך ממתח הסף. הגדרנו את ה-subthreshold swing המתאר את רגישות הזרם לשינוי במתח השער בתחום זה. ראינו כי בתנאים מסויימים S לא תלוי במתח ה-Drain, וכי הוא מגודר על ידי "מחלק מתח" בין רכיבי הקיבול של ההתקן- קיבול שכבת התחמוצת, קיבול שכבת המיחסור, והקיבול שנוצר בגלל מלכודות למטען בין שכבת התחמוצת והמל"מ. בנוסף לכך עסקנו במובילית האפקטיבית. ראינו כי בתוך שכבת ההיפוך הדקה, המוביליות לא מגדרת בדיוק כפי שהיא מוגדרת בתוך עומק המל"מ וכי היא מושפעת מהשדה הניצב לפני השטח. בנוסף לאלו, ראינו כי כמעט כל ביצועי הטרנזיסטור משתפרים כאשר מנמיכים את הטמפרטורה- הרגישות שלו למתח השער גבוהה יותר, וזרם הרוויה עולה גם כן.

בהרצאה הבאה נעסוק בטרנזיסטורים בעלי מבנה מורכב יותר. בהתקנים אלו, עושים שימוש בסימום לא אחיד בתוך המצע על מנת לשפר את ביצוע ההתקן עבור שימושים ספציפיים.

הדרך בשביל להגיע לביטוי שבמשוואה (26):

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_B}{dT} &= \frac{d}{dT} \left(\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \right) = \\ \frac{k}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) - \frac{kT}{q} \frac{d}{dT} \ln(n_i) &= \frac{1}{T} \psi_B - \frac{kT}{q} \frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dT}\end{aligned}\quad (27)$$

נזכור כי:

$$n_i \propto T^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{E_{g0}}{2kT} \right) \quad (28)$$

ולכן:

$$\begin{aligned}\frac{dn_i}{dT} &= A \left(\frac{3}{2T} T^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{E_{g0}}{2kT} \right) + \frac{E_{g0}}{2kT^2} T^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{E_{g0}}{2kT} \right) \right) \\ &= \left(\frac{3}{2T} n_i + \frac{E_{g0}}{2kT^2} n_i \right) = \frac{n_i}{T} \left(\frac{3kT + E_{g0}}{2kT} \right) \approx \frac{n_i}{T} \frac{E_{g0}}{2kT}\end{aligned}\quad (29)$$

נציב:

$$\frac{d\psi_B}{dT} = \frac{1}{T} \psi_B - \frac{kT}{q} \frac{1}{n_i} \frac{n_i}{T} \frac{E_{g0}}{2kT} = \frac{1}{T} \psi_B - \frac{E_{g0}}{2qT} = \frac{1}{T} \left(\psi_B - \frac{E_{g0}}{2q} \right) \quad (30)$$