

מבנה המחשב | 67200

הרצאות | אוהד פאליד ורון גבור

כתיבה | נמרוד רק

תשפ"ג סמסטר ב'

## תוכן העניינים

<b>3</b>	<b>I מבוא ומוליכים-למחצה</b>
3	הרצאה . . . . .
3	רקע כימי לרנזיסטורים . . . . .
4	רקע פיזיקלי לטרנזיסטורים . . . . .
4	מוליכים למחצה . . . . .
5	צומת p-n . . . . .
6	MOS-FET . . . . .
7	בניית שערים מטרנזיסטורים . . . . .
8	תרגול . . . . .

## שבוע II | מבוא ומוליכים-למחצה

### הרצאה

המחשבים הראשונים היו עצומים, כבדים ויקרות, ויחידת הבסיס של המעבד שלהן היה שפופרות קטודיות (אבי הטרנזיסטור) ואז שפופרות ריק, וכיום משתמש בטכנולוגיית CMOS שמאפשרת גדילה בעשרות סדרי גודל בזמן המחזור, מהירות השעון, מספר הטרנזיסטורים ועוד. הקורס עוסק במבנה המעבד בעיקר.

בתוך כל מחשב יש אביזרי קלט ופלט (חיישני סונאר, מסך, עכבר), אמצעי אחסון (נדיף כמו RAM ולא נדיף כמו דיסק קשיח), מעבד, מערכת הפעלה, דרייברים ותוכנה. בקורס נעסוק במעבדים ותוכנה ונזכיר מערכות הפעלה ואמצעי אחסון.

קצב ההתקדמות עד לשנים האחרונות התנהג לפי חוק מור (1965) - כל שנה מצליחים להכפיל את מספר הטרנזיסטורים כל שנתיים. העליה במספר הטרנזיסטורים מספקת גם עלייה אקספ' בביצועים, ביעילות אנרגיה וגם בגודל האחסון שאפשר לייצר.

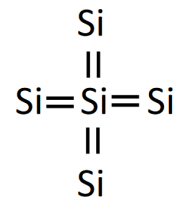
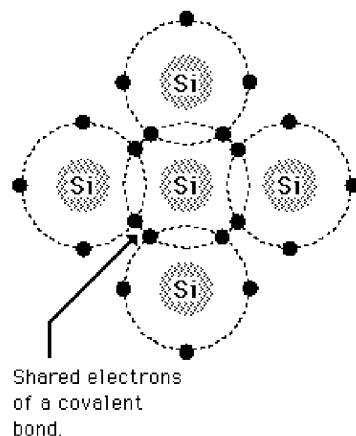
### רקע כימי לטרנזיסטורים

המודל של בוהר ניסה להסביר את תופעת התכונות המשותפות ליסודות באותה עמודה של הטבלה המחזורית אותה בנה מנדלייב כמה עשרות שנים קודם לכן. המודל קובע שכל חומר מורכב מאטומים, שלהם יש גרעין עם פרוטונים (חלקיקים עם מטען חשמלי חיובי) וניוטונים (חלקיקים ללא מטען) ואלקטרונים (עם מטען שלילי) שסובבים את הגרעין.

**דוגמה** סיליקון (צורן) הוא מספר 14 בטבלה המחזורית, כלומר יש לו 14 פרוטונים (ובמקרה הזה גם 14 ניוטרונים) וענן אלקטרונים בשכבות שונות סביב הגרעין עם מספר שונה של אלקטרונים בכל שכבה.

בוהר גילה בנוסף שהמסלול (המעגל, השכבה של אלקטרונים) האחרון של כל אטום במצב יציב הוא מלא, לכן אטום ירצה לתת או לקחת אלקטרונים מאטומים אחרים כדי לקבל מסלול מלא.

**דוגמה** הרבה אטומים של סיליקון יוצרים יחד במצב יציב גביש שמורכב משריג אטומי סיליקון עם מסלול אחד מלא לכולם כך שהם חולקים אלקטרונים (ראו איור במקרה של חמישה אטומים)



קשר בו אטומים חולקים (sharing) אלקטרונים נקרא קשר קוולנטי (covalent bond).

יון הוא אטום או מולקולה עם מספר לא שווה של פרוטונים (+) ואלקטרונים (-) והמטען של החלקיק הוא הפרש הערכים האלו.

קשר יוני הוא קשר בין אטומים שנוצר כשאלקטרון עובר מהמסלול האחרון של אטום אחד לאחר (כדי להשלים מסלול) אבל מספר הפרוטונים באטומים שווה למספר האלקטרונים בכל אטום לפני מעבר האלקטרון. כך לשניהם כעת יש מטען מנוגד לשני ומשם ניגודיות המטענים מקרבת (באמצעות כוח משיכה אלקטרון-סטטי) בין האטומים לכדי קשר.

## רקע פיזיקלי לטרנזיסטורים

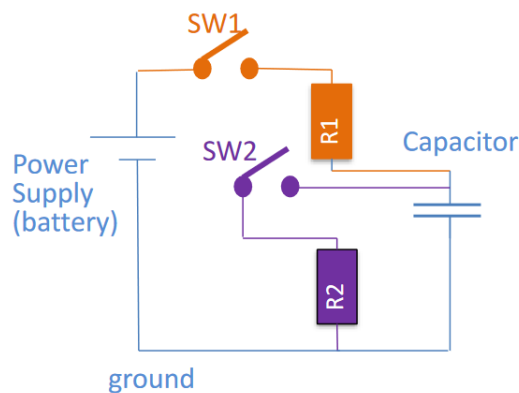
זרם חשמלי הוא תנועה של אלקטרונים (או באנלוגיה תנועה של חורים, כאשר האלקטרונים השליליים עוברים בין חורים שהם אחרת חיוביים). בקונבנציה הזרם נע מה-+ ל-.-.

מתח (פוטנציאל) נמדד בוולט והוא היכולת להזרים, כאשר סוללה בעצם פשוט מחזיקה מתח וכמו מגדל מים באנלוגיה מים, אפשר לעשות בו חור וכך לגרום לזרימה אבל כל עוד לא מחברים/מחוררים את הכלי לא יקרה שום דבר.

מטען הוא מספר האלקטרונים שמאוחסנים.

קיבול זו היכולת להחזיק מטען, כאשר בעת אחסון מטען נוצר מתח בקבל (מקביל למיכל מים ולחץ).

**דוגמה** נביט במעגל הבא. R1 הוא נגד (שקול לצינור צר יותר, שיוצר התנגדות). אם נסגור את המתג הראשון, נסגור מעגל בין הסוללה לקבל כך שאלקטרונים ייזרמו מהסוללה לקבל מלמעלה ומהקבל לסוללה מלמטה והקבל יקבל את אותו המתח של הסוללה. אם ננתק את המתג הקבל ימשיך להחזיק את המתח, ואם נדליק את המתג השני יהיה לנו זרם קצר מהקבל אליו עם כיוון השעון (בחלקו העליון של הקבל היונים החיוביים ומתחתיו השליליים, והאלקטרונים הם אלו שנעים).



בהקשר של מחשבים נקבע מתח נמוך (עד 1.5v) להיות 0 ומתח גבוה (לפחות 3.5v) להיות 1 - "כי ככה". בין 1.5 ל-3.5 וולט לא אמורים להיות במצב יציב, רק במעבר בין המצבים. האנלוגיה כאן היא האם מיכל מים הוא מלא או ריק.

## מוליכים למחצה

מוליך למחצה הוא חומר שלא מוליך חשמל מאוד טוב (מולכותו היא בין נחושת למוליך).

**דוגמה** סיליקון טהור הוא מוליך למחצה כי בצורת הגביש עליה דיברנו יש מעט מאוד אלקטרונים חופשיים (הרבה מהם תפוסים בין כמה אטומים בקשר קוולנטי) ולכן קשה להזרים דרכו זרם.

אילו (doping) הוא תהליך שבו "מלכלכים" את הסיליקון.

- P-type: נוסף לסיליקון קצת אלומיניום (לו 3 אלקטרונים מתוך 4 במסלול האחרון) כך שייקשר לאטומי הסיליקון כך שלחומר עכשיו יהיה חסר אלקטרון והוא ישמח לקבל אותו, ואז אלקטרונים יעברו בקלות בין האי-שלמויות האלה (פעם ישלים את המחסור במוקד לכלוך אחד, ואז יקפוץ לאחר, וכו'). החורים שנוצרים כשאין את האלקטרון הנדרש ליציבות נעים (לשם התאוריה), בכיוון ההפוך מהאלקטרונים וכך נוצר זרם חיובי בכיוון ההפוך מתנועת האלקטרונים.

- N-type: העיקרון הנ"ל רק עם זרחן (לו 5 אלקטרונים כלומר 1 במסלול האחרון) כך שיווצר עודף אלקטרונים והאלקטרונים העודפים חופשיים לנוע לאן שירצו ויצרו זרם.

למוליך מחצה מסוג P ו-N אין מטען חיובי או שלילי אלא רק סיבות שונות לתנועת האלקטרונים כתוצאה מהרצון להשלים מסלולים אחרונים באטומים.

הצמדה של חומרים מסוג P ו-N יוצרת יונים - האלקטרונים מ-N שמחים לקפוץ ל-P שם "צריך" אותם. שני כוחות פועלים בעת הצמדת חומרים שכזו:

- הרצון של המסלולים להתמלא - מה שגורם לאלקטרונים לקפוץ מ-N ל-P.

- הכוח החשמלי שיוצרים האלקטרונים - כוח דחייה בין מטענים שליליים שמונע קפיצת אלקטרונים מ-N ל-P (אומר "יש לי מספיק שליליים כבר").

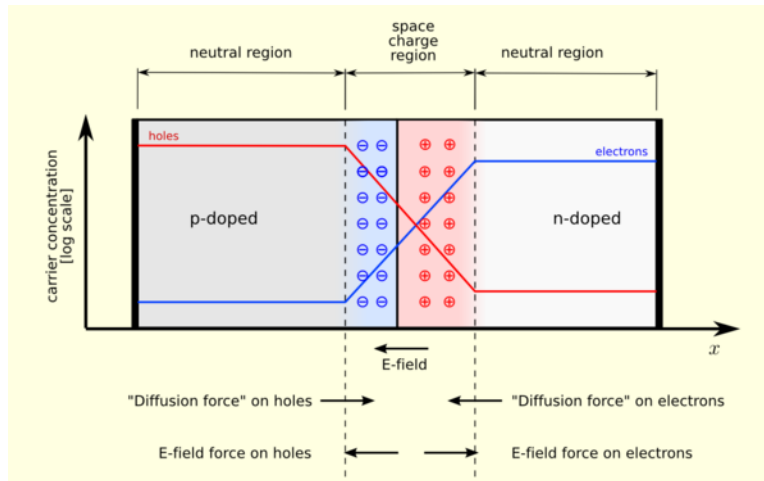
## צומת p-n

ההצמדה הזו נקרא צומת PN (PN junction) והיא מוליכה מכיוון אחד וחוסמת זרם מכיוון אחר (כמו שסתום!). המנגנון שהצומת מספק

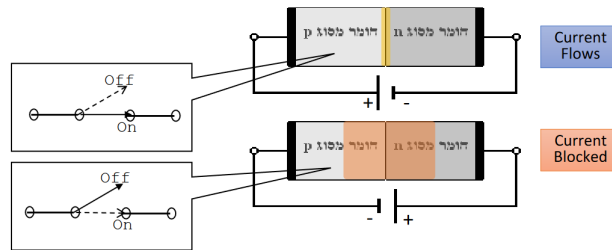


נקרא דיודה (diode) ומסומן באיורים הבאים

בשל תזוזה מקרית של אלקטרונים ופרוטונים בסמוך לצומת, מצליחים לעבור אטומים יוניים שליליים מ-N ל-P וחיוביים להפך (בניגוד לכיוון הזרימה). כשמספיק התחלפויות כאלה קורות, ישנה מאסה של אטומים יוניים חיוביים ב-N ומאסה של שליליים ב-P שלא יעברו לצד השני בגלל שהם חלק מהגביש כבר. בצורה זו נוצר מחסום מכוח כוח הדחייה החשמלי שגורם להפסקת הזרימה דרך הצומת והחזקת מתח בו (ראו איור)



עתה חיבור סוללה לדיודה נותן לנו תכונות מעניינות.



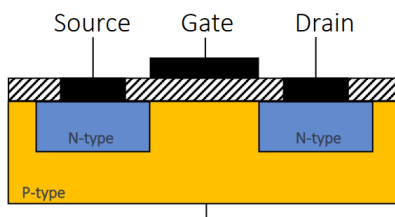
- חיבור סוללה עם  $P-L$  ו- $N$  לגרום להרבה מאוד יונים חיוביים לזרום מ- $P$  ל- $N$  ויוניים שליליים מ- $N$  ל- $P$  (בהתאם לכיוון הזרימה לפני שנחסמה) וכך יצטמצם המרווח באמצע עד ל-0 ותהיה לנו זרימה רגילה, כאילו סגרנו מתג.
- חיבור סוללה עם  $P-L$  ו- $N$  לגרום ליוניים חיוביים ושליליים להגיע לחומרים ולחזק את היונים במרווח שכרגע מונעים מעבר ורק יחזקו את החסימה, כך שלמעשה דימינו התנהגות של פתיחת מתג.

## MOS-FET

טרנזיסטור MOS-FET עשוי משלושה חומרים: מוליך למחצה; תחמוצת מבודדת; ומתכת. יש לו בנוסף שלוש רגליים: source; drain; ו-gate (ורגל הארקה שמחוברת תמיד).

## דרך הפעולה של ווריאנט ה-N-Channel

באיור ניתן לראות NMOS, וריאנט מבין שניים של MOS-FET (השני משלים לו רק ש- $N$  ו- $P$  במיקומים הפוכים). החומר המקווקו הוא המבודד והשחור הוא המתכת.

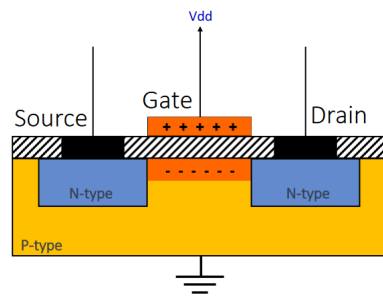


נוכח כי זרימה ניתן לקבל רק מ-P ל-N ולכן אי אפשר אף פעם להזרים שום דבר מהמקור (source) לשפך (drain) ולהפך. יש לנו למעשה שתי דיודות גב אל גב (שקצוותיהן המקור והשפך).

אם המתכת של השער מקבלת מטען, האזור בין השער למוליך-למחצה נהיה קבל כי הוא מחזיק הפרשי מטענים!

**הערה** את כל ארבעת הרגליים תמיד נחבר לאנשהו - או לאדמה או לסוללה או לטרנזיסטור אחר.

- אם נחבר את השער לאדמה (הארקה), יהיו לנו שני צמתי n-p שלא ניתן יהיה להזרים דרכן (ובפרט בין S ל-D דבר).
- אם נחבר את השער למתח, הקבל שהזכרנו למעלה מקבל מתח ועכשיו יש מטען חיובי מעליו ושילי מתחתיו, כלומר ישנם אלקטרונים חופשיים ב-p-type, וכשאלו נוגעים בחומר n-type משני הצדדים יוצרים ערוץ אלקטרוניים חופשיים דרכו כן יכול לעבור זרם, ומכאן השם n-channel.



מה שקיבלנו בסופו של דבר הוא סוויץ' שאנחנו יכולים לשלוט בו באמצעות זרם לשער (0 או 1). את הטרנזיסטור נסמן בסימול הבא -

P-channel עובד אותו הדבר רק הפוך - הזרמת "0" לשער תסגור את המתג ו-"1" תפתח אותו. ההבדל המהותי היחיד חוץ מהחומרים הוא שיש מתח שמחובר מלמטה במקום הארקה. להלן טבלת סיכום של דרך הפעולה של הטרנזיסטורים.

Gate	"0"	"1"
N-MOS		
P-MOS		

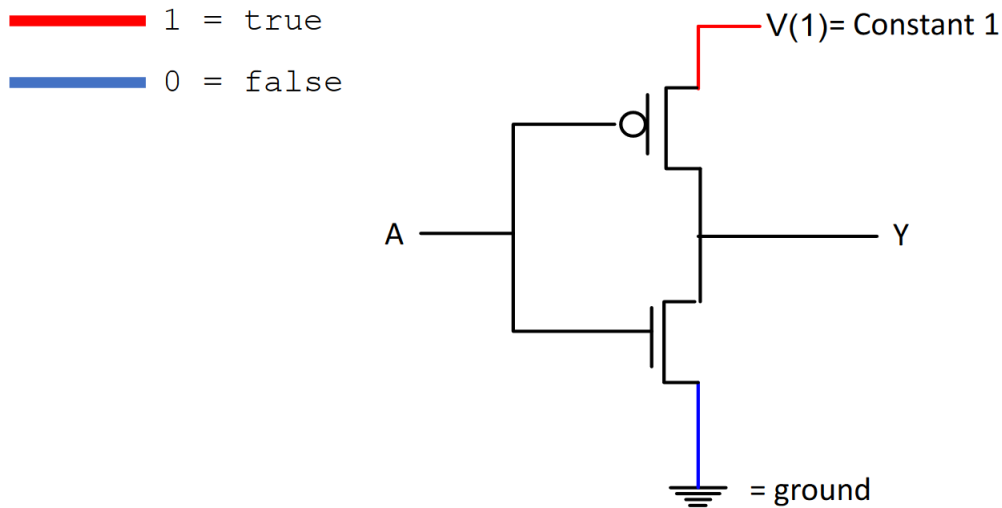
**הערה** בתחום ככלל, מסמן שלילה, ב-PMOS למשל "שוללים" את המתח ומתנהגים הפוך ממנו. גם שערי NOT מסומנים עם עיגול.

## בניית שערים מטרנזיסטורים

טרנזיסטורים הם שימושיים לנו כי אנחנו יכולים לבנות מהם שערים לוגיים.

**דוגמה** נבנה שער NOT (Inverter) שמסומן ב-

הבנייה דורשת שני MOF-SETים (P-Channel למעלה ו-N-Channel למטה), והיא כבאיור.



$A$  הוא הקלט ו- $Y$  הוא הפלט. כש- $A$  הוא "1", יעבור זרם של 0 (שהוא זניח) דרך ה-N-Channel למטה (השער דלוק) ולא יזרום שום דבר דרך ה-P-Channel למעלה (השער דלוק לכן אין זרימה). סה"כ אין שום זרימה עם מתח לא זניח לכן  $Y$  יהיה "0".

בהתאם אם  $A$  הוא "0" אז ה-PMOS יזרים דרכו זרם קבוע של "1" ו- $Y$  יהיה "1".

**הערה** צריך את ה-NMOS התחתון כי אחרת ב- $A = 1$  יש לנו מעגל פתוח שיכול להיות לו כל זרם ולא בהכרח "0" כמו שאנחנו רוצים.

## תרגול

בסיס ספירה הוא דרך לייצג מספרים ממשיים. בבסיס עשרוני נבצע את ההמרה הבאה

$$(a_4 a_3 a_2 a_1 a_0 . a_{-1} a_{-2} a_{-3})_{10} = a_4 10^4 + \dots + a_0 10^0 + a_{-1} 10^{-1} + a_{-2} 10^{-2} + a_{-3} 10^{-3}$$

בסיס בינארי משתמש בסיביות (ביטים) שערך 0 או 1, בעשרוני 0 עד 9, ובהקסדצימאלי  $A - F$ ,  $0 - 9$ .

טווח המספרים בעל  $n$  ספרות בבסיס  $r$  הוא  $\{0, \dots, r^n - 1\}$

במקרה הכללי  $a_m \dots a_0 . a_{-1} \dots a_{-n}$  בבסיס  $r$  מייצג את המספר  $\sum_{i=-n}^m a_i r^i$ .

פעולות חשבוניות אפשר לעשות באותו האופן כבבסיס עשרוני (חיבור ארוך שבו עוברת ספרה הלאה, כאשר הספרות נגמרות לא בהכרח אחרי 9).

מעבר לבסיס 10 הוא די פשוט (פריסת הייצוג וחישוב מכפלות וחיבור בבסיס עשרוני). מעבר מבסיס 10 לבסיס אחר הוא פשוט תהליך איטרטיבי של פעולות מודולו ( $r$  הבסיס) כאשר מה שהוא לא השארית יהיו הספרה הראשונה (משמאל), השנייה, וכו' עד שנגמרות הספרות.



לא כללתי כאן אינסוף דוגמאות להמרות בין בסיסים כי לא מספיק משעמם לי.

במקרה הכללי נמיר משני בסיסים כלשהם דרך בסיס 10 כאשר את הרכיב משמאל ומימין לספרה העשרונית נטפל באופן נפרד וזהה (עד כדי חלוקה איטרטיבית בשמאל ומכפלה איטרטיבית בימין).

**דוגמה** נמיר את  $(0.79272)_{10}$  לבסיס 4. נכפיל את המספר ב-4 ונקבל 3.17088. לכן הספרה הראשונה היא 3 והשארית היא 0.17088. נבצע זאת שוב ועתה נקבל 0 ושארית 0.68352, וחוזר חלילה עד שהשארית תהיה 0, כאשר עתה הספרות הן מלמעלה למטה במקום למטה למעלה בספרות הרגילות.

## שיטות לייצוג מספרים

- שיטת גודל וסימן: מספר יתחיל בביט סימן (0 חיובי 1 שלילי) ושאר הביטים יהיו ייצוג בינארי של המספר.

$$\text{דוגמה } 01001 = (-1)^0 (2^3 + 2^0) = 9$$

טווח הייצוג בשיטה זו הוא  $-(2^{n-1} - 1), \dots, 0, \dots, (2^{n-1} - 1)$ .

- שיטת המשלים לאחד: ביט סימן, שלפי ערכו נדע האם שאר הספרות הן הערך הבינארי של המספר וזהו, או שזהו הערך הבינארי של המשלים של המספר ל- $(2^{n-1} - 1)$ , ובנוסף הפיכת כל ביט תספק לנו את השלילה של המספר. לדוגמה,  $00100 = 4$ , ואם נהפוך כל ביט נקבל  $11011 = -4$ .

חיסור מספרים הוא די פשוט: צריך לחבר את המספרים, ואם יש carry לאחר החישוב נמחק אותו ונוסיף אחד לתוצאה.

$$\text{דוגמה } 5 = (+9) + (-4) = 9 - 4 \text{ כי } 01001 + 11011 = 100100 \text{ וזה הופך ל-} 00101.$$

טווח הייצוג הוא כמו בשיטת גודל וסימן ויש בו, כמו בשיטה הקודמת 0 חיובי ו-0 שלילי.

- שיטת המשלים לשניים: ביט סימן, שעבור מספרים שליליים ערכו הנגדי למספר שמתקבל מהיפוך הביטים והוספת אחד.

$$\text{דוגמה } -4 = -00100 = -(00011 + 1) = 11100.$$

לחלופין לחישוב המשלים אפשר ללכת מימין לשמאל עד ל-1 הראשון, לא לשנות אותו, ואז להפוך את כל מה שמשמאלו (ואז לא צריך להוסיף 1).

$$\text{דוגמה } \text{למה שווה } -5 \text{ בשיטת המשלים ל-2? } 00101 = 5, \text{ נוסיף אחד ונשנה את ביט הסימן ונקבל } 10110.$$

כדי לחסר מספרים, נסכום אותם ונמחק carry אם יש.

**הגדרה** overflow הוא מצב שבו אנחנו סוכמים שני מספרים באותו הסימן ומקבלים מספר בסימן הפוך, במקרה זה התוצאה כמובן שגויה.

$$\text{דוגמה } \text{נשתמש בשיטת המשלים ל-1 עם 5 ביטים, } 01011 + 01101 = 11000, \text{ כלומר סכמנו חיוביים וקיבלנו תוצאה שלילית!}$$

**הערה** הפתרון ל-overflow הוא הוספת ביטים כך שיגדל טווח הייצוג.