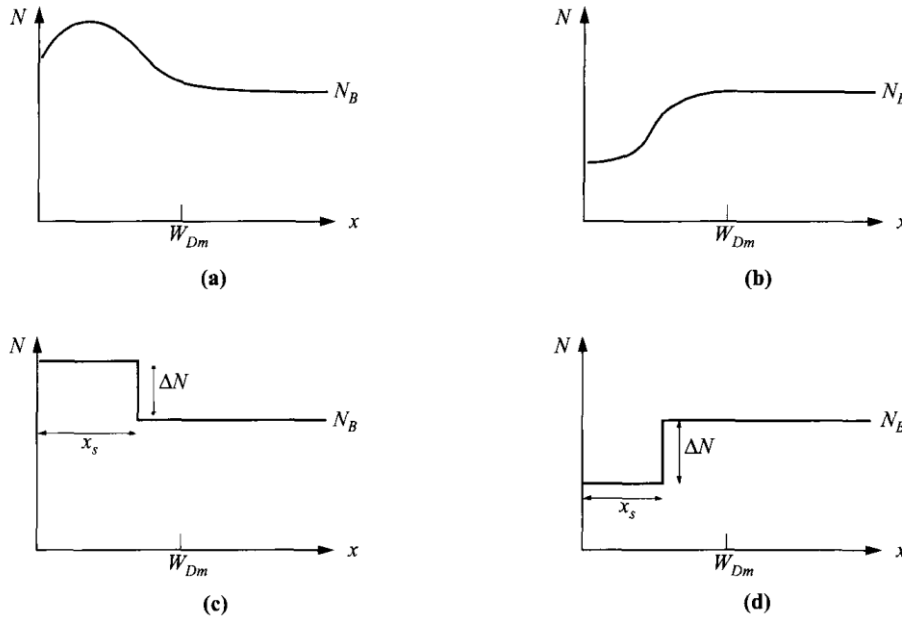


הרצאה 6: טרנזיסטורים עם סימון לא אחיד

עד כה, עסקנו בטרנזיסטורים בהם התפלגות המזהמים הייתה אחידה. עם זאת, בהתקנים מודרניים עושים שימוש בדרך כלל בהשתלת יונים על מנת ליצור התפלגות יונים מזהמים בתוך ההתקן על מנת לשפר את הביצועים של ההתקן בהתאם לאפליקציה הספציפית של המעגל בו ההתקן נמצא. לדוגמא, סימון נמוך יותר בעומק ההתקן יעזור להנמיך את הקיבול בין ה- Drain למצע וכן את אפקט המצע. לעומת זאת, סימון נמוך יותר בסמוך לפני השטח בין הסיליקון לתחמוצת ינמיך את מתח הסף ואת השדה החשמלי ולכן גם יגדיל את המוביליות בתוך התעלה. בנוסף, סימון גבוה יותר בעומק ההתקן יצמצם פריצה מסוג punch-through בין ה- source וה- drain. על כן, נתייחס בשלב ראשון לשני פרופילים של סימון: גבוה-נמוך (high-low), בו הסימון הוא גבוה בסמוך לפני השטח ונמוך בעומק ההתקן, ונמוך גבוה (low-high), בו הסימון נמוך לפני השטח וגבוה בעומק ההתקן. איור 1 a,b מציג את ההתפלגויות האלו. על מנת להקל על הניתוח של התקנים עם התפלגות מזהמים לא אחידה, אנו נקרב את התפלגות המזהמים לפונקציות מדרגה. איור 1 c,d מציג את הקרובים האלו.



איור 1: התפלגות מזהמים לא אחידה בטרנזיסטורי MOSFET: (a) גבוה-נמוך, (b) נמוך-גבוה, (c-d) קירוב של ההתפלגויות לפונקציות מדרגה.

ננתח את השפעת התפלגות המזהמים על ביצועי הטרנזיסטור. בפרט, נתבונן במתח הסף, עובי שכבת המיחסור, אשר משפיעה על ה- subthreshold swing, ועל השפעת מתח המצע. נשים לב כי הדבר המשמעותי ביותר בקביעת מתח הסף הוא התפלגות המזהמים בתוך אזור המיחסור. עם זאת, התפלגות המזהמים מחוץ לאזור המיחסור חשובה עבור קביעת הקיבול והרגישות של מתח הסף למתח המצע. על כן, נחזור למשוואות המנתחות את מתח הסף וננסה אותן מחדש עבור התפלגות מזהמים לא אחידה.

$$V_T = V_{FB} + \psi_s + \frac{Q_B}{C_{ox}} = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{q}{C_{ox}} \int_0^{W_{Dm}} N(x) dx \quad (1)$$

כאשר Q_B הוא סך כל המטען בשכבת המיחסור. גבולות האינטגרציה נקבעים על ידי העובי המקסימלי של שכבת המיחסור W_{Dm} . נמצא את גודל זה על ידי פתרון משוואת פואסון כאשר תנאי השפה הוא שהטרנזיסטור נמצא בסף ההיפוך.

$$\psi_s = 2\psi_B = \frac{q}{\epsilon_s} \int_0^{W_{Dm}} xN(x)dx \quad (2)$$

חשוב לציין כי כאשר הסימון בהתקן לא אחיד, הבטויים ל ψ_B ו- V_{FB} הופכים למורכבים יותר. עם זאת, ניתן לקרב את ערכים אלו לערכם כאשר הסימון הוא אחיד ושווה לסימון הרקע N_B מבלי לגרום לשגיאות גבוהות. קרוב זה מוצלח במיוחד כאשר $\psi_s = 2\psi_B$ שכן הוא משתנה באופן יחסית חלש עם ריכוז המזהמים.

סימון גבוה-נמוך

על מנת למצוא את מתח הסף עבור התפלגות מזהמים בה הסימון גבוה בסמוך לפני השטח נקרב את התפלגות המזהמים למדרגה ב- x_s בגובה ΔN כמתואר באיור 1c. עבור ערכים גבוהים של x_s בהם כל שכבת המיחסור נמצאת בין פני השטח ל- x_s , ניתן לקרב את הטרנזיסטור לטרנזיסטור עם ריכוז מזהמים קבוע השווה לריכוז הגובה בסמוך לפני השטח. במקרה הזה, מתח הסף יהיה בדיוק כפי שראינו בהרצאות הקודמות. עם זאת, אם רוחב שכבת המיחסור גדול מהאזור המסומם גבוה- $x_s < W_{Dm}$, יש למצוא את מתח הסף מחדש. ניתן למצוא את רוחב שכבת המיחסור מתוך משוואה (2):

$$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_B} \left(2\psi_B - \frac{q\Delta Nx_s^2}{2\epsilon_s} \right)} \quad (3)$$

נציב ונקבל את מתח הסף:

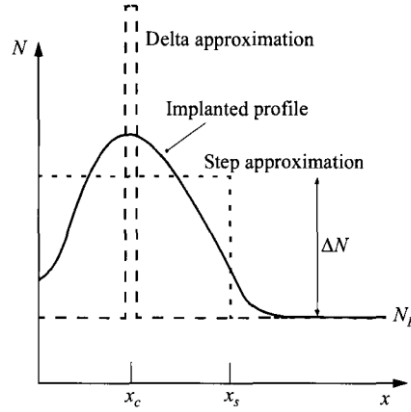
$$\begin{aligned} V_T &= V_{FB} + 2\psi_B + \frac{qN_B W_{Dm} + q\Delta Nx_s}{C_{ox}} \\ &= V_{FB} + 2\psi_B + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_s N_B \left(2\psi_B - \frac{q\Delta Nx_s^2}{2\epsilon_s} \right)} + \frac{q\Delta Nx_s}{C_{ox}} \end{aligned} \quad (4)$$

מתוך משוואות אלו ניתן לראות כי הגדלה של ריכוז המזהמים בסמוך לפני השטח מקטינה את רוחב שכבת המיחסור ומגדילה את מתח הסף. נשים לב כי השפעת המדרגה היא מקסימלית כאשר היא קרובה לפני השטח. על כן, עבור כמות מזהמים נתונה שהושתלה במל"מ (dose), השפעת מזהמים אלו גדלה ככל שהשתלת היונים נעשית בסמוך לפני השטח של ההתקן. במקרה הקיצוני בו ניתן לדמות את פרופיל ההשתלה כמטען משטחי בממשק בין המל"מ והתחמוצת (מדרגה ב- $x_s=0$), השינוי במתח הסף הוא:

$$\Delta V_T \approx \frac{qD_i}{C_{ox}} \quad (5)$$

כאשר $D_i = x_s \Delta N$ הוא סך כל היונים המשותלים. גישה זו נקראת "כיוון מתח הסף" (threshold voltage adjust) ויש לה השפעה דומה לשינוי הפרש פונקציות העבודה בין המתכת והמל"מ ϕ_{ms} , או הוספת מטען קבוע בשכבת התחמוצת.

הקירוב של התפלגות המזהמים לצורה של מדרגה יכול לשמש כקירוב ראשון עבור חישוב מתח הסף. על מנת לקבל תוצאות מדויקות יותר, יהיה עלינו להתייחס להתפלגות המזהמים עצמה. הסיבה לכך היא שקשה להגדיר את מיקום המדרגה מתוך הפלגות המזהמים האמיתית. איור 2 מציג תיאור של התפלגות המזהמים שנוצרים בתהליך השתלת יונים, וכן את הקירובים למדרגה ולפונקציית הלים. בדרך כלל, מתח הסף תלוי בסך מנת המזהמים (Dose) ומיקום "מרכז הכובד" של ההתפלגות x_c . על כן, ניתן לקרב את התפלגות המזהמים גם כפונקציית הלים במיקום $x=x_c$ כמתואר באיור 2.



איור 2: התפלגות מזהמים טיפוסית עבור השתלת יונים, והקירוב שלה לפונקציות מדרגה והלם.

על פי ההגדרות שנתנו להתפלגות המזהמים, המנה D_I ומרכז הכובד מקיימים:

$$D_I = \int_0^{W_{Dm}} \Delta N(x) dx \quad (6)$$

$$x_c = \frac{1}{D_I} \int_0^{W_{Dm}} x \Delta N(x) dx \quad (7)$$

בעזרת אלו, המשוואה המקבילה למשוואה (3) היא:

$$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_B} \left(2\psi_B - \frac{qD_I x_c}{\varepsilon_s} \right)} \quad (8)$$

נציב במשוואה (4) ונקבל את מתח הסף:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\varepsilon_s N_B \left(2\psi_B - \frac{qx_c D_I}{\varepsilon_s} \right)} + \frac{qD_I}{C_{ox}} \quad (9)$$

מעניין לבחון כיצד מתח הסף ורוחב שכבת המיחסור משתנים עם מיקום מרכז הכובד x_c עבור גודל מנה נתון. כאשר $x_c = 0$, המזהמים הם למעשה מטען משטחי בין המל"ם והתחמוצת והשינוי במתח הסף הוא $\Delta V_T = qD_I/C_{ox}$ כפי שקיבלנו קודם. ככל שמרכז הכובד מתרחק מפני השטח, השפעת הסימום קטנה, השינוי במתח הסף קטן יותר, ואזור המיחסור קטן גם כן. עבור ערך מסוים של x_c רוחב אזור המיחסור יהיה דומה ל- x_c . החל מנקודה זו, מיקום המזהמים למעשה קובע את גודל אזור המיחסור שכן נוצרת חפיפה בין אזור המיחסור שפרופיל הסימום יוצר ובין אזור המיחסור שנוצר על ידי כיפוף הפסים בפני השטח. כתוצאה מכך ישנו תחום בו אזור המיחסור גדל ככל שמרכז הכובד מתרחק מפני השטח. עם זאת, החל ממרחק מסוים, החפיפה בין אזורי המיחסור נגמרת, מרכז הכובד יהיה מחוץ לאזור המיחסור וכבר לא ישפיע כלל על מתח הסף. התנאי בו רוחב אזור המיחסור קרוב למיקום מרכז הכובד של הסימום מתקבל מתוך משוואה (8):

$$D_I(x_c = W_{Dm}) = \frac{N_B}{2x_c} (W_{Dm0}^2 - x_c^2) \quad (10)$$

כאשר W_{Dm0} הוא רוחב אזור המיחסור W_{Dm} כאשר הטרנזיסטור מזהם באופן אחיד בריכוז N_B .

אנו מעוניינים לראות כיצד השינוי בפורפיל המזהמים משפיע על ה- subthreshold swing, ועל הרגישות למתח המצע. ראינו בהרצאה הקודמת כי ה- subthreshold swing נקבע על ידי סכום קיבול שכבת התחמוצת וקיבול שכבת המיחסור. על כן, אחת שרוחב שכבת המיחסור ידוע (משוואה (8)), ניתן לחשב את קיבול שכבת המיחסור ואת ה-

subthreshold swing. עבור פרופיל סימון גבוה- נמוך, תוספת הסימון מקטינה את רוחב שכבת המיחסור ולכן היא מגדילה את הקיבול שלה. כתוצאה מכך, ה- subthreshold swing גדל, משמע, השינוי בזרם מתון יותר. את הרגישות למתח המצע ניתן לחשב על ידי החלפה של האיבר $2\psi_B$ שבתוך השורש שבמשוואה (9) ב- $2\psi_B + V_{BS}$.

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_s N_B \left(2\psi_B + V_{BS} - \frac{qx_c D_I}{\epsilon_s} \right) + \frac{qD_I}{C_{ox}}} \quad (11)$$

סימון נמוך- גבוה

האנליזה עבור פרופיל סימון נמוך- גבוה (נקרא גם retrograde profile), דומה לזו שעשינו עבור סימון גבוה נמוך, למעט שהפעם נבחר להחסיר ΔN מסימון הרקע. על כן, המשוואות עבור רוחב שכבת המיחסור ומתח הסף זהות עד כדי החלפת סימן:

$$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_B} \left(2\psi_B + \frac{q\Delta Nx_s^2}{2\epsilon_s} \right)} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_T &= V_{FB} + 2\psi_B + \frac{qN_B W_{Dm} - q\Delta Nx_s}{C_{ox}} \\ &= V_{FB} + 2\psi_B + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_s N_B \left(2\psi_B + \frac{q\Delta Nx_s^2}{2\epsilon_s} \right) - \frac{q\Delta Nx_s}{C_{ox}}} \end{aligned} \quad (13)$$

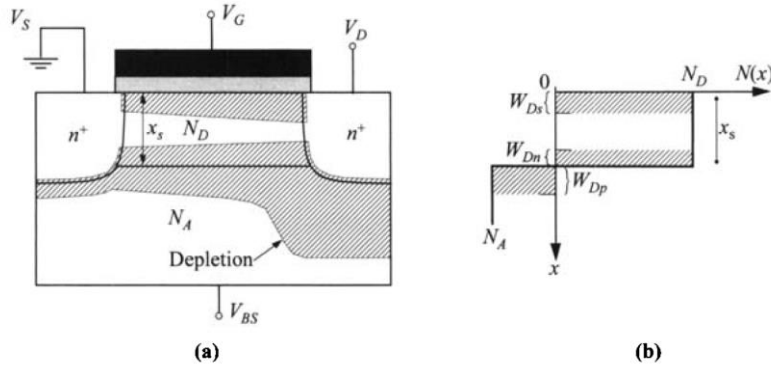
על כן, עבור פרופיל סימון זה, מתח הסף יורד עם הנמכת הסימון, ואילו רוחב שכבת המיחסור גדל.

התקני צומת קבורה (Buried junction devices)

המקרה הקיצוני של התפלגות נמוך-גבוה הוא התקן בו הסימון בפני השטח הפוך לזה שבמצע. במקרה הזה, ובמידה ויש באזור המסומם הסמוך פני השטח שכבה שאיננה במצב של מיחסור מלא (יש באזור זה שכבה שהיא קוואזי-ניטרלית), זרם יוכל לזרום בשכבה זו. התקנים אלו נקראים התקני צומת קבורה- buried junction devices. איור 3a מציג חתך של טרנזיסטור תעלה קבורה עם תעלה מסוג n. מתח השער ישנה את מידת המיחסור של פני השטח של ההתקן ועל ידי כך יקבע את רוחב תעלת ההולכה ועל ידי כך את הזרם. עבור מתח חיובי מספיק גדול, התעלה תהיה פתוחה לחלוטין. בנוסף, ניתן ליצור שכבת אקומולציה של אלקטרונים בסמוך לפני השטח של ההתקן ועל ידי כך ליצור שתי תעלות הולכה מקבילות.

לתעלת ההולכה הנוצרת כתוצאה מאקומולציה של נשאי מטען בסמוך לפני השטח יש מאפיינים דומים לאלו של שכבת היפוך. לכן נתמקד בתעלה הקבורה. איור 3b מראה את מבנה התעלה ואת הגדלים העיקריים בה. איור 4 מתאר את דיאגרמת הפסים עבור התקן זה תחת מספר נקודות עבודה. בגלל אזורי המיחסור שבסמוך לפני השטח וצומת ה- n-p שבעומק ההתקן, עובי השכבה שבה מתבצעת ההולכה הוא $X_s - W_{Dn} - W_{Ds}$. רוחב שכבת המיחסור שבסמוך לפני השטח דומה לזה שבקבלי MOS רגילים:

$$W_{Ds} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{FB} + \psi_{bi} - V_G) + \frac{\epsilon_s^2}{C_{ox}^2} - \frac{\epsilon_s}{C_{ox}}} \quad (14)$$



איור 3: מבנה של טרנזיסטור עם צומת קבורה תחת מתח (a) והתפלגות המזהמים ואזורי המיחסור בחתך ההתקן (b).

כיפוף הפסים בסמוך לפני השטח יהיה אפס כאשר רוחב שכבת המיחסור יהיה 0. על כן, המתח הדרוש בכדי ליישר את הפסים בסמוך לפני השטח הוא:

$$V_{FB}^* = V_{FB} + \psi_{bi} \quad (15)$$

כאשר V_{FB} הוא מתח יישור הפסים אשר מוגדר על ידי הפרש פונקציות העבודה של המתכת והמל"מ ומטען הכלוא בתחמוצת. נשים לב כי ל- V_{FB}^* יש משמעות מעט שונה במקרה הזה מאשר בהרצאות הקודמות שכן מתח יישור הפסים מתייחס ליישור של הפסים של השכבה מסוג n שקרובה לפני השטח ולא של כל ההתקן. רוחב אזור המיחסור התחתון זהה לזה שבצומת n-p רגילה:

$$W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_{bi}}{qN_D} \left(\frac{N_A}{N_A + N_D} \right)} \quad (16)$$

כאשר מתח השער יהיה שווה למתח הסף, אזורי המיחסור יתפסו את אזור ה- n כולו:

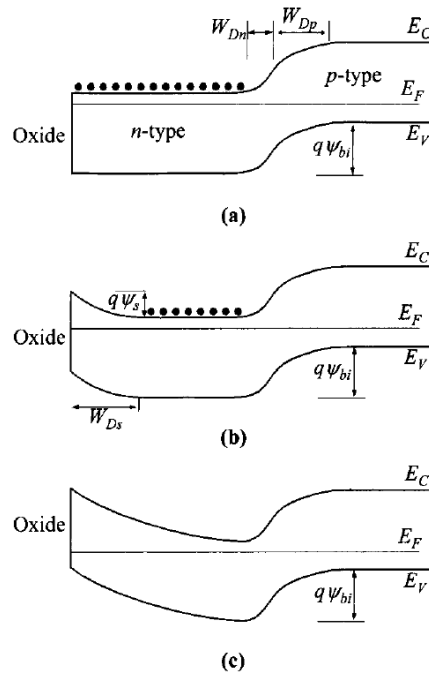
$$x_s = W_{Ds} + W_{Dn} \quad (17)$$

מכאן מתקבל כי מתח הסף הוא:

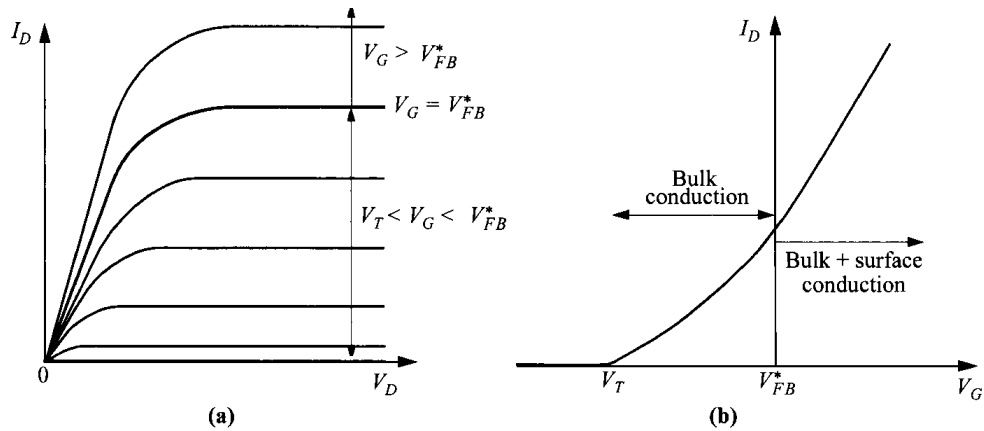
$$V_T = V_{FB}^* - qN_D x_s \left(\frac{x_s}{2\epsilon_s} + \frac{1}{C_{ox}} \right) + \left(\frac{x_s}{\epsilon_s} + \frac{1}{C_{ox}} \right) \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_D N_A \psi_{bi}}{N_D + N_A}} - \frac{N_A \psi_{bi}}{N_D + N_A} \quad (18)$$

אחת שממדי התעלה ידועים, ניתן לחשב את סך כל המטען בתעלה. כמות המטען בעומק ההתקן Q_B , ושכבת ההיפוך בפני השטח Q_I משתנים עם מתח השער:

$$\begin{aligned} Q &= Q_B = (x_s - W_{Ds} - W_{Dn})N_D & V_T < V_G < V_{FB}^* \\ Q &= Q_B + Q_I = (x_s - W_{Dn})N_D + C_{ox}(V_G - V_{FB}^*) & V_{FB}^* < V_G \end{aligned} \quad (19)$$



איור 4: דיאגרמת פסים של טרנזיסטור צומת קבורה עבור $V_G = V_{FB}^*$, (a) מיחסור של פני השטח (b), ומתח הסף (c).



איור 5: טרנזיסטור MOSFET עם תעלה קבורה: אופיין מתח זרם (a), וזרם כתלות במתח השער בתחום הליניארי (V_D נמוך).

בהינתן מטען התעלה, ניתן לחשב את הזרם דרך ה-drain כפי שעשינו בהרצאות הקודמות. עם זאת, בהשוואה להתקני MOSFET רגילים, המשוואות עבור התקני תעלה קבורה מורכבות יותר מאחר והצימוד בין מתח השער (או קיבול השער) למתחי אזורי המיחסור (או הקיבול שלהם) תלוי במתח השער. מסיבה זו לא נחזור על הפיתוח של המשוואות. נסמן ב- μ_s ו- μ_B את המוביליות בפני השטח ובעומק ההתקן בהתאמה. ראשית נגדיר את הגדלים הבאים:

$$\alpha = 1 + (1 + \sigma) \frac{\gamma}{4\sqrt{\psi_{bi}}} \quad \gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_{ox}}$$

$$r = (1 + \sigma) \frac{\mu_s}{\mu_B} \quad \sigma = \frac{C_{ox} x_s}{\varepsilon_s} \left(\frac{C_{ox} x_s}{2\varepsilon_s} + 1 \right)$$

עבור מתחים בתחום $V_T \leq V_G \leq V_{FB}^*$ מתקיים:

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu_B C_{ox}}{1 + \sigma} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{1}{2} \alpha V_D^2 \right] \quad V_D \leq V_{Dsat} \quad (20)$$

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu_B C_{ox}}{1 + \sigma} \frac{(V_G - V_T)^2}{2\alpha} \quad V_D \geq V_{Dsat}$$

מתוך משוואות אלו ניתן לראות כי בתחום מתחים זה יש רק תעלת הולכה אחת בעומק ההתקן, ואופיין הטנזיסטור נראה איכותית כמו זה של טרנזיסטור MOSFET רגיל.

עבור תחום המתחים $V_G \geq V_{FB}^*$:

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu_B C_{ox}}{1 + \sigma} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{1}{2} \alpha V_D^2 + (r - 1)(V_G - V_{FB}^*) V_D - \frac{1}{2} V_D^2 \right] \quad V_D < V_G - V_{FB}^*$$

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu_B C_{ox}}{1 + \sigma} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{1}{2} \alpha V_D^2 + \frac{1}{2} (r - 1)(V_G - V_{FB}^*)^2 \right] \quad V_G - V_{FB}^* \leq V_D \leq V_{Dsat} \quad (21)$$

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu_B C_{ox}}{1 + \sigma} \left[\frac{(V_G - V_T)^2}{2\alpha} + \frac{1}{2} (r - 1)(V_G - V_{FB}^*)^2 \right] \quad V_D \geq V_{Dsat}$$

כעת ניתן להבחין בשני מגנוני הולכה אשר נמצאים במקביל אחד לשני- הולכה דרך התעלה שבפני השטח אשר מתח הסף האפקטיבי שלה הוא V_{FB}^* , והולכה דרך התעלה שבעומק ההתקן. מגנוני הולכה אלו יכולים להיות בתחום הרוויה או בתחום הליניארי על פי מתח השער. נציין כי משוואות אלו הן עבור טרנזיסטור עם תעלה רחבה, ומובילות קבועה. ניתן להעריך את זרם הרוויה כתוצאה מרוויות מהירות בעזרת $I_{Dsat} \approx Q v_s W$ איור a5 מתאר באופן איכותי את זרם ה- drain בטרנזיסטור תעלה קבורה כתלות במתח ה- drain עבור מספר מתחי שער. איור b5 מציג באופן איכותי את זרם ה- drain כתלות במתח השער כאשר הטרנזיסטור נמצא במצב הליניארי (V_D נמוך).

כפי שניתן לראות באיור 3a, בטרנזיסטורי תעלה קבורה ישנו אזור מסוג n אשר מחבר בין ה- source וה- drain אשר מסוממים n^+ (או אזור מסומם p בין source ו- drain אשר מסוממים p^+ בתקן עם תעלה מסוג p). כתוצאה מכך, בדרך כלל התקנים אלו יהיו מסוג Normally ON. עבור N_D נתון, מתח הסף יהיה שלילי יותר ככל x_s גדול יותר. עם זאת, מאחר שיש גודל מקסימלי לשכבת המיחסור שבסמוך לשער, אם N_D או x_s גבוהים מדי, W_{Ds} יגיע לערכו המקסימלי מבלי ליצור מיחסור מלא של התעלה כך שלא ניתן יהיה לסגור את הטרנזיסטור. עבור N_D נתון, x_s המקסימלי מקיים:

$$x_s|_{max} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q N_D}} \left(\sqrt{2\psi_B} + \sqrt{\frac{N_A \psi_{bi}}{N_A + N_D}} \right) \quad (22)$$

יש לציין כי באופן תיאורטי ניתן ליצור טרנזיסטור כזה שיהיה מסוג Normally OFF לדוגמא, בעזרת בחירה של מתכת עם פונקציית עבודה מתאימה עבור השער.

בטרנזיסטורים עם תעלה קבורה יש למתח המצע השפעה ישירה על ביצועי הטרנזיסטור. ניתן להוסיף את השפעת מתח המצע למשוואות (16)-(21) על ידי החלפת ψ_{bi} ב- $\psi_{bi} - V_{BS}$ כאשר V_{BS} הוא שלילי. משמעות הדבר היא שניתן להתייחס למצע כאל "שער אחורי" ולקבוע בעזרתו את מתח הסף, W_{Dn} .

כעת נתמקד בזרמי תת-סף בטרנזיסטורים אלו. עבור מתח שער שהוא מספיק שלילי, שני אזורי המיחסור יתאחדו (pinch off) ויחסמו את הולכת האלקטרונים בתעלה. במצב זה רוחב התעלה $x_s = W_{Dn} + W_{Ds}$ כמתואר באיור 4.

במצב זה, הולכה עבור מתחים שליליים ממתח הסף היא תוצר של אזורים שאינם ממוחסרים לגמרי ובהם הזרם הוא תוצר של דיפוזיה של נשאי מטען בתוך אזור המיחסור. בדומה לטרנזיסטור MOSFET רגיל, זרם התת-סף עולה אקספוננציאלית עם מתח השער וה- subthreshold swing יהיה תוצר של "מחלק קיבול" בדומה לביטוי $S \propto (C_{ox} + C_D)/C_{ox}$ שראינו בהרצאה הקודמת. עם זאת, אנו נחליף את הביטויים לקיבול על מנת לתאר את התפלגות המטען בטרנזיסטור תעלה קבורה. מתוך איור 4 ניתן לראות כי הריכוז המקסימלי של אלקטרונים הוא בנקודה $x = x_s - W_{Dn}$. על כן, יש להחליף את הקיבול C_D עם קיבול שיתאים לקיבול שכבות המיחסור של הצומת שבתוך המצע- $C'_D = \epsilon_s / (W_{Dn} + W_{Dp})$, ואילו את קיבול השער אשר מחובר בטור לקיבול שכבת המיחסור שבסמוך לפני השטח ϵ_s / W_{Ds} . מתוך אלו נקבל את הביטוי הבא:

$$S = \ln(10) \frac{kT}{q} \left[1 + \frac{\epsilon_{ox} W_{Ds} + \epsilon_s d}{\epsilon_{ox} (W_{Dn} + W_{Dp})} \right] \quad (23)$$

את הגדלים של כל שכבות המיחסור ניקח על פי גודלם כאשר מתח השער הוא בדיוק מתח הסף.

להתקני תעלה קבורה יש בדרך כלל מוביליות גבוהה יותר מטרנזיסטורים רגילים שכן הם לא מושפעים על ידי פיזור שמגביל את המוביליות של נשאי מטען שזורמים בסמוך לפני השטח. התקנים אלו גם פחות מושפעים מאפקטים שנובעים מהתעלה הקצרה כמו בעיות אמיונות בגלל אלקטרונים חמים (ראו את הנושא הבא). מצד שני, מאחר והמרחק בין השער והתעלה גדול יותר והוא תלוי במתח, ה- *transconductance* של טרנזיסטורים אלו נמוכה יותר והיא יכולה להשתנות עם תנאי הטרנזיסטור. נשים לב כי אם נחליף את השער בצומת $p-n$ או בצומת שוטקי נקבל טרנזיסטור מסוג *JFET* או *MESFET* עליהם לא נדבר בקורס זה.

סיכום

בהרצאה זו למדנו על התקנים בעלי פורפיל סימון לא אחיד בתוך התעלה. בחנו שלושה סוגי טרנזיסטורים על פי סוג הסימון שלהם- נמוך גבוה, גבוה נמוך, ותעלה קבורה שהוא למעשה מקרה קיצוני יותר של טרנזיסטור עם סימון נמוך-גובה. ראינו כי על ידי כיוון של פרופיל הסימון ניתן לכוון את מתח הסף ואת רוחב אזור המיחסור שבסמוך לשער. כמו כן, ראינו כי בטרנזיסטור עם תעלה קבורה ישנן למעשה שתי תעלות הולכה- אחת דרך האזור המסומם הפוך מהמצע, ואחת בסמוך לממשק בין המל"מ ושכבת התחמוצת. בהתקנים אלו, ניתן להשתמש במגע המצע כשער נוסף אך ההרחקה של התעלה מפני השטח גורמת ל- *transconductance* נמוך יותר. בנוסף מאחר והאזור המסומם מאפשר הולכה בין ה- Source וה- Drain, טרנזיסטורים אלו הם מסוג Normally ON. בהרצאה הבאה נעסוק עוד בהשפעת מיזעור על ההולכה בטרנזיסטור ועל אפקטים שונים הנגרמים בגלל תעלות הולכה קצרות.

נספח- הדרך להגיע למשוואה (3):

על מנת למצוא את רוחב אזור המיחסור עלינו לחזור על התהליך בו אנו מחשבים את התפלגות הפונטציאל בשכבת המיחסור. ראשית נמצא את השדה. איור 6 מתאר את התפלגות השדה בהתקן. נסמן את השדה על פי התחום בו הוא נמצא: $\mathcal{E}_m$ הוא השדה המקסימלי והוא נמצא בממשק בין המל"מ והתחמוצת ($x=0$). $\mathcal{E}_1(x)$ הוא השדה בתחום $0 \leq x \leq x_s$ כאשר נגדיר $\mathcal{E}_1(x_s) = \mathcal{E}_0$, ו- $\mathcal{E}_2(x)$ הוא השדה בתחום $x_s \leq x \leq W_{Dm}$. מאחר ובכל אחד מהתחומים ריכוז המזהמים הוא קבוע, התפלגות השדה תהיה ליניארית בכל אחד מהתחומים. כמו כן, השדה חייב להיות רציף ב- $x = x_s$ שכן יש בנקודה זו מדרגה בצפיפות המטען. לכן,

$$\mathcal{E}_1(x) = \mathcal{E}_m - \frac{qN_s x}{\epsilon_s} \quad (24)$$

כאשר $N_s = N_B + \Delta N$ הוא ריכוז המזהמים במדרגה. מאחר ויש רציפות שדה, ומתוך ההגדה של $\mathcal{E}_0$ מתקבל כי:

$$\mathcal{E}_0(x) = \mathcal{E}_m - \frac{qN_s x_s}{\epsilon_s} \quad (25)$$

כמו כן:

$$\mathcal{E}_2(x) = \mathcal{E}_0 - \frac{qN_B(x - x_s)}{\epsilon_s} \quad (26)$$

בקצה אזור המיחסור השדה מתאפס ולכן:

$$\mathcal{E}_2(W_{Dm}) = 0 = \mathcal{E}_0 - \frac{qN_B(W_{Dm} - x_s)}{\epsilon_s} = \mathcal{E}_m - \frac{qN_s x_s}{\epsilon_s} - \frac{qN_B(W_{Dm} - x_s)}{\epsilon_s} \quad (27)$$

ולכן:

$$\mathcal{E}_m = \frac{qN_B W_{Dm}}{\epsilon_s} + \frac{qx_s(N_s - N_B)}{\epsilon_s} \quad (28)$$

נמצא את השדה בנקודת המדרגה:

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_m - \frac{qN_s x_s}{\epsilon_s} = \frac{qN_B W_{Dm}}{\epsilon_s} + \frac{qx_s(N_s - N_B)}{\epsilon_s} - \frac{qN_s x_s}{\epsilon_s} = \frac{qN_B}{\epsilon_s} (W_{Dm} - x_s) \quad (29)$$

מפל הפוטנציאל על $\psi_s + V_{Bs}$ הוא בדיוק השטח שנוצר מתחת להתפלגות השדה בהתקן כפי שמתואר באיור 6. מתוך האיור קל לחלק את השטח לשלושה אזורים ולקבל:

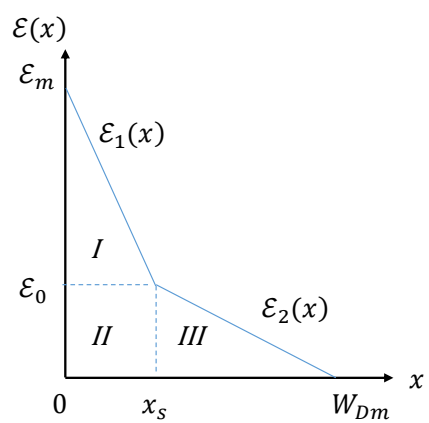
$$\psi_s + V_{Bs} = (\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_0) \frac{x_s}{2} + \mathcal{E}_0 x_s + \mathcal{E}_0 \frac{(W_{Dm} - x_s)}{2} \quad (30)$$

נציב את הביטויים ונקבל:

$$\psi_s + V_{Bs} = \frac{qN_s x_s^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_B}{2\epsilon_s} (W_{Dm}^2 - x_s^2) \quad (31)$$

נחלץ את רוחב אזור המיחסור ונציב $N_s - N_B = \Delta N$:

$$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_B} \left(\psi_s + V_{Bs} - \frac{q\Delta N}{2\epsilon_s} x_s^2 \right)} \quad (32)$$



איור 6: תיאור מקורב של התפלגות השדה עבור התפלגות מזהמים גבוה-נמוך.