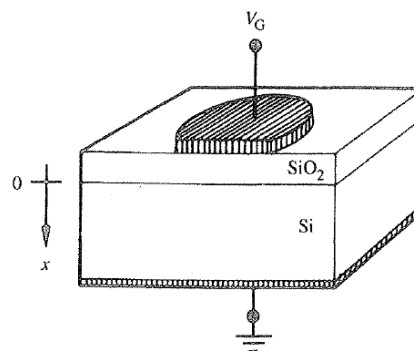


הרצאה 3- MOSFET

קבל MOS- הקדמה

טרנזיסטורי MOSFET מובוססים על קבל ה- MOS (Metal- Oxide- Semiconductor) המהווה את אחת מאבני הבניין הבסיסיות ביותר באלקטרוניקה המודרנית. איור 1 מציג תרשים של קבל MOS פשוט. ברוב המקרים, הקבל יהיה מורכב ממצע של סיליקון שעליו מגדלים שכבה דקה מאוד של תחמוצת (חומר מבודד) ועליה שכבת מתכת. ישנם מקרים בהם התקנים אלו נקראים קבלי MIS כדי להדגיש שהמבודד הוא לא בהכרח תחמוצת. עם זאת, מאחר ויחסית קל לגדל שכבות דקות של תחמוצת סיליקון (SiO_2) על סיליקון, עד אמצע שנות האלפיים נעשה שימוש בתחמוצת זו כמעט באופן בלעדי. בסביבות השנה 2007 נעשה מעבר הדרגתי להתקנים המבוססים על HfO_2 בגלל שהקבוע הדיאלקטרי של חומר זה גובהה יותר (נבין בהמשך מה החשיבות של הקבוע הדיאלקטרי של התחמוצת עבור ההתקנים האלו). בדרך כלל, שכבת המתכת, שנקראת שער (gate), עשויה מאלומיניום או מפולי-סיליקון מנוון.



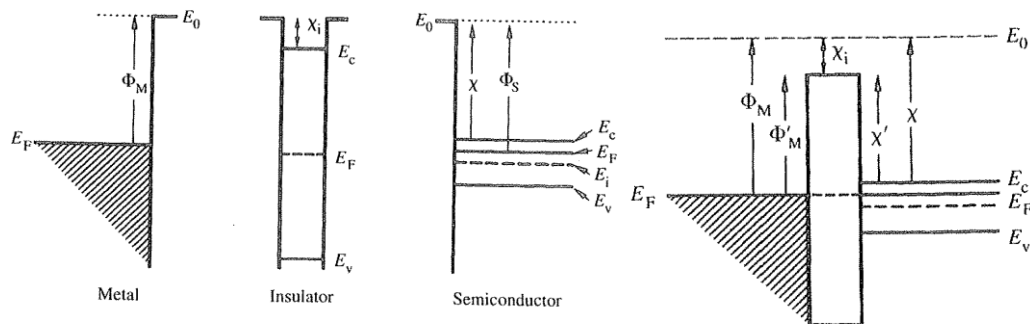
איור 1: תרשים של קבל MOS (מתוך Pierret)

בשלב ראשון ננתח את הביצועים של קבל MOS אידיאלי. קבל MOS אידיאלי מקיים את התכונות הבאות:

1. השער המתכתי עבה מספיק כך שאין בתוכו מפל פוטנציאל.
2. שכבת התחמוצת היא מבודד מושלם כך שלא זורם דרכה זרם תחת כל מתח חיצוני שמופעל.
3. אין מטען קבוע בשכבת התחמוצת או בממשק בינה לבין השכבות האחרות.
4. המל"ם מזוהם בצורה אחידה.
5. המל"ם עבה מספיק – בכל מתח חיצוני – יהיה אזור ללא שדה (בדומה לאזור הקוואזי-ניטרלי בדיודה).
6. המגע האחורי של המל"ם הוא מגע אוהמי.
7. הקבל הוא חד ממדי (המבנה הוא אינסופי ואחיד בשני הממדים האחרים).
8. מניחים שפונקציות העבודה של המל"ם והמתכת שוות: $\Phi_M = \Phi_S = \chi + (E_C - E_F)_{FB}$. הנחה זו נדרשת לשם פישוט המודל המתמטי ולא בגלל התכונות הפיסיקליות שהיא מגדירה.

בשלב ראשון ננתח את דיאגרמות הפסים של קבל ה- MOS. איור 2 מציג את דיאגרמות הפסים של הרכיבים השונים שמרכיבים את קבל ה- MOS כאשר אין בניהם צימוד חשמלי (שלושת התרשימים השמאליים). התרשים הימני באיור 2 מציג את דיאגרמת הפסים של קבל ה- MOS כולו.

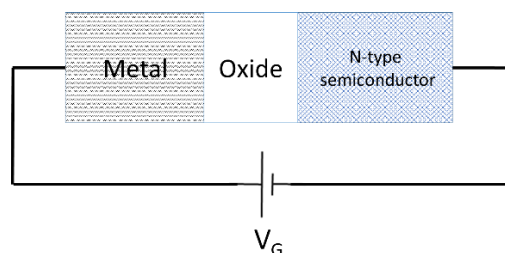
כאשר נוצר הצימוד בין החומרים ובהנחה שהמערכת נמצאת בשיווי משקל, רמת פרמי חייבת להיות קבועה לאורך כל ההתקן. בנוסף, מאחר ופונקציות העבודה של המתכת והמל"ם שוות ואין מטען שכלוא בממשקים בין החומרים, גם רמת הוואקום קבועה לאורך כל ההתקן. על כן, תחת ההנחות האלו, אין כיפוף פסים בין המתכת והמל"ם.



איור 2: דיאגרמת פסים עבור הרכיבים של קבל MOS כאשר אין צימוד חשמלי ביניהם (שלושת התרשימים שבצד שמאל), ודיאגרמת פסים של קבל MOS אידיאלי בו פונקציית העבודה של המתכת והמל"מ שוות כך שאין כיפוף פסים (צד ימין).

קבל MOS תחת מתח – ניתוח איכותי

ננתח את דיאגרמות הפסים של קבל ה-MOS כאשר מופעל עליו מתח. על פי ההנחות שכבת התחמוצת היא מבודד מושלם ועל כן, גם בהפעלת מתח, לא זורם זרם בהתקן. כתוצאה מכך, בדומה לקבל רגיל, בהפעלת מתח יצטבר מטען חיובי בצד אחד של קבל ה-MOS ומטען שלילי בצד השני שלו. לדוגמה, כאשר יופעל ממתח חיובי, אלקטרונים מהמתכת יעברו דרך המוליכים ומקור המתח למל"מ ויצטברו סמוך למגע בין המל"מ והתחמוצת. ה"חוסר" באלקטרונים במתכת שקול למטען חיובי שנצבר במגע בין המתכת לתחמוצת.



איור 3: תרשים מקורב של קבל MOS תחת מתח.

מאחר ולא זורם זרם בהתקן, רמות פרמי יהיו קבועות. עם זאת, מאחר ומופעל מתח בין המל"מ והשער, הפרש המתחים מגדיר את הפער בין רמת פרמי במתכת ובמל"מ:

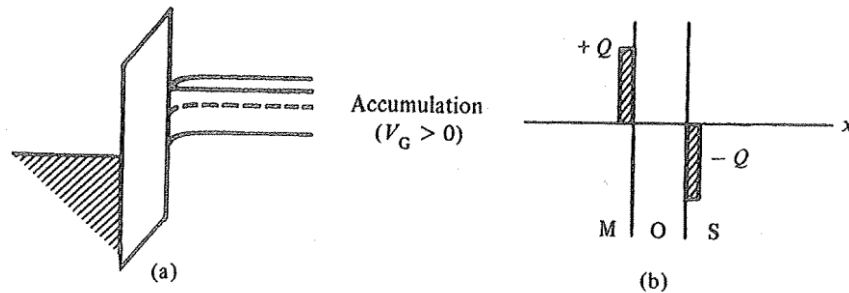
$$E_F(\text{metal}) - E_F(\text{semiconductor}) = -qV_G \quad (1)$$

על פי הגדרה זו, כאשר מתח השער הוא חיובי, רמת פרמי במתכת תהיה נמוכה מזו במל"מ ואילו כאשר מתח השער הוא שלילי, רמת פרמי במתכת תהיה גבוהה יחסית לזו במל"מ. הפרש המתחים המוגדר על ידי המתח המופעל "טיפול" על חלקים שונים במבנה. על פי ההנחות, מאחר ואין מטען כלוא בשכבת התחמוצת, השדה בתוכה הוא קבוע והתפלגות הפוטנציאל בה היא ליניארית. באופן דומה, מאחר ואין מטען שכלוא בנקודת הממשק בין התחמוצת והמל"מ (הנחה מספר 3) השדה בהתקן הוא רציף ועל כן השדה חשמלי שונה מ-0 בממשק בין המל"מ לתחמוצת מה שיוביל לכיפוף פסים במל"מ.

ננתח מספר מצבי עבודה של קבל MOS הבנוי מחומר מסוג n תחת ממתחים שונים. המצבים נבדלים ביניהם בהשפעה שיש למתח המופעל על המטען בנקודת הממשק בין המל"מ והתחמוצת. נבחין בין שלושה מצבי עבודה: אקומולציה (Accumulation), מיחסור (depletion), והיפוך (Inversion).

$V_G > 0$ – אקומולציה (accumulation)

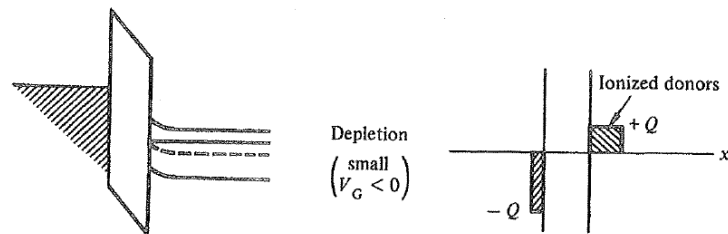
איור 4a מציג את דיאגרמת הפסים של קבל MOS הבנוי מחומר מסוג n תחת ממתח חיובי ואיור 4b מציג את התפלגות המטען במצב זה (בקירוב). בהפעלת ממתח חיובי רמת פרמי במל"מ גבוהה מזו במתכת ועל כן פסי האנרגיה בתחמוצת מתכופפים בהתאם. מאחר ואי הרציפות ברמות הערכיות וההולכה בממשק בין חומרים היא בעלת גודל קבוע (גודל זה תלוי בחומרים עצמם אבל לא במתח המופעל), יהיה גם כיפוף פסים כלפי מטה סמוך לממשק בין המל"מ והתחמוצת. כיפוף פסים זה גורם להצטברות (אקומולציה) של אלקטרונים בסמוך לממשק בין שני החומרים על פי $n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i(x)}{kT}\right)$. על פי ההנחות, המל"מ הוא עבה כך שיש בו אזור קוואזי נייטרלי בו אין שדה חשמלי ועל כן, כיפוף הפסים והשדה מתאפסים מספיק רחוק מהממשק בין המל"מ והתחמוצת. כפי שראים בתרשים הפלגות המטען, מטען שלילי יצטבר בסמוך לממשק בין המל"מ לתחמוצת ואילו מטען חיובי יצטבר על פני השטח של המתכת.



איור 4: דיאגרמת פסים (a) וקירוב של התפלגות המטען (b) של קבל MOS תחת מתח שער חיובי הגורם לאקומולציה של מטען בפני השטח של המל"מ.

מתח $V_G < 0$, כאשר V_G קטן – depletion, מיחסור

כאשר מופעל ממתח שלילי קטן על הקבל, רמת פרמי במל"מ תהיה נמוכה יותר מאשר במתכת. מסיבה זו, כיפוף הפסים יהיה הפוך מזה שבדוגמא הקודמת. כמו קודם, השדה קבוע בשכבת התחמוצת והתפלגות הפוטנציאל בה היא ליניארית. כעת, כיפוף הפסים בממשק בין המל"מ לתחמוצת הוא כלפי מעלה כך שבממשק בין שני החומרים רמת פרמי במל"מ מתרחקת מתחתית פס ההולכה. כתוצאה מכך, ריכוז האלקטרונים יורד ונוצרת שכבת מיחסור סמוך לפני השטח של המל"מ. במקרה הזה אנו מניחים שהממתח השלילי הוא קטן כך שרמת פרמי לא יורדת מתחת לרמה האניטרלית סמוך לפני השטח של המל"מ. המשמעות של הנחה זו היא שבפני השטח אלקטרונים הם עדיין נשאי הרוב. צד שמאל באיור 5 מראה את דיאגרמת הפסים בקבל עבור מצב זה. צד ימין באיור 5 מציג קירוב של התפלגות המטען בקבל עבור מצב זה. כיפוף הפסים גורם לירידה בריכוז האלקטרונים סמוך לפני השטח של המל"מ. כתוצאה מכך, סך כל המטען במל"מ, הכולל דונונים מיוננים ואלקטרונים, הוא חיובי.



איור 5: דיאגרמת פסים וקירוב של התפלגות המטען של קבל MOS תחת מתח שער שלילי הגורם למיחסור של מטען בפני השטח של המל"מ.

מתח $V_G < 0$, $V_G = V_T$ – סף היפוך (inversion threshold)

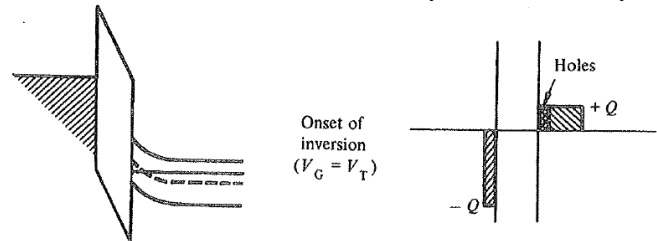
במצב הקודם הנחנו שהמתח המופעל קטן ממתח הסף V_T . איור 6 מציג דיאגרמת פסים והתפלגות מטען מקורבת כאשר המתחים המופעלים חזקים מספיק בשביל לכופף את הפסים עד שרמת פרמי נמצאת מתחת לרמה האניטרלית סמוך לממשק בין המל"מ לתחמוצת. לכן, ישנה שכבה דקה סמוך לממשק בין המל"מ לתחמוצת בה החורים הם נשאי הרוב. נגדיר את מתח הסף להיות המתח בו

בממשק בין המל"מ לתחמוצת ריכוז החורים שווה לריכוז הדונורים $p=N_D$. במצב זה, המטען החיובי במל"מ כולל הן את הדונורים והן חורים שהצטברו סמוך לפני השטח. נמצא את מיקום רמת פרמי האינטריזית במצב זה:

$$p(\text{surface}) = N_D \Rightarrow n_i e^{\frac{E_i(\text{surface}) - E_F}{kT}} = n_{\text{bulk}} = n_i e^{\frac{E_F - E_i(\text{bulk})}{kT}} \quad (2)$$

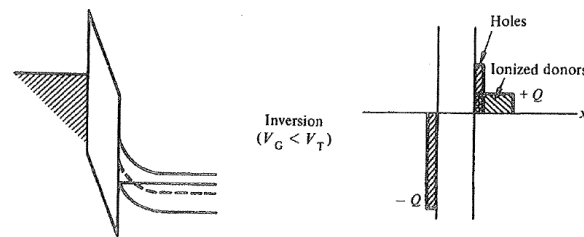
ולכן:

$$E_i(\text{surface}) - E_i(\text{bulk}) = 2(E_F - E_i(\text{bulk})) \quad (3)$$



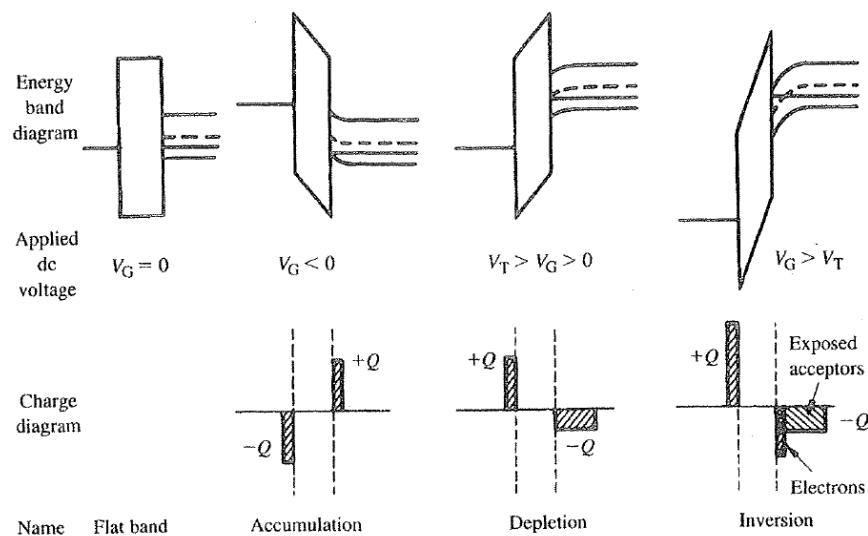
איור 6: דיאגרמת פסים וקירוב של התפלגות המטען של קבל MOS תחת מתח הסף הגורם להיפוך של מטען בפני השטח של המל"מ.

הגדלה של המתח מעבר למתח הסף תגרוור עלייה נוספת בריכוז החורים בסמוך לפני השטח של המל"מ. מצב זה מתואר על ידי איור 7.



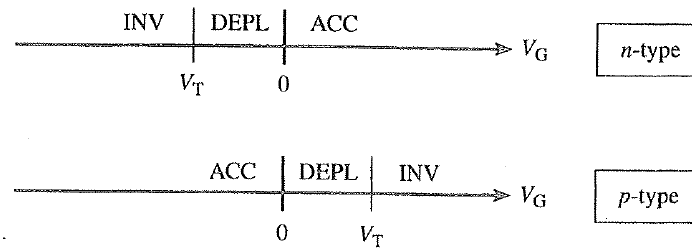
איור 7: דיאגרמת פסים וקירוב של התפלגות המטען של קבל MOS תחת מתח שער שלילי חזק הגורם להיפוך של מטען וריכוז חורים גבוה בפני השטח של המל"מ.

עבור קבל MOS המבוסס על מל"מ מסוג p ניתן לקבל התנהגות זהה עבור מתחים בסימן הפוך. איור 8 מציג את דיאגרמות הפסים וקירוב של התפלגות המטען עבור קבל MOS המבוסס על מל"מ מסוג n.



איור 8: דיאגרמת פסים וקירוב להתפלגות המטען עבור קבל MOS המבוסס על מל"מ מסוג n במספר מתחי שער שונים.

איור 9 מציג תרשים של מצבי העבודה של קבלי MOS הבנויים ממל"מ מסוג n ו-p כתלות במתח השער שלהם.



איור 9: מצבי הפעולה של קבלי MOS המבוססים על מל"מ מסוג n ו-p כתלות במתח המופעל עליהם.

קבל MOS – ניתוח כמותי

נמצא את התפלגות הפוטנציאל בקבל בעזרת ניתוח דומה לזה שעשינו לצומת n-p. גם כעת, נפתור משוואת פואסון בולצמן תוך שימוש בקירוב המיחסור. ניתן להניח כי בתוך המתכת אין שדה והתפלגות המטען של שכבת ההיפוך היא פונקציית דלתא בממשק בין המתכת והתחמוצת. כאמור, בתחמוצת אין מטען ועל כן השדה בשכבה זו הוא קבוע. עם כן, נותן לפתור את משוואת פואסון בולצמן עבור המל"מ.

נגדיר את הפוטנציאל על פי הרמה האינטרינזית כאשר רמת הייחוס היא הרמה האינטרינזית בעומק ההתקן.

$$\psi_p(x) = -\frac{E_i(x) - E_i(\infty)}{q} \quad (4)$$

נסמן ב- ψ_s את הפוטנציאל בממשק בין המל"מ והתחמוצת:

$$\psi_s = -\frac{E_i(0) - E_i(\infty)}{q} \quad (5)$$

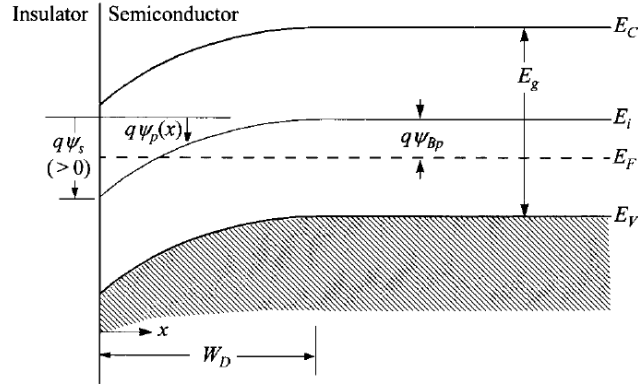
בחומר מסוג n (בהנחה של יינון מלא)

$$\psi_B = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \quad (6)$$

בחומר מסוג p (בהנחה של יינון מלא)

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (7)$$

מתוך משוואה (3), ניתן לראות כי במצב של סף היפוך $\psi_s = 2\psi_B$. באיור 10 ניתן לראות את דיאגרמת הפסים והתפלגות הפוטנציאל במל"מ כחלק מקבל MOS. הסימונים שהוגדרו במשוואות (4)-(7) מופיעים באיור 10.



איור 10: דיאגרמת פסים והגדרות הפוטנציאל בקבל MOS על מצע מסוג p.

נפתור את המשוואות בגישה הדומה לקירוב המיחסור בו נעזרנו בניתוח של דיודות. עם זאת, במקרים של אקומולציה והיפוך ישנן תופעות נוספות שאנו נדרשים להתייחס אליהן. בשני המקרים האלו (ושלא כמו בשאר ההתקנים שניתחנו עד כה), מופעל מתח על ההתקן שסוחף נשאי מטען אל תוך מחסום שמונע זרם ישר. כתוצאה מכך, בשני המקרים הללו תהיה הצטברות של מטען בשכבה דקה מאוד בממשק בין המל"מ והתחמוצת. אנו נניח כי ניתן לקרב את הצטברות המטען לפונקציית דלתא. תחת אקומולציה ריבוי נשאי המטען בממשק בין המל"מ לתחמוצת גורם לכך שהפוטנציאל והשדה במל"מ ממוסכים על ידי המטען בפני השטח כך שהשדה הוא 0 והפוטנציאל קבוע בתוך המל"מ.

במצב של היפוך, המצב שונה שכן לפני שהקבל יהיה במצב של היפוך הוא יהיה במצב מיחסור. אנו נניח כי אחת שהקבל במצב של היפוך, כמעט ואין שינוי ברוחב שכבת המיחסור וכי כל עלייה המתח מוסיפה רק לריכוז המטען בפני השטח. לכן, נניח כי החל מסף ההיפוך, כל עלייה במתח תגרור עלייה בריכוז המטען בפני השטח של המל"מ בלבד וכי הצטברות מטען זו היא לתוספת המטען שנצברה בשער. על כן, ניתן לתאר את פעולת הקבל במצב של היפוך על ידי הוספה של פונקציית דלתא של מטען לפתרון שמתקבל עבור קצה המיחסור בו $\psi_s = 2\psi_B$.

ראשית ננתח את התפלגות המטען והפוטנציאל במל"מ מסוג p במצב של מיחסור.

על פי קירוב המיחסור:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_s} = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} \quad 0 \leq x \leq W \quad (8)$$

בקצה אזור המיחסור השדה הוא 0 ולכן $\mathcal{E}(x=W) = 0$, נבצע אינטגרציה, נציב את תנאי השפה ונקבל כי:

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{d\psi_p}{dx} = -\frac{qN_A}{\epsilon_s}(x-W) \quad 0 \leq x \leq W \quad (9)$$

על מנת למצוא את הפוטנציאל נבצע עוד אינטגרציה ונציב את תנאי השפה $\psi_p(x=W) = 0$:

$$\psi_p(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s}(x-W)^2 \quad 0 \leq x \leq W \quad (10)$$

כעת נותר למצוא את רוחב שכבת המיחסור W עבור פוטנציאל פני שטח נתון $\psi_s = \psi_p(x=0)$:

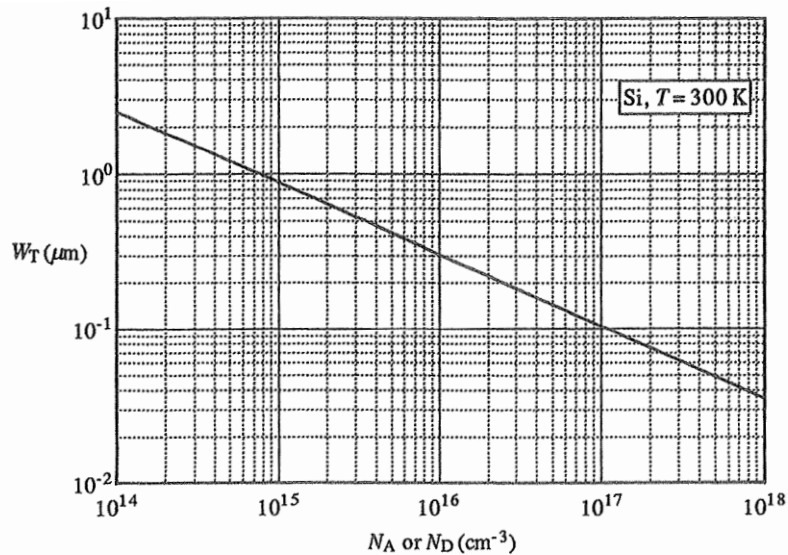
$$\psi_s = -\frac{qN_A}{2\epsilon_s}W^2 \Rightarrow W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}\psi_s} \quad (11)$$

כפי שהוסבר קודם, אזור המיחסור יתרחב עם המתח עד למתח הסף בו $\psi_s = 2\psi_b$. בנקודה זו, רוחב אזור המיחסור מקבל את ערכו המקסימלי W_T :

$$W_T = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}} 2\psi_B = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)} \quad (12)$$

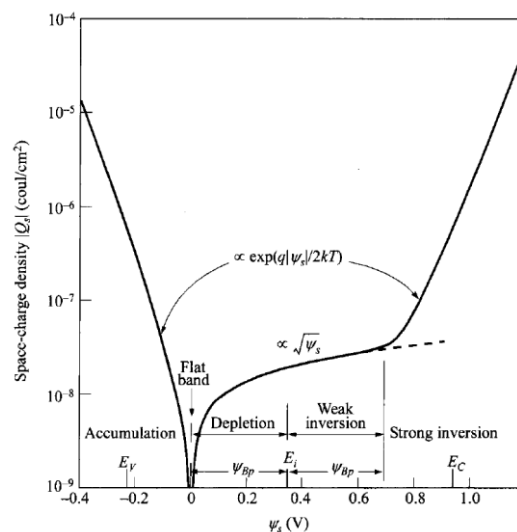
איור 11 מציג את רוחב שכבת המחסור במתח סף ההיפוך בקבל MOS עשוי סיליקון כתלות בריכוז המזהמים במל"מ. על כן, על סף ההיפוך, סך כל המטען במל"מ יהיה:

$$Q_s = qN_A W_T = \sqrt{qN_A 2\epsilon_s (2\psi_B)} \quad (13)$$



איור 11: הרוחב המקסימלי של שכבת המחסור בקבל MOS עשוי סיליקון כתלות בריכוז המזהמים במל"מ (מתוך (Pierret).

איור 12 מציג את סך כל המטען במל"מ כתלות בפוטנציאל בממשק בין המל"מ ושכבת התחמוצת. קל לראות כי כאשר אין כיפוף פסים במל"מ, סך כל המטען הוא 0 (ההנחה היא כי אין מטען הכלוא בפני השטח), ובמצבים של מיחסור והיפוך חלש, המטען גדל על פי שורש הפוטנציאל בגלל הגדלה של אזור המיחסור. במצב של היפוך חזק ואקומולציה, תוספת המטען היא בפני השטח בין המל"מ והתחמוצת ובמצב זה כמות המטען גדלה אקספוננציאלית עם הפוטנציאל.



איור 12: סך כל המטען בקבל MOS כתלות בפוטנציאל בממשק בין המל"מ ושכבת התחמוצת. המל"מ הוא סיליקון מסוג p.

כעת נמצא את מתח השער הדרוש בכדי לקבוע את הפוטנציאל בפני השטח כרצוננו. איור 13a מציג את דיאגרמת פסי האנרגיה של קבל MOS במצב זה. התפלגות המטען, השדה החשמלי והפוטנציאל מוצגים באיור 13b-d. בהתאמה. ניטרליות המטען דורשת כי סכום המטען במל"מ, Q_s , ובמתכת, Q_M , חייב להיות 0 ולכן:

$$Q_M = -(Q_n + qN_A W_D) = -Q_s \quad (14)$$

כאשר Q_n הוא צפיפות המטען ליחידת שטח בשכבת ההיפוך (נזכור כי מאחר והניתוח הוא עבור מערכת חד מימדית, כל החישובים הם עבור יחידת שטח של $1\text{cm} \times 1\text{cm}$). בהנחה שפונקציית העבודה של המל"מ והמתכת זהות, סך כמתח המופעל שווה למפל הפוטנציאל על שכבת התחמוצת, V_{ox} , והמל"מ:

$$V = V_{ox} + \psi_s \quad (15)$$

בהנחה שאין מטען כלוא בתחמוצת, מפל הפוטנציאל עליה יהיה ליניארי עם השדה החשמלי:

$$V_{ox} = \epsilon_{ox} d \quad (16)$$

על פי חוק גאוס, השתף דרך מעטפת שווה לסך כל המטען בתוכה ולכן השדה בתחמוצת נקבע על פי סך כל המטען במל"מ:

$$\epsilon_{ox} = \frac{Q_s}{\epsilon} \quad (17)$$

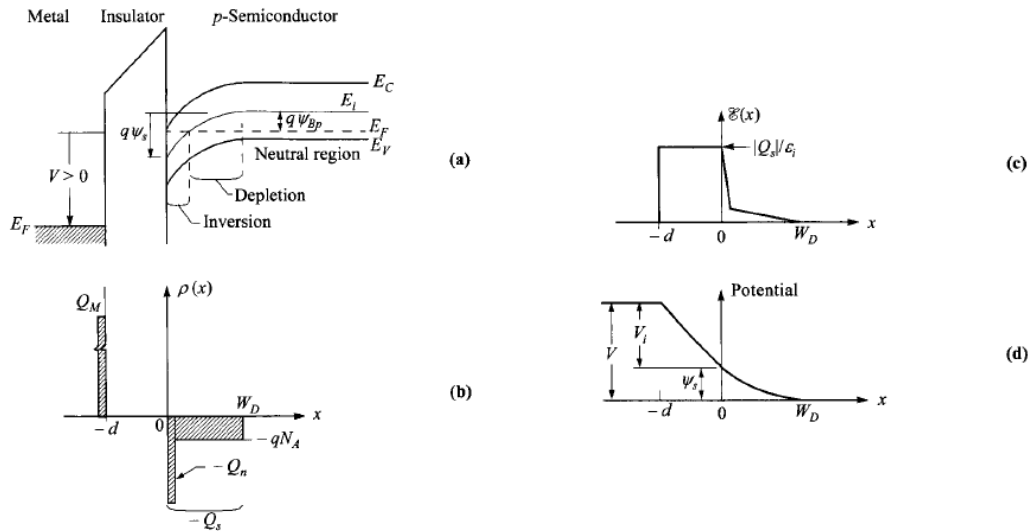
ולכן:

$$V_{ox} = \frac{|Q_s|}{\epsilon} d = \frac{|Q_s|}{C_{ox}} \quad (18)$$

כאשר $C_{ox} = \epsilon_{ox}/d$ הוא הקיבול ליחידת שטח של שכבת התחמוצת.

על ידי הצבה של משוואה (18) ומשוואה (13) בתוך משוואה (15) ניתן לחשב את מתח סף ההיפוך:

$$V_T = \frac{\sqrt{qN_A 2\epsilon_s(2\psi_B)}}{C_{ox}} + 2\psi_B \quad (19)$$



איור 13: קבל MOS במצב של היפוך חזק (a) דיאגרמת פסים, (b) התפלגות המטען, (c) התפלגות השדה החשמלי, (d) התפלגות הפוטנציאל

נציין כי ברוב המקרים לא ניתן להניח כי אין כיפוף פסים בפני השטח של המל"מ גם במצב של שיווי משקל. כיפוף פסים כזה הוא תוצר של הפרש פונקציות עבודה בין המל"מ והמתכת, $\phi_M - \phi_S$, ומטען הכלוא בממשק בין המל"מ והתחמוצת או בתחמוצת עצמה, Q_F . כיפוף פסים זה יגרום להזזה של מתח הסף על פי המתח הדרוש "ליישר" את הפסים בממשק בין המל"מ והתחמוצת:

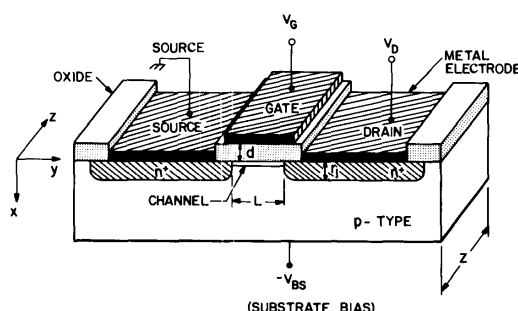
$$V_{FB} = (\phi_M - \phi_S) - Q_F/C_{ox} \quad (20)$$

נציין גם כי התקני זיכרון רבים פועלים בדיוק על סמך מנגנון זה- הזזה של מתח הסף של הטרנזיסטור באמצעות כליאת מטען בין המל"מ והשער. נלמד עוד על התקנים אלו בהמשך הקורס.

טרנזיסטור MOS- מודל יריעת המטען

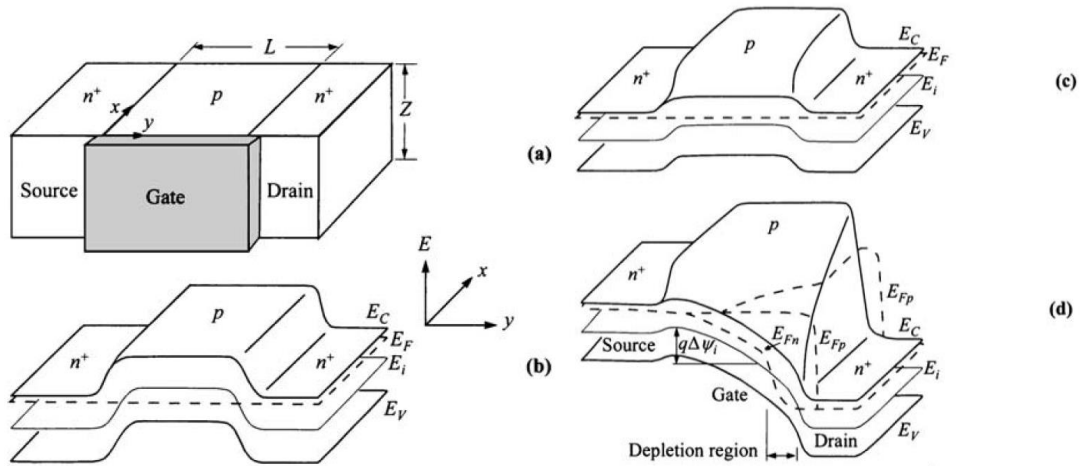
טרנזיסטורים מסוג MOSFET מבוססים על קבל MOS פשוט אשר יש משני צדיו "איים" מסוממים חזק. איים אלו, אשר מכונים Source ו- Drain, מסוממים הפוך מהמצע כך שהם יוצרים צומת PNP או NPN ביניהם. האזור שנמצא בין האיים ומתחת לשער של הקבל מכונה תעלה (Channel). איור 14 (מתוך Sze) מציג את המבנה של טרנזיסטור MOSFET. הוא כולל את המבנה הבסיסי שלו, סימון המתחים שמופעלים עליו, וכן את מערכת הקואורדינטות בה ניעזר לשם ניתוח הפעולה שלו. לאורך כל הניתוח נניח כי מתח ה- Drain הוא V_D , ואילו ה- Source, מחובר לאדמה. שימו לב כי הציר האנכי הוא ציר x כך שניתוח זה מתאים לניתוח עבור קבל MOS שעשינו מוקדם יותר.

טרנזיסטורי MOSFET הם למעשה מתגים מפוקדים חשמלית. כאשר המתג פתוח (לא מתאפשר מעבר זרם ברכיב), ישנה צומת PNP או NPN בין ה- source וה- drain ועל כן, גם הפעלת מתח על ה- Drain לא תזרים זרם משמעותי בהתקן. עם זאת, אם השער נמצא במצב היפוך, ישנה שכבה דקה בעלת ריכוז נשאים גבוהה בין ה- Source וה- Drain. שכבה זו, שהנשאים בה הם אותם מאותו סוג כמו נשאי הרוב בשני האיים, למעשה מחברת בין שני האיים ומאפשרת הולכה ביניהם.



איור 14: איור של המבנה של טרנזיסטור MOSFET עם מצע מסוג P (מתוך Sze).

נתבונן באיור 15 על מנת להבין טוב יותר את מבנה פסי האנרגיה בהתקן. איור 15a מתאר את מבנה ההתקן שאנו מנתחים. איור 15b מציג את דיאגרמת הפסים בשיווי משקל ואיור 15c מציג את אותו הטרנזיסטור במצב של סף היפוך כאשר מתח ה- drain הוא 0. במצב זה לא זורם זרם בהתקן ולכן הקוואזי רמות פרמי מתכנסות למיקום רמת הפרמי בשיווי משקל. באיור 15d מתוארת דיאגרמת הפסים של ההתקן כאשר מתח ה- drain גדול מ-0 ומתח השער גבוהה ממתח הסף כך שזורם בו זרם. במצב זה, ישנו פיצול של הקוואזי רמות פרמי. בעוד שרמת הקוואזי פרמי לנשאי רוב (חורים) נשארת ברמתה בשיווי משקל, רמת פרמי לנשאי מיעוט (אלקטרונים) יורדת לקראת ה- drain. כפי שראינו קודם, על מנת לקיים שכבת היפוך, דרוש כי בסמוך לפני השטח הקוואזי רמת פרמי תהיה גבוהה יותר מרמה האינטרינזית: $E_{Fn} - E_i > 2q\psi_B$. כפי שניתן לראות באיור 15d, על מנת לשמור על תנאי זה בכל נקודה, נדרש כי מתח השער יהיה מספיק גבוה בכדי לפצות על הירידה ברמת פרמי כתוצאה ממתח ה- drain.



איור 15: תיאור מקורב של פעולת טרנזיסטור MOSFET מסוג n -channel enhancement. מבנה הטרנזיסטור (a), דיאגרמת פסים בשיווי משקל (b), דיאגרמת פסים כאשר מתח השער גבוהה ממתח הסף להיפוך (c), ודיאגרמת פסים כאשר מתח השער גבוה ממתח הסף להיפוך וכן מופעל מתח על ה- Drain (d).

במודל זה אנו מתייחסים לשכבת ההיפוך כאל שכבה דקה מאוד אשר נמצאת בפני השטח בין המל"מ והתחמוצת. תחת הנחה זו, אין מפל מתח על שכבת ההיפוך, וניתן למצוא את סך המטען בה על פי חוק גאוס:

$$\epsilon_{ox}\epsilon_{ox} = \epsilon_s\epsilon_s - Q_n \quad (21)$$

כאשר האיבר הראשון מתאר את השדה בשכבת התחמוצת בסמוך לפני השטח, האיבר השני, הוא השדה בתוך המל"מ, והאיבר השלישי הוא המטען המשטחי של שכבת ההיפוך. על מנת לתאר את השינויים בפוטנציאל ובמטען לאורך התעלה, נרצה למצוא כיצד המטען בשכבת ההיפוך, $Q_n(y)$, משתנה כתלות במיקום בין ה- source וה- drain. על מנת לעשות זאת עלינו לתאר את השינוי בפוטנציאל בתחום זה. נסמן את הפוטנציאל בתעלה להיות:

$$\psi_s(y) = \Delta\psi_i(y) + 2\psi_B \quad (22)$$

כאשר $\Delta\psi_i(y)$ הוא השתנות הפוטנציאל בתעלה יחסית לקצה ה- source:

$$\Delta\psi_i(y) = \frac{E_i(x=0, y=0) - E_i(x=0, y)}{q} \quad (23)$$

כעת, על מנת למצוא את המטען בשכבת ההיפוך, עלינו למצוא את השדה בתחמוצת ובמל"מ. השדה בתחמוצת הוא פשוט הפרש הפוטנציאלים על התחמוצת מחולק בעובייה:

$$\epsilon_{ox} = \frac{V_G - \psi_s}{d} = \frac{V_G - (\Delta\psi_i + 2\psi_B)}{d} \quad (24)$$

את השדה במל"מ קל למצוא מתוך קירוב המיחסור בקבל MOS:

$$\epsilon_s = \sqrt{\frac{2qN_A(\Delta\psi_i + 2\psi_B)}{\epsilon_s}} \quad (25)$$

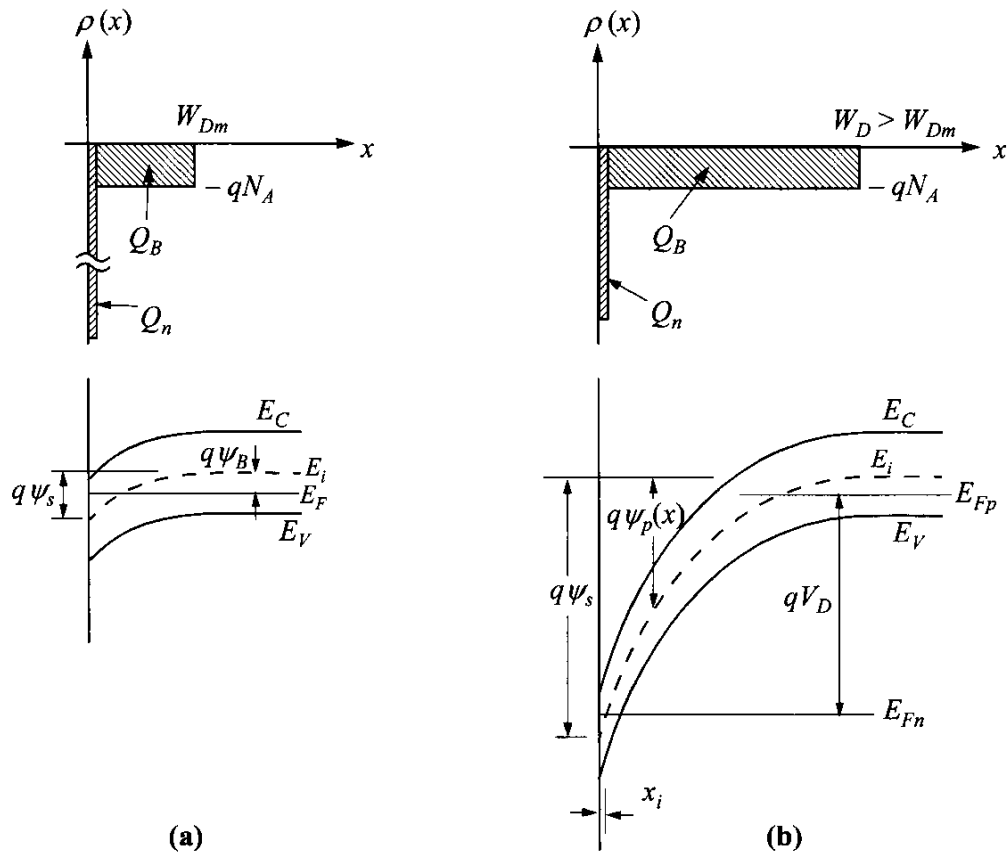
נסמן את קיבול שכבת התחמוצת ליחידת שטח להיות $C_{ox} = \epsilon_{ox}/d$, ונקבל את צפיפות המטען בתעלה:

$$|Q_n| = [V_G - (\Delta\psi_i + 2\psi_B)]C_{ox} - \sqrt{2qN_A\epsilon_s(\Delta\psi_i + 2\psi_B)} \quad (26)$$

כאשר יש כיפוף פסים במל"מ במצב של שיווי משקל (לדוגמה בגלל פונקציית העבודה של השער, או בגלל מטען בשכבת התחמוצת), יש להוסיף לביטוי זה את המתח הדרוש בכדי ליישר את הפסים, V_{FB} :

$$|Q_n| = [V_G - V_{FB} - (\Delta\psi_i + 2\psi_B)]C_{ox} - \sqrt{2qN_A\epsilon_s(\Delta\psi_i + 2\psi_B)} \quad (27)$$

בביטויים אלו נשתמש על מנת לחשב את אופייני המתח-זרם של הטרנזיסטור.



איור 16: דיאגרמת פסים והתפלגות הפוטנציאל בטרנזיסטור MOSFET על מצע מסוג p. (a) כאשר מתח השער הוא מתח הסף ומתח ה-drain הוא 0 ועבור (b) $V_D > 0$.

אופייני מתח זרם

נפתח ביטויים כמותיים לזרם הטרנזיסטור כתלות במטחי ההדקים. כמו בניתוחים הכמותיים הקודמים בקורס, עלינו להשתמש במספר קירובים על מנת שנוכל לקבל ביטויים אנליטיים. נניח את ההנחות הבאות:

- קבל ה MOS הוא קבל אידיאלי – פונקציות העבודה של המל"מ והמתכת שוות ואין מטענים בשכבת התחמוצת. כתוצאה מכך, לא יהיה כיפוף פסים כאשר מתח השער הוא 0, כלומר $V_{FB}=0$.
- נניח כי הזרם בתעלה הוא זרם סחיפה בלבד.
- נניח כי ריכוז המזהמים בתעלה קבוע.
- זרם הזליגה בטרנזיסטור הוא זניח
- השדה הרוחבי $\mathcal{E}_x$ בתעלה גדול בהרבה מהשדה האורכי $\mathcal{E}_y$. קירוב זה נקרא gradual channel approximation.
- נניח כי הזרם בין ה- Source וה- Drain זורם כולו בשכבת ההיפוך (התעלה) בלבד.
- בתוך התעלה, הפוטנציאל שווה לפוטנציאל בממשק בין המל"מ והתחמוצת $\psi \approx \psi_s$ ועל כן, הפוטנציאל והשדה בתוך התעלה תלויים ב- y בלבד.

תחת התנאים האלו, ניתן לקרב את הזרם בתעלה להיות:

$$I_D(y) = Z|Q_n|v(y) \quad (28)$$

כאשר $v(y)$ היא מהירות הנשאים הממוצעת ו Z הוא רוחב הטרנזיסטור. מאחר והזרם הוא רציף וקבוע בתעלה הזרם בכל נקודה שווה לזרם הממוצע בהתקן:

$$I_D = \frac{Z}{L} \int_0^L |Q_n| v(y) dy \quad (29)$$

מהירות של נשאי מהטען תלויה בשדה החשמלי אשר משתנה לאורך הטרנזיסטור. כידוע, הקשר בין מהירות הנשאים והשדה החשמלי מוגדר על ידי המוביליות שלהם. בשלב ראשון אנו נניח כי המוביליות לא תלויה בשדה החשמלי. עם זאת, הנחה זו כבר לא תקפה בטרנזיסטורים מתקדמים בהם השדות חזקים יותר ויש רווית מהירות עם השדה החשמלי. אנו נבחן את ההשפעה של תופעה זו בהמשך.

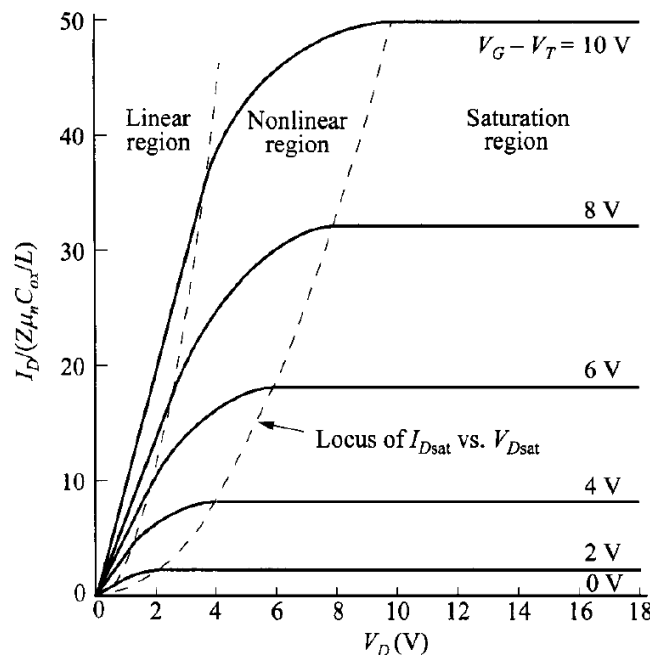
כאשר מניחים כי המוביליות לא משתנה עם השדה החשמלי, $v = \mu \mathcal{E}$. נציב זאת בביטוי לזרם ונקבל:

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{Z\mu_n}{L} \int_0^L |Q_n(y)| \mathcal{E}(y) dy = \frac{Z\mu_n}{L} \int_0^L |Q_n(y)| \frac{d\Delta\psi_i(y)}{dy} dy \\ &= \frac{Z\mu_n}{L} \int_0^{V_D} |Q_n(y)| d\Delta\psi_i \end{aligned} \quad (30)$$

על ידי הצבה של משוואה (27) ואינטגרציה נקבל:

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} \left\{ \left(V_G - V_{FB} - 2\psi_B - \frac{V_D}{2} \right) V_D \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_{ox}} \left[(V_D + 2\psi_B)^{\frac{3}{2}} - (2\psi_B)^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

משוואה מראה כי עבור מתחים V_D נמוכים זרם הטרנזיסטור גדל באופן ליניארי עם המתח אך עם העלייה המתח השינוי בזרם מתמתן. איור 17 מתאר את עקומות המתח-זרם של טרנזיסטור MOSFET אידיאלי. הקו המקווקו הימני מתאר את העקומה של מתח ה-drain בו הזרם מגיע לרוויה ואילו הקו השמאלי מתאר את התחום בו אופיין המתח-זרם הוא ליניארי. בתחום שבין שני הקווים הוא התחום הלא ליניארי של הטרנזיסטור.

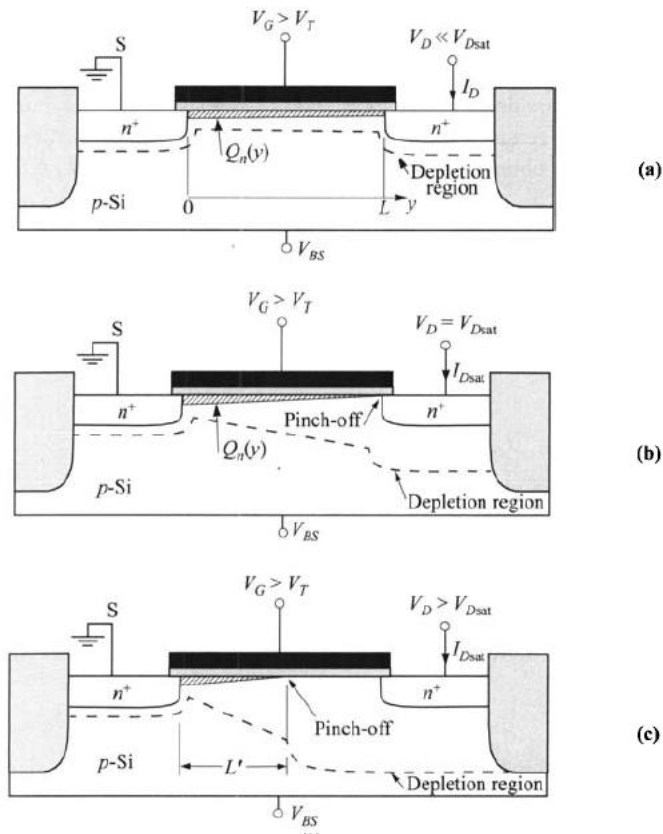


איור 17: אופייני I_D - V_D עבור מתחי שער שונים בטרנזיסטור אידיאלי עם מצע מסוג p.

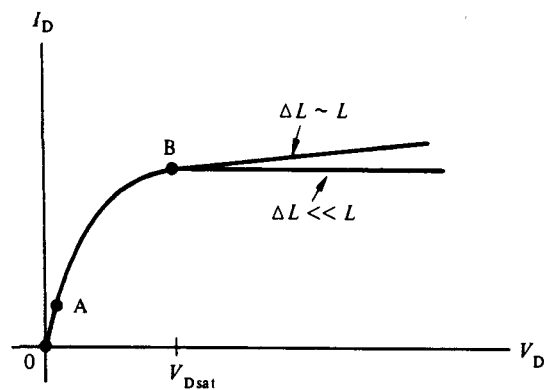
נתבונן באופן איכותי כיצד זרם ה- Drain משתנה עם מתח ה- Drain. אנו מניחים כי מתח השער מספיק גבוה בשביל ליצור תעלה (שהיא בעצם שכבת ההיפוך) כך שהפעלה של מתח V_D קטן מספיקה בשביל להזרים זרם בין ה- Source וה- Drain. איור 18 מתאר את השפעת המתח על גודל התעלה ואזורי המיחסור בטרנזיסטור עבור ערכים שונים של V_D . עבור V_D קטנים (איור 18a), הפעלת המתח לא משנה באופן משמעותי את התפלגות הפוטנציאל בטרנזיסטור ולא את מבנה התעלה ואזורי המיחסור. כתוצאה מכך, עבור מתחים נמוכים, התנגדות התעלה היא קבועה והזרם יהיה ליניארי עם V_D .

נזכור כי כאשר מופעל מתח V_D חיובי, הצומת בין ה- Drain והמצע נמצאת בממתח הפוך. על כן, ככל שהמתח V_D גדל, גם אזור המיחסור מסביב ל- Drain יגדל. לחלופין, ניתן לתאר זאת על ידי כך שהמטען בתעלה קטן בגלל שהפוטנציאל $\Delta\psi_i(y)$ גדל בסמוך ל- drain (משוואה (27)). מכיוון שאזור המיחסור גדל גם על חשבון התעלה, מספר נשאי המטען בתעלה קטן. כתוצאה מכך, המוליכות שלה קטנה גם כן, דבר שמתבטא בירידה בשיפוע של עקומות ה- I_D-V_D . עבור מתח V_D מספיק גדול, התעלה נעלמת כמעט לגמרי בסמוך ל- Drain. נקודה זו, המכונה נקודת ה- pinch-off בה $Q_n(y)$ מתקרב ל- 0, מתוארת באיור 18b ומתאימה למתח הרוויה V_{DSAT} . עבור מתחים הגבוהים מ- V_{DSAT} , יתפתח אזור ברוחב $\Delta L=L$ בו שכבת ההיפוך מוחלפת באזור מיחסור (איור 18c), משמע, נקודת ה- pinch off נעה לכיוון ה- Source. מאחר ולאזור זה התנגדות גבוהה בהרבה מאשר אזור ההיפוך, תוספת המתח מעבר ל- V_{DSAT} נופלת ברובה על אזור זה. במידה ושכבת ההיפוך רחבה בהרבה מהאזור בו שכבת המיחסור החליפה אותה, $\Delta L \ll L$, מבנה שכבת ההיפוך לא ישתנה באופן משמעותי. במצב זה, על שכבת ההיפוך נופל מתח V_{DSAT} . ללא תלות במתח V_D וכתוצאה מכך, עבור מתחים הגבוהים מ- V_{DSAT} הזרם I_D הוא קבוע. כאשר הרוחב ΔL שווה גודלו בערך ל- L , $\Delta L \approx L$, המתח V_{DSAT} נופל על שכבת ההיפוך שהופכת קצרה יותר ככל ש- V_D גדל. כתוצאה מכך, ההתנגדות שלה יורדת עם V_D והזרם I_D יעלה עם המתח V_D . איור 19 מציג עקומות ה- I_D-V_D עבור טרנזיסטור בו $\Delta L \ll L$ ועבור טרנזיסטור בו $\Delta L \approx L$. תופעות אלו נקראות תופעות תעלה קצרה ואנו נעסוק בהן בהרחבה בהמשך הקורס.

כעת אנו יכולים לתאר באופן מלא את התנהגות הטרנזיסטור כתלות במתח השער וה- Drain. עבור מתחי שער הקטנים ממתח סף ההיפוך לא נוצרת שכבת היפוך בין ה- Source וה- Drain ועל כן הזרם ביניהם יהיה קטן מאוד. ככל שמתח השער גדול ממתח סף ההיפוך, שכבת ההיפוך וכמות נשאי המטען בה יגדלו. לכן, ככל שמתח השער יעלה, ההתנגדות בין ה- Source וה- Drain תרד והשיפוע של עקומת ה- I_D-V_D יגדל. בנוסף, מאחר שכמות נשאי המטען בתעלה (שכבת ההיפוך) גדלה עם מתח השער, יידרש מתח ה- V_D גדול יותר על מנת להגיע למצב של off-pinch. מסיבה זו מתח הרוויה V_{DSAT} , גדל גם הוא עם מתח השער. איור 17 מראה כיצד את הזרם I_D מושפע על ידי המתח V_D והמתח V_G .



איור 18: מבנה שכבת ההיפוך ואזור המיחסור בטרנזיסטור MOSFET מסוג n channel enhancement כאשר V_D בתחום הליניארי (a), כאשר $V_D = V_{DSAT}$ (b), וכאשר $V_D > V_{DSAT}$ (c).



איור 19: אופייני I_D - V_D המיחסור בטרנזיסטור MOSFET מסוג n channel enhancement כאשר $\Delta L \ll L$ ועבור $\Delta L \approx L$. הנקודה A מציינת את התחום הליניארי של הטרנזיסטור ואילו הנקודה B את הנקודה בה מתרחשת תופעת pinch-off וזרם הטרנזיסטור נמצא ברוויה.

על כן, אנו מעוניינים לתאר את אופיין המתח זרם של הטרנזיסטור תחת שלושה מצבי פעולה שונים- התחום הליניארי, התחום הלא ליניארי ותחום הרוויה. עבור התחום הליניארי, ניתן להניח כי מתח ה-drain נמוך. במצב זה, ניתן לפתח את משוואה (31) כתור חזקות סביב V_D והזנחה של האברים מהחזקות הגבוהות. נקבל כי:

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} \left\{ \left(V_G - V_{FB} - 2\psi_B - \frac{V_D}{2} \right) V_D - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_{ox}} \left(3 \sqrt{\frac{\psi_B}{2}} V_D \right) \right\} \quad (32)$$

הגדרנו את מתח הסף להיות:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{q N_A 2\varepsilon_s (2\psi_B)}}{C_{ox}} \quad (33)$$

ונקבל כי:

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} \left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D \quad V_D \ll V_G - V_T \quad (34)$$

מתוך משוואה (31) ניתן לראות כי לזרם יש נקודת מקסימום במתח V_D מסוים ואחריו הוא יורד. כמובן שהירידה בזרם איננה פיסיקלית, אך היא מתאימה למצב בו המטען בשכבת ההיפוך מתאפס בסמוך ל-drain. נקודת ה-pinch off, הזו מתחרשת בגלל שהמתח היחסי בין השער והמל"מ קטן כאשר מתח ה-drain גדל. המתח והזרם במתח זה הם מתח וזרם הרוויה V_{Dsat} , I_{Dsat} . את מתח הרוויה אפשר למצוא בעזרת משוואה (27) תחת התנאי $Q_n(L)=0$. מתקבל כי:

$$V_{Dsat} = \Delta\psi_i(L) = V_G - V_{FB} - 2\psi_B + K^2 \left[1 - \sqrt{1 + \frac{2(V_G - V_{FB})}{K^2}} \right] \quad (35)$$

כאשר $K = \sqrt{q N_A \varepsilon_s} / C_{ox}$. ניתן להגיע לאותה התוצאה על ידי גזירה של משוואת המתח-זרם ומציאת הנקודה בה הנגזרת מתאפסת. ניתן לחשב את זרם הרוויה על ידי הצבה של משוואה (35) במשוואה (27). נקבל כי:

$$I_D = \frac{Z}{2ML} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T)^2 \quad (36)$$

כאשר M הוא פרמטר התלוי במידת הסימום של המצע ועובי שכבת התחמוצות.

$$M = 1 + \frac{K}{2\sqrt{\psi_B}} \quad (37)$$

נשים לב כי M גדול מ-1 וכי הוא מתקרב ל-1 ככל שעובי התחמוצות והסימום של המצע קטנים. נשים לב כי בתחום הרוויה, כאשר המוביליות קבועה, הזרם מתכונתי לריבוע מתח השער. כעת, ניתן לכתוב את מתח הרוויה כ-

$$V_{Dsat} = \frac{V_G - V_T}{M} \quad (38)$$

כעת, ניתן לתאר את ה-transconductance בתור השינוי בזרם הטרנזיסטור כתוצאה משינוי במתח השער כאשר הטרנזיסטור נמצא במצב במצב של רוויה:

$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dV_G} \right|_{V_D > V_{Dsat}} = \frac{Z}{ML} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T) \quad (39)$$

לסיום, בתחום הלא ליניארי שבין התחום הליניארי ותחום הרוויה, ניתן לתאר את עקומת המתח-זרם להיות:

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} \left(V_G - V_T - M \frac{V_D}{2} \right) V_D \quad (40)$$

נזכור כי משוואה (27) עבור המטען היא ביטוי מדויק וכי לא נדרשנו לקרובים בשביל לקבל אותו. ניתן להשתמש בהגדרת מתח הסף, ולקרב אותו להיות:

$$|Q_n| = C_{ox} [V_G - V_T - M \Delta \psi_i(y)] \quad (41)$$

הצבה של ביטוי זה לתוך משוואה (29) מאפשרת להגיע לביטוי זהה למשוואה (40) עבור כל תחום המתחים. כפי שניתן לראות, ההבדל היחיד בין הביטוי שמתקבל לבין זה שחישבנו קודם הוא בתחום הליניארי. הביטוי הפשוט יותר יהיה מועיל כאשר נתבונן בביצועי ההתקן כאשר המוביליות היא לא קבועה וישנה רווית מהירות לנשאי המטען.

סיכום

בהרצאה זו עסקנו בקבלי MOS וטרנזיסטורי MOSFET. בשני ההתקנים מתח השער קובע את צפיפות המטען בממשק בין שכבת המל"מ והתחמוצת. בטרנזיסטור MOSFET מטען היפוך בממשק בין השכבות מגשר בין ה-source וה-drain ועל ידי כך מאפשר הולכת מטען.

חישבנו את יחסי המתח-זרם בטרנזיסטורים אלו בשני שלבים על פי מודל ה-sheet charge. ראשית מצאנו את המטען בשכבת ההיפוך בכל נקודה בין ה-source וה-drain. לאחר מכן, מצאנו את הזרם על ידי מציאת המהירות בה מטען זה נע. קיבלנו כי עבור מתחי שער הגבוהים ממתח הסף, ניתן לחלק את עקומות המתח-זרם לשלושה חלקים:

- תחום ליניארי- עבור מתחי drain נמוכים, מתח ה-drain לא משנה את מבנה התעלה ולכן הזרם ליניארי עם מתח ה-drain.
- תחום רוויה- עבור מתחי drain גבוהים ישנה "צביטה" של התעלה- התעלה מוחלפת באזור מיחסור באזורים הקרובים ל-drain. כתוצאה מכך הולכת המטען נפגעת והגדלה של מתח ה-drain לא מובילה לעלייה בזרם.
- תחום לא ליניארי שבין שני התחומים.

בהרצאות הבאות נלמד כיצד פעולת הטרנזיסטורים משתנה כתוצאה מהשינויים שהם עוברים. נראה כיצד רווית מהירות גורמת לשינוי בפעולת הטרנזיסטורים, נבחן את פעולת ההתקנים בסמוך למתח הסף, וכן את כללי המיזעור שלהם.