

נתונים כלליים

גדלים:

$$[E] = \frac{Newton}{Coulomb} = \frac{Volt}{Meter}; [H] = \frac{Amper}{Meter}$$

$$m = m_{ily} = 10^{-3}; \mu = micro = 10^{-6}$$

$$n = nano = 10^{-9}; p = pico = 10^{-12}$$

$$A^\circ = 10^{-10} [m] = 10^{-8} [cm]$$

אנרגיה:

$$1 cal = 4.189 joule$$

קבוע הגזים:

$$R = 0.082 \left[\frac{lit \cdot atm}{K \cdot mol} \right] = 8.31 \left[\frac{joule}{K \cdot mol} \right]$$

קבוע בולצמן:

$$K_B = 1.380662 \cdot 10^{-23} [Joule / K]$$

$$K_B = 8.614 \cdot 10^{-5} \left[\frac{eV}{K} \right]$$

מספר אבוגדרו:

$$6.022 \cdot 10^{23} [1 / mol]$$

קבוע פלאנק:

$$h = \hbar \cdot 2\pi = 6.63 \cdot 10^{-34} [Joule \cdot sec]$$

מסת האלקטרון:

$$m_0 = 9.11 \cdot 10^{-31} [kg]$$

מטען האלקטרון:

$$e = 1.60219 \cdot 10^{-19} [c]$$

מסת פרוטון:

$$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} [kg]$$

מהירות האור:

$$c = 3 \cdot 10^8 [m / sec]$$

יחידות:

$$[joule] = 1.6 \cdot 10^{-19} [eV]$$

$$watt = \left[\frac{kg \cdot m^2}{sec^3} \right]; ohm = \left[\frac{kg \cdot m^2}{Amp^2 \cdot sec^3} \right]$$

$$joule = \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{sec^2} \right]; \rho = \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

שונו:

$$\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} [(A \cdot m) / Watt]$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} [n \cdot m^2 / c^2]$$

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0 \text{ קבוע דיאלקטרי של חומר}$$

$$T(^{\circ}K) = T(^{\circ}C) + 273$$

$$K_B T|_{T=300} \approx 0.026 eV$$

$$\phi_{T=300} \approx 0.026 V$$

הגדרות עבור מ"מ אינטרינזי ואקסטרזי

הפער האסור (E-Gap): E_g

רמת פרמי: E_F

רמת פרמי במ"מ אינטרנזי: E_i

רמת האנרגיה של אלקטרוני הערכיות: E_D

של הדונורים: E_A

רמת האנרגיה הגבוהה ביותר של אלקטרוני האקספטורים: N_C

צפ' המצבים בפס ההולכה: N_V

צפ' המצבים בפס הערכיות: N_D

צפ' הדונורים: N_A

צפ' האקספטורים: N_D^+

ריכוז הדונורים המיוננים (ריכוז האלקט' שעבר לפס ההולכה): N_A^-

ריכוז האקספטורים מיוננים (ריכוז החורים שעבר לפס הערכיות): n_i

צפ' נושאי המטען האינטרינזי – ריכוז האלקטרונים שעלו מפס הערכיות לפס ההולכה: n_0

צפ' האלקט' בפס ההולכה בש.מ: p_0

ריכוז האלק' בש.מ. בחומר p: n_{0p}

ריכוז האלק' בש.מ. בחומר n: n_{0n}

ריכוז החורים בש.מ. בחומר p: p_{0p}

ריכוז החורים בש.מ. בחומר n: p_{0n}

ריכוז אלקט' כללי בחומר n-type: n_n

ריכוז חורים כללי בחומר n-type: p_n

ריכוז אלקט' כללי בחומר p-type: n_p

ריכוז חורים כללי בחומר p-type: p_p

עודפי נושאי מטען ממצב ש.מ: $\Delta p, \Delta n$

$$p = \Delta p + p_0$$

$$n = \Delta n + n_0$$

התפלגות Fermi-Dirac

הגדרה: התפלגות פרמי דירק מתארת את אכלוס המצבים המסתבר ביותר.

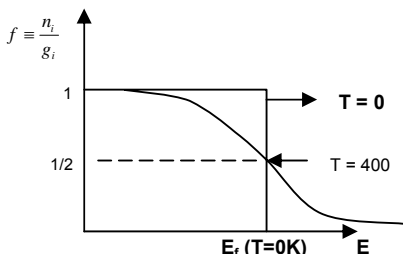
כלומר, איזה אחוז מרמת האנרגיה מאוכלסת באלקטרונים.

כאשר הפונקציה שווה 1 הכי מסתבר שהרמה תהיה מלאה.

ח- צפיפות הפתרונות המאכלסים באלקטרונים.
ג- צפיפות פתרונות שרדינגר.

$$f(E) = \frac{n_i}{g_i} = \frac{1}{1 + e^{\frac{(E-E_f)}{k_B T}}}$$

(k_B – קבוע בולצמן)



הערה:

ניתן לבצע קירוב קלאסי של פרמי דירק (השמטת ה-1

$$E_F - E \gg k_B T$$

בנתאי ש-1 קירוב זה נקרא גם קירוב בולצמן.

הגדרת Ef

1. רמת האנרגיה שבה יש סיכוי של 50% למצוא אלקטרון (הרמה שבה 1/2 מהמצבים מלאים).

2. זו הרמה האחרונה שבה נמצאים חלקיקים בטמפ' האפס המוחלט.

3. בטמפ' האפס המוחלט כל רמות האנרגיה עד E_F מאוכלסות.

4. במל"מ מסוג n ככל שנזהם יותר כך רמת פרמי תעלה לכיוון E_C .

5. במל"מ מסוג p ככל שנזהם יותר כך רמת פרמי תרד לכיוון E_V .

6. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

7. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

8. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

9. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

10. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

11. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

12. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

13. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

14. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

15. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

16. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

17. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

18. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

19. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

20. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

21. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

22. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

23. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

24. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

25. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

26. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

27. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

28. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

29. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

30. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

31. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

32. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

33. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

34. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

35. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

36. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

37. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

38. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

39. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

40. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

41. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

42. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

43. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

44. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

45. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

46. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

47. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

48. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

49. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

50. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

51. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

52. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

53. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

54. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

55. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

56. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

57. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

58. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

59. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

60. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

61. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

62. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

63. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

פסי ערכיות והולכה

1. פס הערכיות (Valence Band): הפס בעל האנרגיה הגבוהה ביותר המאכלס באלקטרונים (ב-0 t).

2. פס ההולכה (Conduction Band): הפס הריק מאלקטרונים באנרגיה הנמוכה ביותר במל"מ (ב-0 t).

3. Ev - האנרגיה במקסימום פס הערכיות.

4. Ec - האנרגיה במינימום פס ההולכה.

5. Eg - הפער האסור: המרחק בין מקסימום פס הערכיות למינימום פס ההולכה.

6. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

7. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

8. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

9. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

10. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

11. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

12. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

13. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

14. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

15. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

16. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

17. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

18. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

19. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

20. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

21. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

22. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

23. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

24. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

25. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

26. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

27. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

28. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

29. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

30. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

31. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

32. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

33. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

34. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

35. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

36. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

37. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

38. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

39. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

40. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

41. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

42. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

43. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

44. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

45. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

46. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

47. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

48. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

49. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

50. אם יש געג בין 2 פסים אז זהו מבנה של מתכת מוליכה.

גידול סיליקון

1. מכניסים גרגיר סיליקון לאמבט סיליקון מותר.

2. מוציאים אותו באיטיות.

3. נוצר "נקניק" בקוטר 30 ס"מ ויכול להגיע לאורך של מטר.

חורים ואלקטרונים

הגדרת חורים: מצבים ריקים בפס אנרגיה.

מסה אפקטיבית:

האלקטרונים והחורים בגבישי אינם חופשיים לגמרי. עקב הפוטנציאל הגבישי המסה שלהם משתנה למסה אפקטיבית.

באותו פס $m_e^* = -m_e^*$; $m_h^* = m_e^*$; $m_e^* = \hbar^2 \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right)^{-1}$

אם $m_e^* > 0$ אז E(k) קעור.

אם $m_e^* < 0$ אז E(k) קמור.

המסה האפקטיבית מבטאת רק את הכוחות שהשריג מפעיל על החלקיק (כוחות פנימיים).

משמעות ערך שילי למסה אפקטיבית: החלקיק ינוע בכיוון ההפוך מהמוצא.

מסת האלקטרון במינימום פס ההולכה קבועה (קרוב לפס פרבולי).

מסת החור במקסימום פס הערכיות קבועה (קרוב לפס פרבולי).

הערה:

קרוב לפס פרבולי תקף עבור אנרגיה של עד 0.2eV ממינימום פס הערכיות או מקסימום פס ההולכה.

עבור פס פרבולי מתקיים:

$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*}$; $m_e^* = const$

צפיפות נושאי המטען במל"מ (לא מנוון):

חוק פעולת המסה

$n_i = \sqrt{n_0 \cdot p_0} = \sqrt{N_C \cdot N_V} \cdot e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$

$n_{i(T2)} = n_{i(T1)} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$

צפיפות אלקטרונים בפס ההולכה בש"מ:

$n_0 = N_C \cdot e^{-\frac{(E_C - E_F)}{k_B T}} = n_i \cdot e^{-\frac{(E_F - E_i)}{k_B T}}$

צפיפות חורים בפס הערכיות בש"מ:

$p_0 = N_V \cdot e^{-\frac{(E_F - E_V)}{k_B T}} = n_i \cdot e^{-\frac{(E_i - E_F)}{k_B T}}$

משוואת הנייטרליות:

$n + N_A^- = p + N_D^+$

הערות:

במל"מ מסוג n: $N_A^- = 0$

במל"מ מסוג p: $N_D^+ = 0$

אם כל דונור תורם 2 אלקטרונים אז יש להכפיל את N_d^+ ב-2.

ריכוז דונורים מיוננים:

$N_D^+ = N_D (1 - f_{FD}) = N_D \frac{1}{e^{\frac{E_F - E_D}{k_B T}} + 1}$

ריכוז אקספטורים מיוננים:

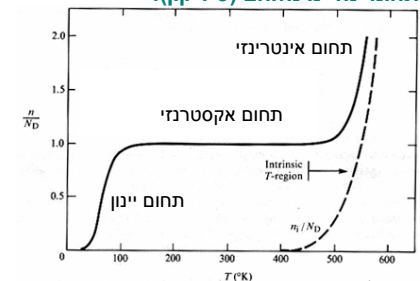
$N_A^- = N_A \cdot f_{FD} = N_A \frac{1}{e^{\frac{E_A - E_F}{k_B T}} + 1}$

רמת פרמי:

רמת אנרגיה בה יש 50% סיכוי למצוא אלקטרון.

$E_F = E_i + \frac{1}{2} K_B T \cdot \ln \left(\frac{n_0}{p_0} \right)$

תחומי מל"מ מזוהם (סיליקון):



מל"מ אינטרינזי (לא מזוהם, לא מנוון)

הגדרה:

- מל"מ לא מזוהם.
- חומר נקי ללא החדרת אטומים זרים.
- במל"מ אינטרינזי, נושאי המטען בשיווי משקל נוצרים ע"י עירור תרמי.
- על כל אלקטרון שעולה לפס ההולכה נשאר חור בפס הערכיות ולכן:

$n = p = n_i$

צפיפות האלקט' שנמצאים בפועל בפס ההולכה:

$n_0 = N_C \cdot e^{-\frac{(E_C - E_F)}{k_B T}} \quad (\ll E - E_F \gg k_B T)$

$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* K_B T}{h^2} \right)^{3/2}$

צפיפות החורים שנמצאים בפועל בפס הערכיות:

$p_0 = N_V \cdot e^{-\frac{(E_F - E_V)}{k_B T}} \quad (\ll E_F - E \gg k_B T)$

$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* K_B T}{h^2} \right)^{3/2}$

רמת פרמי במל"מ אינטרינזי - E_i:

$E_i = E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{1}{2} K_B T \cdot \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right)$

$E_i = E_i = E_V + \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \cdot \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right)$

$E_i = E_i = E_C - \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \cdot \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right)$

מל"מ אקסטרנזי (מזוהם, לא מנוון)

הגדרה:

מל"מ המזוהם ע"י חומר אחר. **הערה:** זיהום = אילוח = Doping.

במצב שיווי משקל ובהנחת יינון מלא מתקיים:

$\begin{cases} n_0 \cdot p_0 = n_i^2 \\ n_0 + N_A^- = p_0 + N_D^+ \end{cases}$

$n_0 = \frac{1}{2} \left(-N_A^- + N_D^+ \pm \sqrt{(N_A^- - N_D^+)^2 + 4n_i^2} \right)$

$p_0 = \frac{1}{2} \left(-N_D^+ + N_A^- \pm \sqrt{(N_D^+ - N_A^-)^2 + 4n_i^2} \right)$

מל"מ n (ע"פ הקירוב הקלאסי):

$E_F - E \gg K_B T$

הגדרה:

- מל"מ המזוהם ע"י אטום עם אלקטרון אחד יותר מאטומי המל"מ.
- אטומים אלו (המזהמים) נקראים דונורים (Doners).

E_C _____

E_D _____

E_V _____

הערה:

בתחום האקסטרנזי כל הדונורים מיוננים (בקרוב טוב):

$N_D \cong N_D^+$

עבור טמפ' חדר (T=300K) במל"מ מסוג n:

הנחות:

p_n זניח, יינון מלא.

$N_A = 0$

$N_D \cong N_D^+$

משוואות:

$n_0 = N_C e^{-\frac{(E_C - E_F)}{k_B T}} = N_D^+ \cong N_D$

$E_F = E_i + K_B T \cdot \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right)$

$E_F = E_C - K_B T \cdot \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right)$

$E_F = \frac{1}{2} (E_C + E_D) - \frac{1}{2} K_B T \cdot \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right)$

הערות:

- אם n_i הוא מאותו סדר גודל של N_D אז אסור להזניח את p .
- אם n_i הוא קטן בכמה סדרי גודל מ- N_D אז מותר להזניח את p .

אנרגיית יינון במל"מ מסוג n:

האנרגיה הדרושה ליינון דונור:

$E_{min} = E_C - E_D$

מל"מ p (ע"פ הקירוב הקלאסי):

$E_F - E \gg K_B T$

הגדרה:

- מל"מ המזוהם ע"י אטום עם אלקטרון אחד פחות מאטומי המל"מ.
- אטומים אלו (המזהמים) נקראים אקספטורים (Acceptors).

E_C _____

E_A _____

E_V _____

הערה:

בתחום האקסטרנזי כל האקספטורים מיוננים (בקרוב טוב):

$N_A \cong N_A^-$

עבור טמפ' חדר (T=300K) במל"מ מסוג p:

הנחות:

p_n זניח, יינון מלא.

$N_D = 0$

$N_A \cong N_A^-$

$p_0 = N_V e^{-\frac{(E_F - E_V)}{k_B T}} = N_A^- = N_A^-$

$E_F = E_i - K_B T \cdot \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$

$E_F = E_V + K_B T \cdot \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right)$

$E_F = \frac{1}{2} (E_A + E_V) + \frac{1}{2} K_B T \cdot \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right)$

הערות:

- אם n_i הוא מאותו סדר גודל של N_A אז אסור להזניח את n .
- אם n_i הוא קטן בכמה סדרי גודל מ- N_A אז מותר להזניח את n .

אנרגיית יינון במל"מ מסוג p:

האנרגיה הדרושה ליינון אקספטור:

$E_{min} = E_A - E_V$

טמפ' אינטרינזי

הטמפ' שמעליה המל"מ חוזר להיות אינטרינזי.

מל"מ יכנס לתחום האינטרינזי כאשר:

$n_i = N_D \text{ or } n_i = N_A$

עבור מל"מ מסוג n:

$T_{max} = \frac{E_g}{2K_B \ln \left(\frac{(N_C \cdot N_V)^{\frac{1}{2}}}{N_D} \right)}$

עבור מל"מ מסוג p:

$T_{max} = \frac{E_g}{2K_B \ln \left(\frac{(N_C \cdot N_V)^{\frac{1}{2}}}{N_A} \right)}$

קשר איינשטיין:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{K_B T}{q}$$

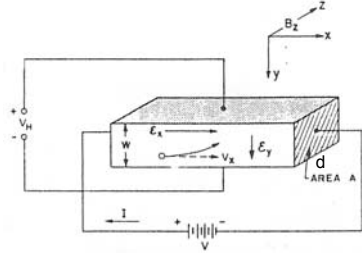
זרם כללי (סחיפה + דיפוזיה):

$$I_n = qA \left(\mu_n n E + D_n \frac{dn}{dx} \right); I_p = qA \left(\mu_p p E + D_p \frac{dp}{dx} \right)$$

$$I_{TOT} = I_n + I_p$$

סריג זרם במל"מ

ניסויי HALL



- שמים מקור מתח שיצור זרם בכיוון ציר X (ולכן המל"מ לא בשיווי משקל).
 - מפעילים שדה מגנטי לכיוון ציר Z.
 - על המטענים (חורים) פועל כח לורנס על ציר Y:
- $$f_2 = qv \times B$$
- $$f_2 = qv_x B_z \hat{y}$$
- המטענים מצטופפים בצד אחד (לפי הציור) - בצד העליון ונוצר שדה חשמלי והפרש פוטנציאלים (לפי הציור - ביחס לצד התחתון):

$$\epsilon = \frac{V}{w}$$

$$V_H = v_x B_z w = \frac{I \cdot B_z}{q \cdot d \cdot p} = \epsilon_y w$$

הערה: V_H אינו תלוי ב- n , p (ריכוז נושאי המטען) כי נושאי המטען מצטמצמים עם I .

השדה מפעיל כח על המטענים:

$$f_1 = qE_y \hat{y}$$

לאחר זמן מה נגיע למצב עמיד שבו מתקיים:

$$qE_y = qv \times B$$

נמדוד את המתח הנוצר:

- אם המתח חיובי אז נושאי מטען הרוב הם חורים.

- אם המתח הוא שלילי אז נושאי מטען הרוב הם אלקטרונים.

- כך נדע את סוג נושאי מטען הרוב (סוג המל"מ).

- הכח על האלקט' והחורים יפעל באותו הכיוון (לפי הציור - כלפי מעלה).

נמצא את R_H מתוך המשוואה הבאה:

$$R_H = \frac{I_x B_z w}{q A V_H}$$

ניתן למצוא את הניידות מתוך המשוואה הבאה:

$$R_H = \frac{V_x}{I_x} = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} = \frac{l}{q(n\mu_n + p\mu_p)A}$$

קבוע הול (אינו מבטא התנגדות):

במל"מ אינטרניזי: p-type : n-type

$$R_H = \frac{-1}{qn} \quad R_H = \frac{1}{qp} \quad R_H = \frac{\epsilon_y}{J_x B}$$

$$R_H = \frac{1}{q} \cdot \frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{(\mu_p p + \mu_n n)^2}$$

הערה:

- אם קבוע הול חיובי אז גם מתח הול חיובי.
- אם קבוע הול שלילי אז גם מתח הול שלילי.

עבור תחום (1) מהטבלה בעמודה הבאה:

$$\mu_{(T_1)} = \mu_{(T_2)} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}}$$

עבור תחום (2) מהטבלה בעמודה הבאה:

$$\mu_{(T_1)} = \mu_{(T_2)} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{-\frac{3}{2}}$$

הניידות (תנועת נושאי המטען) מוגבלת ע"י:

- פיזור יוני: התנגשות האלקט' בזיהומים מיונים גורמת להאטתם ושינוי מסלולם. עבור זיהום נמוך מ- 10^{15} cm^{-3} הפיזור היוני זניח.
- פיזור שריגי: התנגשות האלקט' בפונונים (תנודות האטומים) גורמת להאטתם ושינוי מסלולם. עבור זיהום נמוך מ- 10^{14} cm^{-3} המנגנון הדומיננטי הוא מנגנון הפיזור השריגי.

הערות:

- בטמפ' נמוכות הניידות מושפעת בעיקר מההתנגשות בזיהומים.
- בטמפ' יותר גבוהות המטענים נעים מהר יותר לכן נמצאים מעט יותר זמן בקרבת הזיהומים לכן מושפעים מהם פחות, והפונונים מתחזקים ומשפיעים יותר.

זרם סחיפה של אלקטרונים:

שדה - ϵ
שטח חתך - A
$$I_{d,n} = q \cdot A \cdot n \cdot \mu_n \cdot \epsilon = -q \cdot A \cdot n \cdot v_{d,n}$$

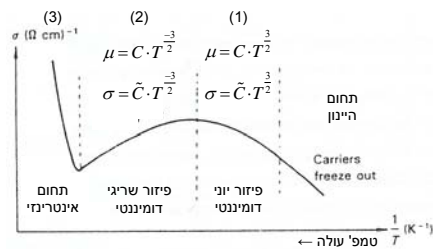
זרם סחיפה של חורים:

$$I_{d,p} = q \cdot A \cdot p \cdot \mu_p \cdot \epsilon = q \cdot A \cdot p \cdot v_{d,p}$$

מוליכות סגולית:

$$\sigma = \frac{q\mu_n n}{\text{מוליכות חורים}} + \frac{q\mu_p p}{\text{מוליכות אלקטרוניים}} = q(\mu_n n + \mu_p p)$$

- (1) הפיזור הדומיננטי הוא הפיזור היוני - העלאת הטמפ' גורמת לעליה במוליכות ← עליה במוליכות.
- (2) עליה נוספת בטמפ' ← הפיזור השריגי נעשה דומיננטי ← המוליכות והמוליכות יורדות.
- (3) מטמפ' 300°K , כל העלאה בטמפ' גורמת לייצור נושאי מטען חדשים ← המוליכות יורדת, אך הכמות הנוספת של נושאי המטען גורמת לעליה אקספוננציאלית במוליכות.



הערה:

הגרף נכון עבור סיליקון בזיהום של בין $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. אחרת הגרף עלול להראות שונה.

דיפוזיה:

- הדיפוזיה היא תזוזות מטען מאזור בעל ריכוז זיהום גבוה לאזור בעל ריכוז זיהום נמוך.
- אחת הדרכים ליצור דיפוזיה היא ע"י זיהום לא אחיד.
- הדיפוזיה נובעת מהפרש פוטנציאלים (כימי) בין 2 חלקי מל"מ.

זרם דיפוזיה:

זרם דיפוזיה של אלקטרונים $I_n = qAD_n \frac{dn}{dx}$

זרם דיפוזיה של חורים $I_p = -qAD_p \frac{dp}{dx}$

- D - מקדם הדיפוזיה שתלוי בטמפ', ברמת הזיהום ובסוג המטען.
- A - שטח חתך.

מוליכים למחצה מנוונים (זיהום גבוה)

מל"מ n מנוון:

כאשר אנרגיית פרמי גדולה יותר מ- E_C .

הערה:

במל"מ מנוון אסור לבצע את הקירוב הקלאסי.

ריכוז הדורונים שיגרום למל"מ להיות מנוון:

$$E_F \geq E_C; E_i \cong E_g / 2; N_D = n_i \cdot e^{\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$$

הערה:

ראה הרחבה בדף נוסחאות מל"מ.

תנועת נושאי מטען

סחיפה (drift): תנועת מטענים עקב שדה

מצב שיווי משקל:

שקול הכוחות הפועל על אלמנט הוא אפס.

מהירות סחיפה:

המהירות הממוצעת של אלקטרונים (חורים) תחת שדה (מתחת).

הסבר: לאלקטרון (חור) הנמצא במצב שיווי משקל יש תנועה אקראית (לא מכוונת).

סכום המהירויות של כל נושאי המטען החופשיים הוא אפס במצב שיווי משקל.

אם נפעיל שדה חשמלי נגרום לתנועה מכוונת של האלקטרונים לפי כיוון השדה.

במילים אחרות השדה גורם למהירות ממוצעת לכיוון מסוים ומהירות זו נקראת מהירות סחיפה ומסומנת v_d .

הערות:

- כל עוד השדה יחסית קטן, היחס בין השדה למהירות הסחיפה הוא ליניארי.
- אם נגדיל את השדה נגיע בסופו של דבר למהירות רוויה, מהירות שאותה לא נוכל לעבור (יחס לא ליניארי בין שדה למהירות).
- מהירות רוויה זו קרובה מאוד למהירות התרמית של נושאי המטען, המסומנת ב v_{th} .
- השפעת השדה מתבטאת בתוספת אנרגיה קינטית.

מהירות סחיפה:

τ - הזמן הממוצע בין ההתנגשויות של נושאי מטען חופשיים.

ϵ - שדה.

$$\mu = \frac{q\tau}{m}$$

n-type

$$v_{d,n} = \frac{q\tau_n}{m_e} \epsilon = -\mu_n \epsilon$$

p-type

$$v_{d,p} = \frac{q\tau_p}{m_h} \epsilon = \mu_p \epsilon$$

תופעת GUNN - התנגדות דיפרנציאלית שלילית:

- בחומר כמו GaAs יש 2 פסי הולכה האחד גבוה מהשני ופחות עקמומי מהשני.
- אם נגדיל את השדה יותר אלקטרונים יעברו מפס הולכה נמוך לגבוה.
- מכיוון שלפס הולכה הגבוה יש עקמומיות נמוכה יותר האלקטרון מרגיש "כבד" יותר בפס זה, ולכן הוא יותר איטי (מסה אפקטיבית גדולה יותר).
- תוצאה סופית: הגדלת שדה תגרום להקטנת מהירות זרימת האלקטרונים.

נוסחת מהירות עם שדה קריטי (גדול מאוד):

$$v_d = v_{th} \left(1 - e^{-\frac{\epsilon}{\epsilon_c}} \right)$$

פונונים:

ביטוי לרעידות (תנודות) האטומים. למשל, ככל שהטמפ' תגדל יוצור יותר פונונים.

ניידות μ (תלוייה בטמפ' וזיהום בלבד)

מסמנת את קלות התנועה של האלקטרונים / חורים.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_n} + \frac{1}{\mu_p} \quad \mu = \frac{q\tau}{m^*}$$

יצור והתאחדות נושאי מטען

הגדרות:

- Bulk - פנים המל"מ.
- Surface - פני שטח המל"מ בלבד.

הערה:

מעטה דבר רק על מצב של יינון מלא (כל אטומי הזיהום התינונו - לא נשארו נושאי מטען בפס הזיהום).

גנרציה:

- הפרדת זוג חור-אלקטרון לחור חופשי ואלקטרון חופשי (יצור נושאי מטען) ע"י העלאת אלקטרון לפס ההולכה והשאת חור בפס הערכיות.
- התליכים היוצרים גנרציה:

חום

יצור גנרציה בכל ה-Bulk ונקראת Gth.

אור

- לא כל נקודה במל"מ מקבלת את אותה כמות אור.
- הארת פני שטח גורמת לגנרציה רק על ה-Surface.

הארת פני שטח תתקיים רק כאשר:

$$E_p \gg E_g$$

1. הארת Bulk - גורמת לגנרציה ב-Bulk.

הארת Bulk תתקיים רק כאשר:

$$E_p \approx E_g$$

רקומבינציה:

- חיבור אלקטרון חופשי וחור חופשי לזוג קשור ע"י הורדת אלקטרון מפס ההולכה לפס הערכיות.
- ככל שיווצרו יותר מטענים עודפים כך יגדל קצב הרקומבינציה.

הרקומבינציה של המטען החופשי שנוצר מחימום נקראת Rth.

שיאהב:

העלמות / הוצאת זוגות עודפים של נושאי מטען (Δp) ו/או (Δn).

הזרקה:

יצור / הכנסה זוגות עודפים של נושאי מטען (Δp) ו/או (Δn).

הזרקה נמוכה:

מכניסים תוספת נושאי מטען שגדולה בכמה סדרי גודל מריכוז המיעוט וקטנה בכמה סדרי גודל מריכוז הרוב.

הזרקה של עד 10% מריכוז נושאי הרוב היא עדיין הזרקה נמוכה.

$$n_{0p} \ll \Delta n \text{ or } \Delta p \ll p_{0p} ; p_{0n} \ll \Delta n \text{ or } \Delta p \ll n_{0n}$$

הזרקה נמוכה מתקיים:

p-type:

$$n = \Delta n + n_{0p} \approx \Delta n$$

$$p = \Delta p + p_{0p} \approx p_{0p} = N_A$$

n-type:

$$n = \frac{\Delta n}{\gamma} + n_{0n} \approx n_{0n} = N_D$$

$$p = \Delta p + \frac{p_{0n}}{\gamma} \approx \Delta p$$

הזרקה גבוהה:

מכניסים תוספת נושאי מטען באותו סדר גודל של נושאי הרוב או יותר. הזרקה של יותר מ-10% מעל ריכוז נושאי הרוב היא הזרקה גבוהה.

$$p_{0p} \leq \Delta n \text{ or } \Delta p ; n_{0n} \leq \Delta n \text{ or } \Delta p$$

הזרקה גבוהה מתקיים עבור מל"מ n-p:

$$p = \Delta p + p_0 \approx \Delta p ; n = \Delta n + n_0 \approx \Delta n$$

הערה:

הזרקה מטענים עודפים גורמת:

$$p \cdot n > n_i^2$$

גנרציה / רקומבינציה תרמית:

בכל רגע נתון. $G_{th} = R_{th} = \beta n_0 p_0$

G_L - גנרציה כתוצאה מהפרעה חיצונית.

R_L - רקומבינציה של נושאי המטען שנוצרו ע"י G_L .

אורך חיים של מטעני מיעוט τ_n, τ_p :

- זהו זמן החיים הממוצע של מטעני העודף.
- מהרגע שהם נוצרים (גנרציה) עד לרגע שהם "נהרסים" (ריקומבינציה).

בהזרקה נמוכה:

$$\tau_e = \frac{1}{\beta p_{0p}} \ll p \text{-type} ; \tau_h = \frac{1}{\beta n_{0n}} \ll n \text{-type}$$

בהזרקה גבוהה:

$$p \text{-type: } \tau_e = \frac{1}{\beta(p_{0p} + \Delta p)} \quad n \text{-type: } \tau_h = \frac{1}{\beta(n_{0n} + \Delta n)}$$

אורך דיפוזיה L_n, L_p :

המרחק הממוצע שעובר מטען עודף בדיפוזיה עד העלמותו בריקומבינציה.

$$L = \sqrt{D \cdot \tau}$$

סוגי רקומבינציה (נכון גם עבור גנרציה)

1. **ישירה**

- מתרחשת בעיקר במל"מ בעל פער ישיר, ובה עובר אלקטרון מפס ההולכה לפס הערכיות ומתאחד עם חור.
- גנרציה ישירה יכולה להווצר ע"י הארה או חום.
- רקומבינציה ישירה מלווה בפליטת אנרגיה בצורת פוטונים.

$$U \equiv R_L = \beta p_{0p} \Delta n = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{n_p - n_{0p}}{\tau_n} \ll p \text{-type}$$

$$U \equiv R_L = \beta n_{0n} \Delta p = \frac{\Delta p}{\tau_p} = \frac{p_n - p_{0n}}{\tau_p} \ll n \text{-type}$$

- תחת הנחת הזרקה נמוכה:

$$R = R_h + R_L = \beta p n = \beta p_{0p} (\Delta n + n_{0p})$$

$$R = \underbrace{\beta p_{0p} n_{0p}}_{R_h} + \underbrace{\beta p_{0p} \Delta n}_{R_L}$$

p-type:

$$\frac{dn_p}{dt} = G_m + G_L - (R_h + R_L) = G_L - R_L = G_L - \frac{n_p - n_{0p}}{\tau_n}$$

n-type:

$$\frac{dp_n}{dt} = G_h + G_L - (R_h + R_L) = G_L - R_L = G_L - \frac{p_n - p_{0n}}{\tau_p}$$

2. **בלתי ישירה - SRH Recombination**

- מתרחשת בעיקר במל"מ עם פער לא ישיר, מעבר מטען בין הפסים מלווה בשינוי תנע ומתבצע בשלבים.
- גנרציה בלתי ישירה יכולה להווצר ע"י חימום בלבד.

- ברקומבינציה בלתי ישירה ייפלטו רק פוטונים (הגביש יתחמם).

- בשלב הראשון האלקטרון יורד לרמת אנרגיה זמנית Et (מלכודת) ומשם יורד לפס הערכיות. גם העליה מתבצעת באותו האופן.
- במצב זה יש סיכוי גדול יותר שהתנע של המטען יועבר לפוטונים בירידה מפס ההולכה לערכיות.

$$U \equiv R_L = \frac{C \cdot N_t (pn - n_i^2)}{n + p + 2n_t \cosh((E_t - E_i)/KT)}$$

$$C \equiv \underbrace{\sigma}_{\text{תוך מלכודת}} \cdot \underbrace{v_{th}}_{\text{מהירות תרמית}}$$

Nt - ריכוז המלכודות / מזהמים (פגמים).

C - חתך הפעולה (קוטר רשת העכביש בה נלכדים מטענים).

$$E_T \approx \frac{E_C - E_V}{2}$$

אורך חיים של מטעני מיעוט בבלתי ישירה:

$$p \text{-type: } \tau_n = \frac{1}{C_p \cdot N_T} = \frac{1}{v_{th} \cdot \sigma \cdot N_T} \quad n \text{-type: } \tau_p = \frac{1}{C_p \cdot N_T} = \frac{1}{v_{th} \cdot \sigma \cdot N_T}$$

רקומבינציה פני שטח:

S - מהירות הריקומבינציה.

C - קצב לידה (תלוי בסוג נ"מ, בחומר וב-Et).

$$C \equiv \underbrace{\sigma}_{\text{חתך מלכודת}} \cdot \underbrace{v_{th}}_{\text{מהירות תרמית}} ; S \equiv C \cdot N_T$$

$$U_s = S(p_n(0) - p_{on})$$

3. **תהליך אוגר - AUGER**

- 2 אלקטרונים בפס ההולכה מתנגשים, אחד מאבד אנרגיה ונופל לפס הערכיות והשני מקבל אנרגיה, עולה למעלה ומתחיל לאבד את האנרגיה העודפת בצורה הדרגתית כך שלא נפלט פוטון.
- תהליך זה דומיננטי במל"מ עם זיהום גבוה.

הערות עבור סוגי רקומבינציה / גנרציה:

- כל סוגי גנרציה/ריקומבינציה מתקיימות בכל חומר (מל"מ ישיר או לא ישיר) אך ישנם סוגים / מקרים שבהם תהליך אחד יהיה יותר דומיננטי מהשאר. ז"א, כל התהליכים מתקיימים תמיד אך חלקם זניחים מבחינה סטטיסטית.
- ברקומבינציה ישירה נפלטים בעיקר פוטונים (אור).
- ברקומבינציה עקיפה לא נפלטים פוטונים (אור) אלא נפלטים בעיקר פוטונים.
- רקומבינציה ישירה יכולה להתקיים בכל מקום במל"מ.
- רקומבינציה לא ישירה יכולה להתקיים רק בקירבת מלכודות (זיהומים).
- מל"מ ישיר בעל פגמים (זיהומים) יכול לבצע גנרציה/רקומבינציה לא ישירה (דוגמא:סיליקון מזוהם בזבחה).

משוואות רציפות

הנחה: הריכוזים חייבים להיות רציפים במיקום ובזמן.

מצב עמיד:

אין שינוי ריכוזים כפונקציה של זמן.

$$\frac{dn}{dt} = 0 ; \frac{dp}{dt} = 0$$

משוואות רציפות:

n-type:

$$\frac{dp_n}{dt} = -p_n \mu_p \frac{d\varepsilon}{dx} - \mu_p \varepsilon \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + G_L - \frac{p_n - p_{0n}}{\tau_p}$$

p-type:

$$\frac{dn_p}{dt} = n_p \mu_n \frac{d\varepsilon}{dx} + \mu_n \varepsilon \frac{dn_p}{dx} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + G_L - \frac{n_p - n_{0p}}{\tau_n}$$

משוואות פואסון:

ψ - מתח (פוטנציאל).

ε - שדה חשמלי.

ρ - צפיפות מטען מרחבי.

$$-\frac{d^2 \psi}{dx^2} = \frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\rho_s}{\varepsilon_s} ; \rho_s = q(p - n + N_D^+ - N_A^-)$$

משוואות גאוס:

$$\nabla \varepsilon_s \bar{E} = \rho$$

"בעיית מיקום":

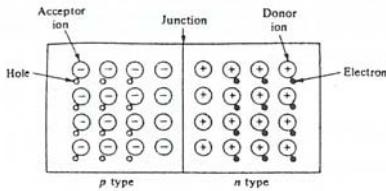
- הארת פני שטח במל"מ, מצב עמיד ללא שדה.
- ההארה יוצרת מטענים עודפים.
- דיפוזיית מטענים מפני השטח אל תוך המל"מ.
- ריקומבינציה בתוך המל"מ של המטענים העודפים.

המשוואה תראה כך:

$$p \text{-type: } D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{p_n - p_{0n}}{\tau_p} = 0 \quad n \text{-type: } D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{n_p - n_{0p}}{\tau_n} = 0$$

צומת PN (= דיודה)

מל"מ שצד אחד שלו מזוהם כסוג P וצד שני מזוהם כסוג N.



הנחת יסוד:

במצב שיווי משקל רמת פרמי רציפה וקבועה במרחב. הוכחה לזה היא בדרך השלילה.

צומת PN חד:

- צומת שהמעבר מ-N ל-P הוא מישור אחד של אטומים. מישור זה נקרא "הצומת המטרולוגי".
- מכיוון שבצד אחד של המל"מ יש יותר ריכוז אלקטרונים ובצד שני יש יותר ריכוז חורים, תנוצר דיפוזיה של חורים מצד אחד לשני ואלקטרונים מצד שני לראשון.
- בעקבות הדיפוזיה נשארים רק יונים (קבועים בשריג) בכל צד ונוצר הפרש פוטנציאלים (שדה) שמטרתם להקטין את זרם הדיפוזיה.
- השדה יקטין את זרם הדיפוזיה כמעט לאפס, וכך לא יעברו כל האלקטרונים / חורים מצד לצד. זו הסיבה שאזור המיחסור חסר מטענים.
- הרכיב הקטן שנותר, של זרם הדיפוזיה, יאוזן ע"י זרם הסחיה.
- **זרם הסחיה:** באופן סטטיסטי, קיימים מעט אלקטרונים בצד P שיכנסו לאיזור המחסור וזו ידחפו לצד N.
- כל הסבר הנ"ל נכון גם עבור החורים באותה צומת.
- במצב שיווי משקל קיימים 4 זרמים תמיד: זרם דיפוזיה של אלקטרונים מ-N ל-P יאוזן ע"י זרם סחיה מ-P ל-N. זרם דיפוזיה של חורים מ-P ל-N יאוזן ע"י זרם סחיה מ-N ל-P.

אזור המיחסור ופוטנציאל מובנה:

- אזור מ-2 צדי הצומת שבו, ע"פ הנחת המחסור אין בכלל מטענים ניידיים.
- זה המקום שבו נשארים היונים ובו נוצר שדה פנימי. ונוצר גם פוטנציאל מובנה V_{bi}.
- בגלל שאין נושאי מטען, המוליכות קטנה מאוד וההתנגדות גדולה מאוד.
- כאשר מניחים שאין מטענים באיזור המחסור - הצומת נקרא אידיאלי.

נוסחאות ככליות ל-V_{bi}:

$$\varepsilon = -\frac{kT}{q} \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx}$$

$$V_{bi} = -\int_{-x_p}^{-x_n} \varepsilon \cdot dx = -\frac{kT}{q} \int_{n(-x_p)}^{n(x_n)} \frac{1}{n(x)} dn = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n(x_n)}{n(-x_p)} \right)$$

$$V_{bi} = \frac{1}{q} \left((E_i - E_F)_{p \text{ side}} + (E_F - E_i)_{n \text{ side}} \right)$$

הנחת קירוב המיחסור:

- גבולות אזור המיחסור הם חדים.
- מחוץ לאזור המיחסור המל"מ נייטרלי חשמלית.
- בתוך אזור המיחסור - מספר היונים בצד P שווה למספר היונים בצד N.
- השדה והפוטנציאל במל"מ רציפים.

הערות: בתוך איזור המחסור:

- ה"כ המטען באזור המיחסור הוא אפס.
- סכום מטעני היונים ב-2 צדי איזור המחסור הוא אפס.

$n = p = 0$

דרכים למדידת מקדם הדיפוזיה:

דרך א':

$$D_p = \frac{KT}{q} \mu_p$$

דרך ב':

- נמדוד את הזמן שלוקח לפולס לעבור מרחק קצר.
- מניחים שלא השתנה הגובה של הפולס.
- Δt - הזמן בין 2 המדידות של הפולס.

$$D_p = \frac{(\Delta t \cdot L)^2}{16 \cdot t_d^3}$$

דרך ג':

נמדוד את האמפליטודה המקסימלית של האות, ואת הזמן שלוקח לפולס להגיע לנקודה. את המדידה הזו נבצע ב-2 נקודות שונות.

$$\tau_p = \frac{t_{d1} - t_{d2}}{\ln \left(\frac{\Delta p_{max1}}{\Delta p_{max2}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{t_{d1}}{t_{d2}} \right)}$$

$$D_p = \frac{L^2}{\tau_p}$$

השתנות המטען בזמן ובמרחב:

$$\Delta p(x,t) = \frac{\Delta p_{(t=0)}}{2\sqrt{\pi D_p t}} \cdot e^{-(x-v_d)^2 / 4D_p t} \cdot e^{-t/\tau_p}$$

רוחב סיגנל:

- 2δ - רוחב הסיגנל בגובה 1/e מגובהו המקסימלי.
- Δt - הזמן בין 2 המדידות של הפולס.

$$\begin{cases} -\delta^2 = -1 \leftarrow \frac{1}{e} \cdot \Delta p_{max} = \Delta p_{max} \cdot e^{-\frac{\delta^2}{4D_p t}} \\ 2\delta = \Delta t \cdot v_d \end{cases}$$

מתוך המשוואות הנ"ל ניתן להגיע ל- D_p לפי דרך ב'.

מל"מ לא הומוגני

- מל"מ המזוהם במטען המשתנה במרחב.
- בעקבות השוני בריכוזים במרחב נוצר שדה חשמלי פנימי.

$$\varepsilon_{in} = \frac{dE_i}{qdx} = \frac{-KT}{qN_{D(x)}} \frac{dN_{D(x)}}{dx}$$

הערה: תוצאת הפעלת שדה חיפוני היא, "עקום" פסי האנרגיה.

הקשר בין אנרגיה, שדה ופוטנציאל

אנרגיה - E

שדה - ε

פוטנציאל $\psi = V$

עבור אלקטרון $E = -qV$

עבור חור $E = qV$

$$\varepsilon = -\frac{dV}{dx}; \quad \varepsilon = \frac{1}{q} \frac{dE}{dx}$$

עבור אלקטרון $\psi = V = \frac{-E}{q}$

פוטנציאל הפרמי עבור אלקטרונים $\phi \equiv -E_F / q$

המתח השקול לטמפרטורה $\phi_T \equiv kT / q$

קווי רמות פרמי

- קווי רמת פרמי E_{Fn} נוצרת מעודף אלקטרונים.
- קווי רמת פרמי E_{Fp} נוצרת מעודף חורים.
- ככל שנכניס יותר עודף אלקטרונים, E_{Fn} תתקרב יותר ל- E_C ותתרחק מ- E_F .
- ככל שנכניס יותר עודף חורים, E_{Fp} תתקרב יותר ל- E_V ותתרחק מ- E_F . למשל, אם Δn זניח אז $E_{Fn} \approx E_F$.
- לרמות אנרגיה אלה אין משמעות מיוחדת. אנו מגדירים אותן לצורך נוחות חישוב בלבד.

$$n = n_i e^{(E_{Fn} - E_i) / kT} = n_i e^{(\psi - \phi_n) / \phi_T}$$

$$p = n_i e^{(E_i - E_{Fp}) / kT} = n_i e^{(\phi_n - \psi) / \phi_T}$$

תנאי שפה ראשון (על פני השטח):

כאשר S נתון אנחנו יכולים להניח את ההנחה הבאה עבור תנאי השפה בקצות המל"מ ($x=0$):

$$J_p(x=0) = D_p \left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=0} = S \cdot \Delta p \Big|_{x=0}$$

$$J_n(x=0) = D_n \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=0} = S \cdot \Delta n \Big|_{x=0}$$

תנאי שפה שני:

עבור מל"מ אינסופי

$$p_n(\infty) = p_{0n} \quad n_p(\infty) = n_{0p}$$

עבור מל"מ סופי (מגע אומי - ראה הגדרה בהמשך)

$$p_n(w) = p_{0n} \quad n_p(w) = n_{0p}$$

פתרון המד"ר הוא מצורת:

עבור מל"מ אינסופי

$$p_{n(x)} = p_{0n} + (p_{n(0)} - p_{0n}) e^{-x/L_p}$$

עבור מל"מ סופי

$$p_{n(x)} = p_{0n} + (p_{n(0)} - p_{0n}) \frac{\sinh\left(\frac{w-x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{w}{L_p}\right)}$$

$$n_{p(x)} = n_{0p} + (n_{p(0)} - n_{0p}) \frac{\sinh\left(\frac{w-x}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{w}{L_n}\right)}$$

"בעייה בזמן"

- הארה אחידה על כל המל"מ (הארת Bulk), מצב עמיד ללא שדה.
- הפסקת הארה ורוצים לדעת השתנות הריכוז בזמן.
- כעת המצב כבר לא עמיד.

$$\frac{dp_n}{dt} = \frac{-(p_n - p_{0n})}{\tau_p}$$

תנאי שפה:

$$\begin{cases} p_n(0) = p_{0n} + \tau_p G_L; & t = 0 \\ p_n(\infty) = p_{0n}; & t = \infty \end{cases}$$

פתרון המד"ר הוא מצורת:

$$p_{n(t)} = p_{0n} + \tau_p G_L e^{-t/\tau_p}$$

הערה:

עבור מל"מ p הכל זהה.

השתנות עוצמת הארה כפונקציה של מרחק:

חוק ביר-למברט:

- 1 - עוצמת הארה
- 10 - עוצמת האור בנק' הפגיעה
- 10 - מקדם הבליעה של החומר.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

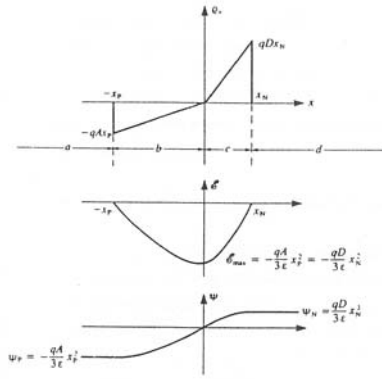
ניסוי היינס שוקלי

- ניסוי שמאפשר מדידת ניידות מטעני המיעוט ואורך חיים של מטעני מיעוט.
- לוקחים מל"מ ומאירים עליו פולס מרוכז של אור (זמן קצר מאוד).
- נקבל גאוסין של ריכוז עודף, שעם הזמן יבצע דיפוזיה לצדדים.
- אם נפעיל שדה כל הגאוסין יסחף לכיוון של השדה.
- שמים סקופ בנקודה על המל"מ, מודדים את המרחק לנקודה ואת הזמן שלוקח לאות להגיע לנקודה (td).
- נמצא את הניידות לפי הנוסחה הבאה:
- td - הזמן שלוקח לפולס להגיע לנקודה.

$$\mu_p = \frac{\text{אורך חיים}}{L} \cdot \frac{\varepsilon \cdot t_d}{\tau_p}$$

צומת PN חד ולינארי

הגדרה: גם הריכוז של N_D וגם הריכוז של N_A תלויים לנארית במיקום לפי ציר x.



צומת לינארי (שינוי לינארי של ריכוז הזיהום):

$$N_D - N_A = \begin{cases} A \cdot x & -x_p < x < 0 \\ D \cdot x & 0 < x < x_n \end{cases}$$

$$A \cdot x_p^2 = D \cdot x_n^2$$

פוטנציאל ושדה:

$$\begin{cases} -\varepsilon = \frac{d\psi_p}{dx} = \frac{-qA}{2\varepsilon_s} (x^2 - x_p^2) & \psi_p = \frac{-qA}{2\varepsilon_s} \left(\frac{x^3}{3} - x_p^2 \cdot x \right) \\ -\varepsilon = \frac{d\psi_n}{dx} = \frac{-qD}{2\varepsilon_s} (x^2 - x_n^2) & \psi_n = \frac{-qD}{2\varepsilon_s} \left(\frac{x^3}{3} - x_n^2 \cdot x \right) \end{cases}$$

השדה המקסימלי יהי ב- $x=0$:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{-qA}{2\varepsilon_s} x_p^2 = \frac{-qD}{2\varepsilon_s} x_n^2$$

הפוטנציאל מחוץ לאזור המיחסור:

$$\psi_p = \frac{-qA}{3\varepsilon_s} x_p^3; \quad \psi_n = \frac{-qD}{3\varepsilon_s} x_n^3$$

גבולות אזור המיחסור (ללא ממתח):

$$x_p = \left[\frac{2\varepsilon_s \sqrt{D}}{qA(\sqrt{D} + \sqrt{A})} V_{bi} \right]^{1/3}; \quad x_n = \left[\frac{2\varepsilon_s \sqrt{A}}{qD(\sqrt{D} + \sqrt{A})} V_{bi} \right]^{1/3}$$

$$w = x_n + x_p$$

צומת חד, סימטרי ולינארי עם זיהום סך בלבד בצד אחד ו- N_A בלבד בצד שני:

$$N_D - N_A = \begin{cases} a \cdot x & -x_p < x < 0 \\ a \cdot x & 0 < x < x_n \end{cases}$$

$$x_n = x_p = w/2$$

$$\varepsilon = \frac{qa}{2\varepsilon_s} \left(x^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2 \right); \quad -\frac{w}{2} \leq x \leq \frac{w}{2}$$

$$V_{(x)} = \frac{qa}{6\varepsilon_s} \left(2\left(\frac{w}{2}\right)^3 + 3\left(\frac{w}{2}\right)^2 \cdot x - x^3 \right); \quad -\frac{w}{2} \leq x \leq \frac{w}{2}$$

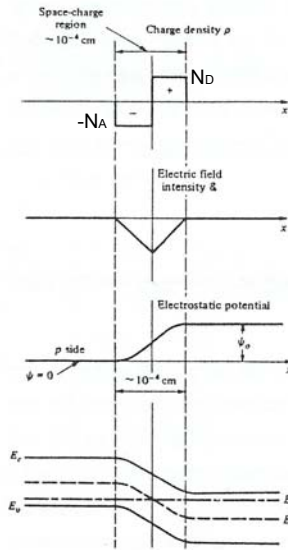
$$V_{bi} = \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{a}{2n_i} \left(\frac{12\varepsilon_s V_{bi}}{qa} \right)^{1/3} \right)$$

$$w = \left[\frac{12\varepsilon_s (V_{bi} - V_A)}{qa} \right]^{1/3}$$

V - הממתח החיצוני שמופעל על הצומת.

צומת PN חד ומדורג, תחת ממתח

הגדרה: צומת מדורג = צומת שבו צד אחד מזוהם ב- N_D בלבד וצד שני מזוהם ב- N_D בלבד.



הערה: מגע במל"מ תמיד יכניס נושאי חוב.

השדה ב- 2 צדי הצומת:

$$\varepsilon_p = \int d\varepsilon = \int \frac{-qN_A}{\varepsilon_s} dx = \frac{-qN_A}{\varepsilon_s} (x_p + x)$$

$$\varepsilon_n = \int d\varepsilon = \int \frac{qN_D}{\varepsilon_s} dx = \frac{qN_D}{\varepsilon_s} (x_n - x)$$

הפוטנציאל המובנה (V_{bi}) והאלקטרוסטטי (ψ):

דרך א' למציאת פוטנציאל מובנה

$$\int_{\psi_p(-x_p)}^{\psi_p(x)} d\psi = \int_{-x_p}^x -\varepsilon dx$$

$$\psi_{p0} = \psi_{(-x_p)} \equiv 0; \quad \psi_{n0} = \psi_{(x_n)} \equiv V_{bi}$$

$$\begin{cases} \psi_{p(x)} = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} (x_p + x)^2 - \psi_{p0} \\ \psi_{n(x)} = \frac{-qN_D}{2\varepsilon_s} (x_n - x)^2 + \psi_{n0} \end{cases}$$

$$\psi_{n(0)} = \psi_{p(0)} \Rightarrow V_{bi} = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} x_p^2 + \frac{qN_D}{2\varepsilon_s} x_n^2$$

דרך ב' למציאת פוטנציאל מובנה

$$V_n = \frac{-1}{q} (E_i - E_F) = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$V_p = \frac{-1}{q} (E_i - E_F) = \frac{-KT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$V_{bi} \equiv |V_n| + |V_p| = \phi_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

כלל ה- 60 mv:

זה כלל אצבע למציאת V_{bi} .

$$V_{bi} = \phi_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = \phi_T \ln \left(\frac{10^5 \cdot 10^5}{10^7} \right)$$

$$V_{bi} \approx 60 \cdot (x + y - z) = [mv]$$

רוחב אזור המחסור: (w)

השטח מתחת לגרף של $N_D - N_A$ בצד N ובצד P שווה (אחרת נקבל שהשדה אינו רציף).

$$N_A x_n = N_D x_p$$

$$w = x_n + x_p = x_p \left(1 + \frac{N_A}{N_D} \right) = \left[\frac{2\varepsilon_s (N_A + N_D)}{q \cdot N_D N_A} V_{bi} \right]^{1/2}$$

$$x_p = \left[\frac{2\varepsilon_s N_D}{q N_A (N_A + N_D)} V_{bi} \right]^{1/2}; \quad x_n = \left[\frac{2\varepsilon_s N_A}{q N_D (N_D + N_A)} V_{bi} \right]^{1/2}$$

משוואת פואסון בצומת PN:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{-q}{\varepsilon_s} (N_D^+ - N_A^- + p - n); \quad \rho = q(N_D^+ - N_A^- + p - n)$$

ψ - פוטנציאל.

ρ - צפיפות מטען מרחבי.

$\varepsilon_s = K_s \cdot \varepsilon_0 = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ - מקדם דיאלקטרי של חומר.

לאחר הנחות המחסור:

$$\rho = \begin{cases} q(N_D - N_A) & -x_p < x < 0 \quad p \text{ side} \\ q(N_D - N_A) & 0 < x < x_n \quad n \text{ side} \\ 0 & x \notin [-x_p, x_n] \quad \text{מחוץ לאזור המחסור} \end{cases}$$

צומת סימטרי:

- צומת שריכוזי הזיהום מ- 2 צדדיו זהים (אותו סדר גודל).
- אזור המיחסור סימטרי ביחס לאפס.

צומת אסימטרי:

- צומת שבצד אחד יש יותר זיהום בהפרש של לפחות **2-3 סדרי גודל** מהצד השני.
- מל"מ שמזוהם יותר ב- ח נקרא n^+ .
- מל"מ המזוהם יותר ב- p נקרא p^+ .
- **מל"מ מסוג זה, אזור המיחסור נמצא ברובו המוחלט בצד המזוהם בזיהום הנמוך יותר.**

הערה: אם לא נאמר אחרת - ניתן להזניח את איזור המיחסור בצד המזוהם בזיהום הנמוך יותר.

ממתח חיובי (ממתח קדמי) V_f :

- ההדק החיובי של המתח נמצא על חלק P של המל"מ.
- ההדק השלילי נמצא על חלק N.
- **ממתח זה "מיישר" את פסי האנרגיה.**
- **רוחב אזור המחסור קטן.**
- יוצר קוויזי רמות פרמי.
- מחסום הפוטנציאל קטן (אך V_{bi} נשאר קבוע).
- נוצרת הזרקה מטעני מיעוט לשני הצדדים.

ממתח שלילי (ממתח אחורי) V_r :

- ההדק החיובי של המתח נמצא על חלק N של המל"מ.
- ההדק השלילי נמצא על חלק P.
- **ממתח זה "מעקם" את פסי האנרגיה.**
- **רוחב אזור המחסור גדל.**
- יוצר קוויזי רמות פרמי.
- מחסום הפוטנציאל גדל (אך V_{bi} נשאר קבוע).
- נוצרת שאיבת מטעני מיעוט משני הצדדים.

שיטות הכנה של צומת PN חד:

- **גידול אפיטקסיאלי**
- **תיאור:** אטומים של מל"מ "מורדים" על מצע מל"מ חד גבישי. באותו זמן מורדים גם אטומי זיהום על המצע בריכוז של בין 1:100 ל- 1:10⁶ (אטומי מל"מ : לאטומי זיהום) ליחידת שטח.
- **תוצאה:** צומת חד.
- **דיפוזיה**
- **תיאור:** אטומי זיהום (מגז) מוחדרים למצע מל"מ הנמצא בטמ' גבוהה (900-1000c ב- Si). הדיפוזיה נגרמת ע"ד הפרש בין ריכוז הזיהום החיצוני על פני השטח והריכוז בעומק המל"מ. עומק החדירה תלוי בטמ', זמן ומקדם הדיפוזיה D.
- **תוצאות:** צומת לא חד וריכוז הזיהום אינו אחיד, בגלל פרופיל הדיפוזיה (גאוסיאני).
- **השתלת יוני**
- **תיאור:** יונים של זיהום מוצאים בשדה גבוה במערכת ואקום. פוגעים במצע המל"מ וחדרים (כמו כדור של רובה) עד עומק מסוים (שנקבע לפי מתח ההאצה ותכונות החומר). נייטרלית חשמלית נשמרת ע"י אספקת אלק' (ליונים חיוביים) וחורים (ליונים שליליים) ממעגל חיצוני למצע.
- **תוצאות:**
- צומת לא חד.
- ריכוז הזיהום אינו אחיד (לא הומוגני), בגלל פרופיל היונים (פרבולה הפוכה - "בוכה" ואח"כ דועך אקספו' לאפס).

פתרון סופי:

$$\Delta p_n = p_{0n} (e^{V/\phi_T} - 1) e^{-x/L_p} ; L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

הזרם על גבול אזור המיחסור:
(וגם בכל אזור המיחסור)

$$I_{p(0)} = -qAD_p \frac{dp_n}{dx} = -qAD_p \frac{p_{0n}}{L_p} (e^{V/\phi_T} - 1)$$

הזרם מחוץ לאזור המיחסור:

$$I_p = I_{p(0)} e^{-x/L_p}$$

עבור צד p:

נגדיר $x=0$ בנקודה x_p .

פתרון סופי:

$$\Delta n_p = n_{0p} (e^{V/\phi_T} - 1) e^{-x/L_n} ; L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

הזרם על גבול אזור המיחסור:
(וגם בכל אזור המיחסור)

$$I_{n(0)} = qAD_n \frac{n_{0p}}{L_n} (e^{V/\phi_T} - 1)$$

הזרם מחוץ לאזור המיחסור:

$$I_n = I_{n(0)} e^{-x/L_n}$$

זרם כלי:

$$I = I_n + I_p$$

אופיין זרם-מתח של דיודה ארוכה אידיאלית:

$$I = I_{n(0)} + I_{p(0)} = I_0 (e^{V/\phi_T} - 1)$$

$$I_0 = qA \left[\frac{D_p p_{0n}}{L_p} + \frac{D_n n_{0p}}{L_n} \right]$$

אופיין מתח-זרם בדיודה אידיאלית קצרה עם מגעים אוהמים אידיאליים

הגדרה:

- W1 - הקצה הימני של צד n.
- W2 - הקצה השמאלי של צד p.

$$w_n \ll L_p$$

$$w_n = |w_1 - x_n| ; w_p = |w_2 - x_p|$$

$$I = qAn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_D w_n} + \frac{D_n}{N_A w_p} \right) (e^{V/\phi_T} - 1)$$

עבור מקרה פרטי של דיודה קצרה p^+n מתקיים:

$$\Delta p = p_{0n} (e^{V/\phi_T} - 1) \left(1 - \frac{x}{w_n} \right)$$

$$I_p = I_{p(0)} = qAD_p \frac{p_{0n}}{w_n} (e^{V/\phi_T} - 1) \quad \text{זרם חורים}$$

בדיודה אסימטרית, רוב הזרם הוא של הצד המזוהם גבוהה, ניתן להזניח את הזרם של הצד המזוהם נמוך.

הערה:

השוני בין דיודה ארוכה לקצרה מתבטא רק בתנאי השפה השונים.

אופיין זרם-מתח של דיודה לא קצרה ולא ארוכה (מגעים אוהמים אידיאליים)

$$w_n = |w_1 - x_n| ; w_p = |w_2 - x_p|$$

$$I_p = \frac{qAD_p p_{0n}}{L_p} \coth \left(\frac{w_n}{L_p} \right) (e^{V/\phi_T} - 1)$$

$$I_n = \frac{qAD_n n_{0p}}{L_n} \coth \left(\frac{w_p}{L_n} \right) (e^{V/\phi_T} - 1)$$

$$I = I_n + I_p$$

$$I = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} \coth \left(\frac{w_p}{L_n} \right) + \frac{D_p}{L_p N_A} \coth \left(\frac{w_n}{L_p} \right) \right) (e^{V/\phi_T} - 1)$$

דיפוזיה וריקומבינציה תחת מתח: (לא באזור מיחסור)

- ההזרקה יוצרת הפרש ריכוזים, הריכוז על שפת אזור המחסור גדול בהרבה מהריכוז בש"מ (מחוץ לאזור המחסור).
- בעקבות זאת נוצר זרם דיפוזיה של מטעני מיעוט מאזור המיחסור לתוך המ"מ.
- הזרם הנוצר מקסימלי על הגבול של אזור המיחסור.
- מטעני המיעוט מבצעים ריקומבינציה עם מטען הרוב תו"כ תנועת הדיפוזיה.
- מכיוון שהניטרליות החשמלית של החומר חייבת להשמר, מטעני רוב חדשים מובאים מהמעגל החיצוני.
- תופעה זו יוצרת זרם סחיה.
- לסיכום בכל צד בדיודה יש זרם המורכב מ-2 רכיבים:
 1. דיפוזיה של מטעני מיעוט.
 2. זרם סחיה של מטעני רוב.

הערות:

- היחס בין 2 חלקי הזרם משתנה לפי המיקום אך הסכום שלהם תמיד קבוע.
- על גבול אזור המיחסור אין זרם סחיה מכיוון שהשדה הוא אפס. הזרם בנקודה זו מורכב רק מזרם דיפוזיה של מטעני מיעוט.
- הזרם הכללי הוא חיבור של 2 זרמי הדיפוזיה (חורים ואלקטרונים) בנקודות הקצה של אזור המיחסור.
- **הנחה:** אין העלמות מטענים עודפים באזור המיחסור, מכיוון שאין שם מטענים.

אופיין מתח-זרם בדיודה אידיאלית ארוכה הגדרת דיודה ארוכה:

$$w_n \gg L_p$$

הנחות:

- קירוב המיחסור.
- הזרקה נמוכה באזורים הניטרליים מחוץ למיחסור.
- אין מטענים באזור המחסור (צומת אידיאלי) ולכן אין שם R או G.
- מצב עמיד.
- באינסוף הדיפוזיה לא משפיעה על הריכוזים.

הערות:

- הזרם לכל אורך הדיודה קבוע.
- לכן נחשב את הזרם כחיבור של זרם דיפוזיית חורים ב p^+n - זרם דיפוזיית אלקטרונים ב n^+p .
- בצומת שצד p מזוהם יותר (p^+n), זרם החורים יהיה גדול יותר בהרבה מזרם האלקטרונים.

המשוואות שקולות לגמרי לבעיית הארת פני שטח + מצב עמיד (בעייה במיקום).

זרם רוויה = זרם זליגה I_0 :

זרם הזורם בדיודה במתח אחורי כאשר איבר האקספוננט מתבטל לעומת 1.

$$I_0 = qA \left[\frac{D_p p_{0n}}{L_p} + \frac{D_n n_{0p}}{L_n} \right]$$

פיתוח האופיין וזרם הזליגה:

עבור צד n:

נגדיר $x=0$ בנקודה x_n .

משוואת הרציפות:

$$D_p \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = 0$$

פתרון כללי למשוואת הרציפות ותנאי השפה:

$$\Delta p_n = p_n - p_{0n} = K_1 e^{\left(\frac{-x}{\sqrt{D_p \tau_p}} \right)} + K_2 e^{\left(\frac{x}{\sqrt{D_p \tau_p}} \right)}$$

$$\begin{cases} p_{n(0)} = p_{0n} e^{V/\phi_T} ; x=0 \\ p_{n(\infty)} = p_{0n} ; x=\infty \end{cases}$$

צומת חד P^+N מדורג תחת מתח חיצוני

צומת P^+N חד במתח אחורי V_r :

- מתח אחורי גורם ל"שאיבת" נושאי מיעוט, הקטנתם ע"י החזרתם לצד המתאים בצומת.
- ריכוז נושאי המיעוט קטן יותר מאשר במצב שיווי משקל.

$$w_r \approx x_n = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{qN_D} \right]^{1/2}$$

שדה מקסימלי ($x=0$):

$$\epsilon_{max} = \frac{-qN_D w_R}{\epsilon_s}$$

שדה במרחב:

$$\epsilon_x = \epsilon_{max} \left(1 - \frac{x}{x_n} \right)$$

$$\psi = V_{bi} \left(1 - \left(1 - \frac{x}{x_n} \right)^2 \right)$$

$$V_{bi} \approx \frac{qN_D x_n^2}{2\epsilon_s}$$

צומת P^+N חד במתח קדמי V_f :

- מתח קדמי גורם להזרקה נושאי מיעוט.
- מחסום הפוטנציאל בצומת יורד ומאפשר כניסה של יותר נושאי מיעוט מצד אחד לשני.
- ריכוז נושאי המיעוט גדל עם מתח קדמי ביחס למצב שיווי משקל.

$$w \approx x_n = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V_f)}{qN_D} \right]^{1/2}$$

משוואות אופיין (מתח - זרם) לצומת PN

נמצא את ריכוז המיעוט כפונקציה של מיקום. הבעייה שקולה לבעייה במיקום תחת הארה.

קשר בולצמן - ריכוז מבטא מתח: עבור צומת כללית בשיווי משקל:

$$V_{bi} = \phi_T \ln \left(\frac{p_{0p} n_{0n}}{n_i^2} \right) = \phi_T \ln \left(\frac{n_{0n}}{n_{0p}} \right)$$

$$n_{0n} = n_{0p} e^{\frac{V_{bi}}{\phi_T}} ; p_{0p} = p_{0n} e^{\frac{V_{bi}}{\phi_T}}$$

חוק הצומת:

עבור צומת כללית תחת מתח - לא בש"מ:
(נכון עבור גבולות אזור המחסור בלבד):

$$n_n = n_p e^{\frac{V_n - V}{\phi_T}} ; p_p = p_n e^{\frac{V_n - V}{\phi_T}}$$

בהזרקה נמוכה מתקיים הקשר:

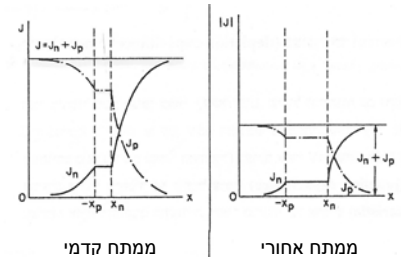
$$n_n \approx n_{0n} = n_{0p} e^{V_n/\phi_T} = n_p e^{(V_n - V)/\phi_T}$$

לכן מתקיימים הקשרים הבאים:

$$n_p = n_{0p} e^{V/\phi_T} ; p_n = p_{0n} e^{V/\phi_T}$$

הערות:

- אין שדה על גבול איזור המחסור.
- יש זרם דיפוזיה ויש זרם סחיה.
- הזרם באיזור המחסור קבוע כי אין ריקומבינציה.



מנגנוני פריצה

מפולת:

תאור המנגנון:

- נושא מטען חודר לאזור המחסור.
- הוא מקבל אנרגיה מהשדה החשמלי.
- ברגע שיש לו בערך פי 3 אנרגיה מהפער האסור ובנוסף הוא מתנגש עם אטומי השריג ומיינן אלקטרון. הוא נותן את האנרגיה שלו לאלקטרון וגם האלקטרון הזה מתנגש בשריג וגם הוא מיינן אלקטרון נוסף.
- כך הלאה עד אשר נגמרת האנרגיה.
- צריך שדה מינימלי כדי שכל זה יוכל לקרות.

מתח פריצה עבור צומת חד זיהום אחיד :

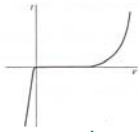
$$(pn) \Rightarrow V_{BR} = V_{bi} - \frac{\epsilon_s(N_A + N_D)}{2qN_A N_D} E_{MAX}^2$$

$$(p^+n) \Rightarrow V_{BR} = V_{bi} - \frac{\epsilon_s}{2qN_D} E_{MAX}^2$$

$$(n^+p) \Rightarrow V_{BR} = V_{bi} - \frac{\epsilon_s}{2qN_A} E_{MAX}^2$$

הערות:

- ככל שהטמ"פ תעלה, יגדל גם מתח הפריצה.
- הגדלת הזיהום מגדילה את מתח הפריצה.



דיודת זנר - מינהור (במתח אחורי):

- כאשר הצומת מאוד מאוד צרה ויש זיהום מאוד גדול מ 2 הצדדים של הצומת, אז יש סיכוי גדול יחסית לביצוע מינהור.
- תופעה זו תקרה במתח אחורי קטן יחסית.
- בגלל הממתח האחורי פסי האנרגיה יתקמו.
- פסי האנרגיה יגיעו לחפיפה שתאפשר מעבר נושאי מטען מצד לצד.

הערות:

- תהליך זה יכול להתקיים רק אם רוחב אזור המחסור קטן מ 100 אנגסטרם.
- מתח הפריצה של זנר קטן יחסית למנגנון המפולת.
- ככל שהטמ"פ עולה, מתח הפריצה יורד.

בקיעה:

מצב בו אזור המחסור כולל את כל צד n או את כל צד p.

- לדוגמה דיודת חסר-n זה יקרה כאשר אזור המחסור מכיל את כל צד n של הדיודה.
- מצב כזה הוא כמו קצר.
- כל אלקטרון שנכנס לאזור המחסור יוצא למעגל החיצוני מייד.

צומת מעורב - הטרוצומת

- צומת המורכב משני חומרים בעלי Eg שונה אך אותו מבנה שריג / פרמטר שריג.
- בצומת נוצר בור פוטנציאלי שבתוכו יש רמות אנרגיה בדידות (מקוונטות).
- הבור לא מאפשר ליונים להשפיע על המטענים בתוך הבור. לכן המוליכות בתוך הבור מאוד גבוהה.

מתח מובנה בהטרוצומת:

$$V_{bi} = E_{in} - E_{ip} + kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_{in} \cdot n_{ip}} \right)$$

רוחב איזור המחסור בצד N בצומת מעורב:

$$x_N = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s \cdot N \cdot \epsilon_{s,p} \cdot N_D}{q \cdot N_D \cdot (\epsilon_{s,N} \cdot N_D + \epsilon_{s,p} \cdot N_A)}} (V_{bi} - V)$$

רוחב איזור המחסור בצד P בצומת מעורב:

$$x_p = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s \cdot N \cdot \epsilon_{s,p} \cdot N_D}{q \cdot N_A \cdot (\epsilon_{s,N} \cdot N_D + \epsilon_{s,p} \cdot N_A)}} \left(\frac{1}{V_{bi} - V} \right)$$

קיבול מחסור בהטרוצומת:

$$C_j = A \sqrt{\frac{q \cdot \epsilon_s \cdot N \cdot N_D \cdot \epsilon_{s,p} \cdot N_A}{2 \cdot (\epsilon_{s,N} \cdot N_D + \epsilon_{s,p} \cdot N_A)}} \left(\frac{1}{V_{bi} - V} \right)$$

קיבול מיחסור בצומת חד וא-סימטרי (pn):

בתוך אזור המחסור נצברים מטענים, אם משנים את רוחב אזור המחסור כמות המטענים משתנה שינוי זה הוא קיבול המיחסור.

$$C_j = \frac{dQ}{dV} = A \left(\frac{q \epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_R)} \right)^{1/2} = \frac{A \epsilon_s}{w_R}$$

$$Q = q A N_D w = A (2 q \epsilon_s N_D (V_{bi} + V_R))^{1/2}$$

$$c_j = \frac{C_j}{A}$$

הערות:

- קיבול המחסור (צומת) קיים תמיד, בלי קשר למתח.
- בדיודת חסר יש גם קיבול דיפוזיה אחד בצד n וקיבול דיפוזיה אחר בצד p.
- בדיודת חסר יש קיבול דיפוזיה רק בצד n.
- בדיודת חסר יש קיבול דיפוזיה רק בצד p.

מיתוג בדיודות

- מיתוג = מעבר ממצב רוויה (On) לקטעון (Off) או הפך.
- דיודה יכולה לשמש לצורכי מיתוג.
- מתח קידמי הוא ON ומתח אחורי הוא OFF.
- כאשר עוברים ממתח קידמי לאחורי, יש שאיבה של מטעני מיעוט.
- לוקח זמן עד אשר כל המטענים נעלמים.
- כאשר עוברים ממתח אחורי לקידמי, יש הזרקה של מטעני מיעוט, לוקח זמן עד שנצברים המטענים ומגיעים לריכוז שהם אמורים להיות בו.
- עובדה זו מגבילה את תדירות המיתוג בדיודה.
- אם נמתג לפני שהתהליכים הסתיימו, לא נקבל אף תגובה.
- **אם משתמשים במגע אוהמי - אז נושאי רוב לא משפיעים על מהירות המיתוג מפני שהמגע האוהמי יספק רק אותם וללא קושי.**

זמן תגובה:

τ - הוא זמן התגובה של הדיודה.

$$\tau = RC = \frac{1}{g_d} (C_j + C_d)$$

- אם תדר השינוי גדול מ $1/\tau$ אז המטענים לא מספיקים להגיב.
- כדי שסילוק המטענים העודפים יהיה מהיר יותר, ניתן לזהם את את המל"מ (Nt) ובכך להקטין את זמן החיים של המטענים.
- זמן החיים של אלקטרון:

$$\hat{\tau} = \frac{1}{C \cdot N_T}$$

התנגדות דינמית

נשתמש בהתנגדות דינמית כאשר נרצה להציג את ההתנגדות של הדיודה כנגד.

מוליכות דינמית:

$$g_d = \frac{dI}{dV} = \frac{I_s}{\phi_T} e^{V/\phi_T} \approx \frac{I_{DC}}{\phi_T}$$

אדמיטנס:

$$Y = g_d + j\omega(C_j + C_d)$$

$$\text{Re}\{Y\} = g_d$$

$$\text{Im}\{Y\} = C_j + C_d$$

התנגדות דינמית (התנגדות בנק' העבודה):

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{\phi_T}{I_{DC}}$$

$$r_d|_{I=300} = \frac{1}{40 I_{DC}}$$

דיודה ארוכה - לא אידיאלית

- בדיודה אידיאלית התעלמנו מהרקומבינציה באזור המחסור. בדיודה לא אידיאלית יש ריקומבינציה באזור המחסור כי אנו לא מזניחים את המטענים שנמצאים שם.
- בדיודה לא אידיאלית כל מטען ש"נעלם" בריקומבינציה מוחלף במטען חדש שמגיע מהמעגל החיצוני, זאת ע"מ לשמור על נייטרליות חשמלית.
- **תנועת המטענים החדשים במעגל החיצוני מוגדרת כזרם ריקומבינציה.**

$$I_{rec} - \text{זרם הריקומבינציה.}$$

$$I_{rec} = I_R \cdot e^{V/2\phi_T}$$

$$I_R = \frac{q A n_i w}{2 \tau_0}$$

במתח קידמי:

$$I_F = I_0 (e^{V/\phi_T} - 1) + I_{rec}$$

פקטור אידיאליות:

η - פקטור אידיאליות ($2 > \eta > 1$)

- פרמטר זה מביע את רמת האידיאליות של הדיודה.
- כאשר η שווה 1 הדיודה אידיאלית.
- ככל ש- η יותר גדול הדיודה פחות אידיאלית.

ניתן להביע את הזרם כפונקציה של η :

$$I_F = I_0 (e^{V/\eta\phi_T} - 1); \quad 2 > \eta > 1$$

במתח אחורי:

$$I_G = \frac{q n_i A w}{\tau_G}$$

בזרמים קדמיים גבוהים:

$$I = I_0 e^{\left(\frac{q(V-IR)}{k_B T} \right)}$$

השפעת הטמ"פ על זרם הזליגה:

$$I = qA \left(\frac{D_p P_{0n}}{L_p} + \frac{D_n n_{0p}}{L_n} \right) \sim n_i^2 \sim e^{-E_g/k_B T}$$

מטען מיעוט עבור וקיבול דיפוזיה בדיודה

ארוכה חסר n+

מטען מיעוט עבור:
אלה הם נושאי המיעוט שנצברו עקב הדיפוזיה ונשארו במל"מ באיזורים הניטרליים.

נוסחה כללית (לא לדיודה ארוכה):

$$Q_n = q A p_{0n} L_p (e^{V/\phi_T} - 1)$$

מטען החורים בצד n:

$$Q_p = \tau_p I_{p(0)}$$

מטען האלקטרונים בצד p:

$$Q_n = \tau_n I_{n(0)}$$

קיבול הדיפוזיה:

$$C_d = \frac{dQ_p}{dV} = \frac{I_{DC}}{\phi_T} \tau_p k = \frac{k \cdot q p_{0n} A L_p}{\phi_T} \cdot e^{V/\phi_T}$$

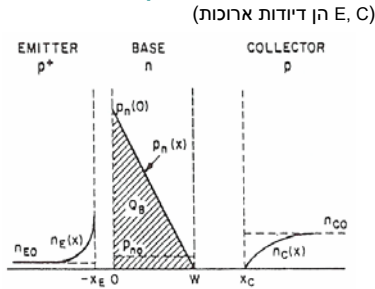
$$\begin{cases} I_{DC} = I_s (e^{V/\phi_T} - 1) \approx I_s \cdot e^{V/\phi_T} \\ I_s = \frac{q p_{0n} A D_p}{L_p} \end{cases}$$

- עבור דיודה קצרה נציב $k=2/3$.
- עבור דיודה ארוכה נציב $k=1/2$.

הערה:

קיבול הדיפוזיה קיים תחת מתח קדמי.

PNP - BJT במוד פעיל קדמי:



זרמים בטריזיסטור PNP במוד פעיל קדמי בלבד:

$$I_{En} = +q \cdot A \cdot D_E \cdot \left. \frac{d\Delta n_E}{dx} \right|_{x=-x_E}$$

$$I_{Ep} = -q \cdot A \cdot D_B \cdot \left. \frac{d\Delta p_B}{dx} \right|_{x=0}$$

$$I_{Cp} = -q \cdot A \cdot D_B \cdot \left. \frac{d\Delta p_B}{dx} \right|_{x=w}$$

$$I_{Cn} = +q \cdot A \cdot D_C \cdot \left. \frac{d\Delta n_C}{dx} \right|_{x=x_C}$$

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}; I_C = I_{Cp} + I_{Cn}; I_E = I_B + I_C$$

הערה:

את הזרמים מחשבים בנקודות על גבול איזור המחזור מפני שע"פ אחת המנחות המחזור - אין גרביצה ורקומבינציה בתוך איזור המחזור ולכן הזרם שם קבוע.

עבור ה- Emitter:

$$\frac{d^2 \Delta n_E}{dx^2} - \frac{\Delta n_E}{L_E^2} = 0$$

BC:

$$\Delta n_E(-x_E) = n_{E0} (e^{\frac{V_{EB}}{\phi_T}} - 1)$$

$$\Delta n_E(\infty) = 0$$

$$\Delta n_{E(x)} = n_{E0} (e^{\frac{V_{EB}}{\phi_T}} - 1) e^{-(x+x_E)/L_E}$$

$$I_{En} = q \cdot A \cdot \frac{D_E}{L_E} n_{E0} \left(e^{\frac{V_{EB}}{\phi_T}} - 1 \right)$$

עבור ה- Collector:

$$\frac{d^2 \Delta n_C}{dx^2} - \frac{\Delta n_C}{L_C^2} = 0$$

BC:

$$\Delta n_C(x_C) = n_{C0} (e^{\frac{V_{CB}}{\phi_T}} - 1)$$

$$\Delta n_C(\infty) = 0$$

$$\Delta n_{C(x)} = n_{C0} (e^{\frac{V_{CB}}{\phi_T}} - 1) e^{-(x-x_C)/L_C}$$

$$I_{Cn} = q \cdot A \cdot \frac{D_C}{L_C} n_{C0} \left(e^{\frac{V_{CB}}{\phi_T}} - 1 \right)$$

הערה (בהירות...):
אם עבור הביטוי:

$$\frac{V}{e^{\phi_T}}$$

מתקיים ש- $V < 0$ אז ניתן לומר שכל הביטוי זניח ושווה ל-0.

יעילות (γ) ה- Emitter:

$$PNP \Rightarrow \gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E} = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}} \approx \frac{1}{1 + \frac{D_E n_B w_B}{D_B n_E L_E}}$$

$$NPN \Rightarrow \gamma = \frac{I_{En}}{I_E} = \frac{I_{En}}{I_{Ep} + I_{En}} \approx \frac{1}{1 + \frac{D_E p_0 w_B}{D_B n_0 L_E}}$$

$$0 \leq \gamma \leq 1$$

יעילות ה- Base (α_T):

$$PNP \Rightarrow \alpha_T \equiv \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} \approx 1 - \frac{w^2}{2L_{pB}^2}; 0 \leq \alpha_T \leq 1$$

$$NPN \Rightarrow \alpha_T \equiv \frac{I_{Cn}}{I_{En}} \approx 1 - \frac{w^2}{2L_{nB}^2}; 0 \leq \alpha_T \leq 1$$

הערה: אם הבסיס יהיה צר, אז לא יעלמו מטענים ברקומבינציה תוך כדי המעבר בבסיס, ואז הזרם לא יקטן.

יעילות הגבר (α_{DC}):

$$PNP \Rightarrow \alpha_{DC} \equiv \alpha_F \equiv \gamma \cdot \alpha_T = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} = \frac{I_{Cp}}{I_E}; 0 \leq \alpha_{DC} \leq 1$$

$$NPN \Rightarrow \alpha_{DC} \equiv \alpha_R \equiv \gamma \cdot \alpha_T = \frac{\beta_R}{1 + \beta_R} = \frac{I_{Cn}}{I_E}; 0 \leq \alpha_{DC} \leq 1$$

הגבר הטריזיסטור (β):

הגבר הטריזיסטור = זרם יציאה חלקי זרם כניסה.

$$PNP \Rightarrow \beta \equiv \beta_{DC} \equiv \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{\alpha_{DC}}{1 - \alpha_{DC}}; \beta \geq 0$$

הערה:

הגבר זה נכון רק בתחום הפעיל ובכניסה לרוויה. ברזייה עמוקה, זה לא נכון. לכן אם לא מתקיים הקשר הזה אז זה מצב רוויה עמוקה

הגבר CB

זהו הגבר מתח (כי במקרה הטוב ביותר היחס בין הזרמים יהיה 1).

$$\alpha_T \equiv \frac{I_C}{I_E} (\equiv \beta)$$

הגבר CE

זהו הגבר זרם.

$$\beta \equiv \frac{I_C}{I_B}$$

$$(n_{0B} p_{0B} = n_{0B} N_B = n_B^2 \Rightarrow n_{0B} = n_B^2 / N_B)$$

$$NPN \Rightarrow \beta \equiv \frac{D_B n_{0B} L_E}{D_E p_{0E} w_B} = \frac{D_B n_B L_E}{D_E N_B w_B}$$

$$PNP \Rightarrow \beta \equiv \frac{D_B p_{0B} L_E}{D_E n_{0E} w_B} = \frac{D_B p_B L_E}{D_E N_B w_B}$$

הגבר CC

זהו הגבר זרם.

$$\beta \equiv \frac{I_E}{I_B}$$

$$I_{CB0} \equiv I_{Cp0} + I_{Cn0}$$

$$I_C = \alpha_{DC} \cdot I_E + I_{CB0}$$

$$I_{CE0} \equiv \frac{I_{CB}}{1 - \alpha_{DC}}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B + \frac{I_{CB}}{1 - \alpha_{DC}} = \beta \cdot I_B + I_{CE0}$$

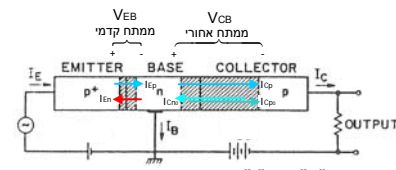
הערות:

- בד"כ ה- Emitter יזוהם בריכוז כמעט מנוון.
- בד"כ ה- Base יזוהם ב- 2 סדרי גודל פחות מה- Emitter וה- Collector יזוהם ב- 2 סדרי גודל פחות מה- Base.

- הפרש זיהומים משפיע רק על הזרקה עקב דיפוזיה ועל מיקומו של רוב איזור המחזור.

טרנזיסטור BJT

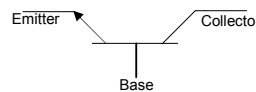
(המחשה של BJT מסוג PNP במוד פעיל קדמי)



הערה: ה- "+" וה- "-" מבטאים הפרשי מתחים. כללי:

- טריזיסטור 2 ידיות צמודות עם בסיס ביניהם.
- "טכנולוגיה פלנירית": כל הטריזיסטור בנוי על השכבה העליונה (צד אחד) של פרוסת סיליקון.
- בטריזיסטור PNP נקבל זרם חוריים.
- בטריזיסטור NPN נקבל זרם אלקטרוניים.
- עבור PNP נסמן VCB ו VEB.
- עבור NPN נסמן VBC ו VBE.
- החלפת סדר האינדקסים ב- V גורמת לשינוי סימן לדוגמא: VCB = -VBC.
- עבור PNP נסמן VCB ו VEB.
- אם צומת CB בממתח קדמי אז VCB יהיה חיובי.
- אם צומת CB בממתח אחורי אז VCB יהיה שלילי.
- כנ"ל לגבי צומת EB ו VEB.
- עבור PNP נסמן VCB ו VEB.
- אם צומת CB בממתח קדמי אז VCB יהיה חיובי.
- אם צומת CB בממתח אחורי אז VCB יהיה שלילי.
- כנ"ל לגבי צומת EB ו VEB.

סימון טריזיסטור:



הגדרות:

- EB - איזור המחזור בין ה- Emitter ל- Base.
- CB - איזור המחזור בין ה- Base ל- Collector.

רוחב בסיס אפקטיבי:

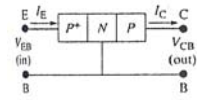
הרוחב מסוף איזור המחזור EB עד תחילת איזור המחזור CB.

Active Mode - "מוד פעיל":

נחבר את הטריזיסטור למקור מתח כך שנקבל ממתח קדמי על EB וממתח אחורי על CB.

סוגי טריזיסטורים:

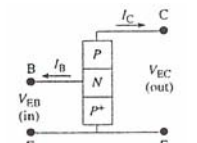
CB - Common Base



(a) Common base

- הזרם נכנס דרך ה- Emitter ויוצא מה- Collector.

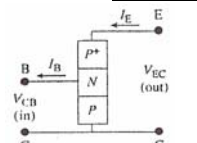
CE - Common Emitter



(b) Common emitter

- הזרם נכנס דרך ה- Base ויוצא מה- Collector.

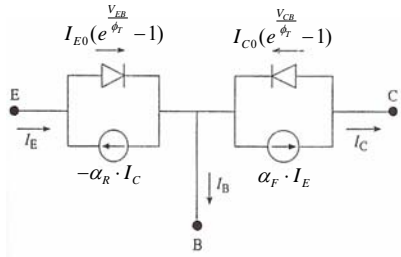
CC - Common Collector



(c) Common collector

- הזרם נכנס דרך ה- Base ויוצא מה- Emitter.

מודל Gummel Poon:



$$I_E = \alpha_R \cdot I_C + I_{E0} \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right); I_C = \alpha_F \cdot I_E - I_{C0} \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right)$$

$$I_B = I_E - I_C$$

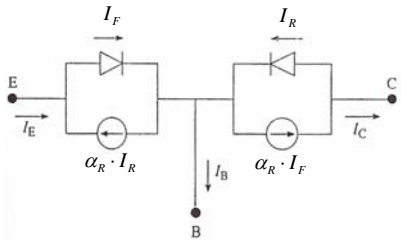
- מודל זה מוצא זרמים ומתחים וסופרפוזיציה.
- הוא מחשב עבור כל צומת לחוד את כל הפרמטרים, ובסוף מחבר את הפתרונות.
- נפתור פעם עבור קולקטור מנותק ופעם אמטר מנותק.
- מודל זה נכון לכל מצב (קדמי, אחורי, רוויה וקטעון).

צורה מטריציאלית עבור NPN:

$$\begin{bmatrix} I_E \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_S(1+1/\beta_F) & I_S \\ I_S & -I_S(1+1/\beta_R) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{V_{BE}/\phi} - 1 \\ e^{V_{BC}/\phi} - 1 \end{bmatrix}$$

$$I_S = \frac{qADn_i^2}{\int_0^x N_{AB(x)} dx} = \frac{qADn_i^2}{N_B x_B} = \frac{qADn_{0B}}{x_B}; \beta_R = \frac{D_B n_{0B} L_C}{D_C p_{C0} x_B}$$

מודל Ebers Moll:



$$I_F = I_{ES} \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right); I_R = I_{CS} \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right)$$

$$I_E = I_F - \alpha_R \cdot I_R$$

$$I_C = \alpha_F \cdot I_F - I_R$$

$$I_B = (1 - \alpha_F) \cdot I_F + (1 - \alpha_R) \cdot I_R$$

- מודל זה מוצא זרמים ומתחים וסופרפוזיציה.
- הוא מחשב עבור כל צומת לחוד את כל הפרמטרים, ובסוף מחבר את הפתרונות.
- נפתור פעם עבור קולקטור מקוצר ופעם אמטר מקוצר.
- מודל זה נכון לכל מצב (קדמי, אחורי, רוויה וקטעון).

צורה מטריציאלית:

NPN:

$$\begin{bmatrix} I_E \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{E0} & \alpha_R \cdot I_{C0} \\ 1 - \alpha_F \alpha_R & 1 - \alpha_F \alpha_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{V_{BE}/\phi} - 1 \\ e^{V_{BC}/\phi} - 1 \end{bmatrix}$$

PNP:

$$\begin{bmatrix} I_E \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{E0} & -\alpha_R \cdot I_{C0} \\ 1 - \alpha_F \alpha_R & 1 - \alpha_F \alpha_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{V_{BE}/\phi} - 1 \\ e^{V_{BC}/\phi} - 1 \end{bmatrix}$$

זרמי רוויה אחוריים / זליגה:

$$I_{CS} = qA \left(\frac{D_E}{L_E} n_{E0} + \frac{D_B}{L_B} p_{B0} \right); I_{ES} = qA \left(\frac{D_C}{L_C} n_{C0} + \frac{D_B}{L_B} p_{B0} \right)$$

עבור Base - רגיל - PNP:

$$\Delta p_{B(x)} = p_{B0} \left(\frac{e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{w_B - x}{L_B}\right)}{\sinh\left(\frac{w_B}{L_B}\right)} + p_{B0} \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{x}{L_B}\right)}{\sinh\left(\frac{w_B}{L_B}\right)}$$

$$I_{Ep} = q \cdot A \cdot \frac{D_B}{L_B} p_{B0} \coth\left(\frac{w_B}{L_B}\right) \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right) - q \cdot A \cdot \frac{D_B}{L_B} p_{B0} \frac{1}{\sinh\left(\frac{w_B}{L_B}\right)} \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right)$$

$$I_{Cp} = -q \cdot A \cdot \frac{D_B}{L_B} p_{B0} \coth\left(\frac{w_B}{L_B}\right) \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right) + q \cdot A \cdot \frac{D_B}{L_B} p_{B0} \frac{1}{\sinh\left(\frac{w_B}{L_B}\right)} \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right)$$

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}; I_C = I_{Cp} + I_{Cn}; I_E = I_B + I_C$$

עבור Base - צר - PNP:

$$p_{B(x)} = p_{0B} e^{V_{EB}/\phi} \left(1 - \frac{x}{w_B} \right)$$

$$I_E = q \cdot A \cdot \left(\frac{D_E \cdot n_{E0}}{L_E} + \frac{D_B \cdot p_{B0}}{w_B} \right) \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right) - q \cdot A \cdot \frac{D_B \cdot p_{B0}}{w_B} \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right)$$

$$I_C = q \cdot A \cdot \frac{D_B \cdot p_{B0}}{w_B} \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right) - q \cdot A \cdot \left(\frac{D_C \cdot n_{C0}}{L_C} + \frac{D_B \cdot p_{B0}}{w_B} \right) \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right)$$

$$I_B = q \cdot A \cdot \frac{D_E}{L_E} n_{E0} \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right) + q \cdot A \cdot \frac{D_C}{L_C} n_{C0} \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right)$$

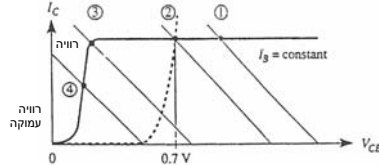
$$\begin{cases} I_E = a_{11} \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right) - a_{12} \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right) \\ I_C = a_{21} \left(e^{V_{EB}/\phi} - 1 \right) - a_{22} \left(e^{V_{CB}/\phi} - 1 \right) \end{cases}$$

$$a_{11} = qA \frac{D_E n_{E0}}{L_E} + a_{12}$$

$$a_{12} = a_{21} = qA \frac{D_B p_{B0}}{w_B}$$

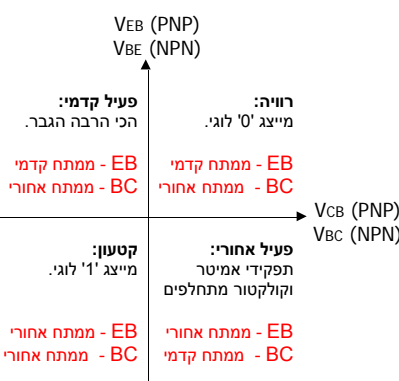
$$a_{22} = qA \frac{D_C n_{C0}}{L_C} + a_{21}$$

אופייני מתח-זרם של BJT:

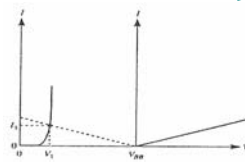


רוויה:
טרנזיסטור יכנס לתחום הרוויה כאשר:
 $V_{CB} = 0 \Rightarrow V_{CC} = V_{BB}$

קטעון:
טרנזיסטור יכנס לתחום הקטעון במקרים הבאים:
- הפעלת ממתחיים שווים או 0 על 2 הצמתים.
 $V_{CB} = V_{BE} \Rightarrow I_B = 0 \Rightarrow I_C = 0$
- הפעלת ממתחים שליליים על 2 הצמתים.



נקודת העבודה:



נקודה זו קובעת את תכונות ההתקן. את הנקודה נמצא ע"י חיתוך גרף האופייני זרם-מתח של הBJT עם גרף האופייני ההפוך של הגגד (מתחיל מ-Vbb).

ניתן לשנותה ע"י:

- שינוי Vcc והשארת נגד קבוע.
- השארת Vcc קבוע ושינוי ערך הנגד.

הערות:

- כאשר מדובר ב- Emitter, Collector קצרים, אז יש להחליף במשוואות הנ"ל את אורכי הדיפוזיה (L_E, L_C) א.מסומן של ה- Collector וה- Emitter (W_E, W_C).

- Db - מקדם דיפוזיה של חורים (כי מדובר ב-PNP).

מעבר בין PNP ל-NPN:

כל הנוסחאות הנ"ל נכונות גם עבור NPN אם מבצעים את החלפות הבאות:
- נחליף את האינדקסים של המתחים בין Vcb ו- Vcb
- Vbe ל- Vbc ו- Vbc ל- Vbe
- נחליף בין n ו- p (ונשמור על האינדקסים).
- q הפוך ל- q.

הערה:

מהנוסחאות מקבלים את הכיוון האמיתי של תנועת האלקטרונים / חורים.
כאשר מדובר באלקטרוניים יש לזכור שמסמנים את כיוון הזרם (ע"פ מוסכמה) הפוך מכיוון תנועתם האמיתית.

BJT - מבוקר זרם:

BJT הוא טרנזיסטור מבוקר זרם. הזרם היוצא מבוקר ע"י זרם הכניסה. שינוי בזרם הכניסה יגרוור שינוי בזרם היציאה.

הסבר:

- כתוצאה מהפרש פוטנציאלים חיצוני על BJT הוא מתחמם.
- Vbi והתנגדות ה-BJT משתנים.
- כתוצאה מכך הזרם לא יציב (משתנה).
- לכן, אם נחבר נגד בטור ל-BJT, המתח יתחלק בין נגד ל-BJT.
- כאשר הטמפל של ה-BJT תשתנה, תשתנה גם צריכת המתח שלו, והמתח יתחלק באופן שונה ביניהם.
- כתוצאה מכך הזרם יישאר קבוע, אך המתח על ה-BJT ישתנה.
- כעת, אם נושה את הזרם הנכנס נקבל זרם יוצא חדש וקבוע.

השוואה בין 2 המודלים:

אם נשווה בין 2 המודלים, נקבל את הקשרים הבאים:

$$\alpha_F \cdot I_{E0} = \alpha_R \cdot I_{C0}$$

$$\alpha_F \cdot I_{ES} = \alpha_R \cdot I_{CS}$$

$$I_{CS} = \frac{I_{C0}}{(1 - \alpha_F \alpha_R)}$$

$$I_{ES} = \frac{I_{E0}}{(1 - \alpha_F \alpha_R)}$$

$$I_S = \frac{\alpha_F \cdot I_{E0}}{1 - \alpha_F \alpha_R} = \frac{\alpha_R \cdot I_{C0}}{1 - \alpha_F \alpha_R}$$

$$\alpha_F = \alpha_{DC} = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F}$$

$$\alpha_R = \frac{\beta_R}{1 + \beta_R}$$

$$I_{E0} = I_S \left[\frac{1 + \beta_F}{\beta_F} - \frac{\beta_R}{1 + \beta_R} \right]$$

$$I_{C0} = I_S \left[\frac{1 + \beta_R}{\beta_R} - \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} \right]$$

במקרה הפרטי של מוד פעיל קדמי ו- NPN מתקיימים הקשרים הבאים:

$$\begin{cases} I_E = a_{11}(e^{V_{BE}/\phi_T} - 1) + a_{12} \\ I_C = -a_{21}(e^{V_{BC}/\phi_T} - 1) - a_{22} \end{cases}$$

$$a_{11} = \frac{-I_{E0}}{1 - \alpha_F \alpha_R} = I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right) = I_{ES}$$

$$a_{22} = \frac{-I_{C0}}{1 - \alpha_F \alpha_R} = -I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) = -I_{CS}$$

$$a_{12} = \frac{-\alpha_R \cdot I_{C0}}{1 - \alpha_F \alpha_R} = -I_S = -\alpha_R \cdot I_{CS}$$

$$a_{21} = \frac{\alpha_F \cdot I_{E0}}{1 - \alpha_F \alpha_R} = -I_S = -\alpha_F \cdot I_{ES}$$

מיתוג ב- BJT:

באותו האופן שבו צומת PN מוגבלת במהירות המיתוג, כך גם BJT.

תגובת התדר (אות קטן) ב- BJT:

נכניס אות DC עם אות AC קטן ביחס ל DC.

אם לאות תדירות קטנה, אז β לא ישתנה.

אם לאות תדירות גדולה, אז β יקטן.

תדירות קיטעון:

זו התדירות בה β יורד ב 3 db.

טרנס מוליכות g_m :

ככל ש g_m גדול יותר, כך יהיו שינויים גדולים יותר ביציאה כתוצאה מהכנסת אות קטן. אנחנו מעדיפים שיהיה g_m גדול.

טרנס כניסה g_B :

באיזו מידה ישתנה I_B כתוצאה מהכנסת אות קטן.

HBT - Hetrojunction Bipolar Transistor:

ככל שהבסיס צר יותר יש לנו העברת זרם טובה יותר. אך ככל שהוא צר יותר יש לנו התנגדות לזרם I_B גדולה יותר, וזה לא טוב לנו.

הפתרון הוא HBT.

זה BJT הבנוי מ 2 חומרים שדומים בכל תכונותיהם פרט לעובדה שיש להם E_g שונה. דאג שבבסיס ובקולקטור יהיה E_g קטן יותר מאשר באמיטר.

בעצם נוצרים 2 מחסומי פוטנציאל שונים (לאלקט' ולחורים). כתוצאה מכך בבסיס ניתן יהיה לזהם בכמות גדולה יותר מבלי לפגוע ביעילות ההתקן.

מנגוני פריצה ב-BJT:

מתח הבקיעה שונה בין CE לב- ל- CC.

פריצת בקיעה:

קורה כאשר אזור המחסור מכיל את כל רוחב הבסיס.

פריצת מפולת:

בדיוק כמו בצומת PN, קיימת כאן פריצת מפולת. הפריצה תקרה במתחים קטנים יותר מאשר בדיודה.

BJT לא אידיאלי:

ישנן 2 נקודות שמהן התעלמנו בפיתוחים שלנו:

1. קיימת G-R בתוך אזורי המחסור.
2. אם משנים את המתח שעל צומת CB אזור המיחסור ישתנה, ובעקבות זאת גם רוחב הבסיס האפקטיבי ישתנה.

מתח ארליך:

הוא אינדיקטור לאידיאליות של טרנזיסטור. ככל שהוא גדול יותר, כך הטרנזיסטור אידיאלי יותר.

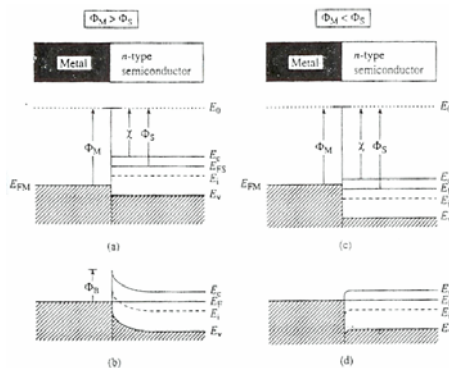
צומת מתכת מל"מ

ϕ_M - פונקציית העבודה של מתכת היא האנרגיה הדרושה להוצאת אלקטרון מהמתכת לואקום.

ϕ_S - פונקציית העבודה של מל"מ היא האנרגיה הדרושה להוצאת אלקטרון מרמת פרמי לואקום.

χ - אפיניות של מל"מ היא האנרגיה הדרושה להוצאת אלקטרון מרמת הולכה לואקום.

אופי המגע ע"פ הפרש פונקציות עבודה		
	N Type	P Type
$\phi_M > \phi_S$	שוקטי	אוהמי
$\phi_M < \phi_S$	אוהמי	שוקטי



דיודת שוטקי (צומת שוטקי):

הסבר עבור n type:

- זה מצב בו חיברנו מתכת עם Ef קטן יותר מאשר המל"מ.
- הזרם מורכב מסוג אחד של נושאי מטען בלבד (הרוב במל"מ).
- בצומת זו אנחנו לא מוגבלים בזמני מיתוג כי יש כאן תנועה של מטעני רוב בלבד.
- החסרון הוא שיש זרמי זליגה גדולים מאוד.
- כל אזור המיחסור נמצא בצד המל"מ.

התהליך הפיסיקלי ביצירת המגע עבור n type:

- רמת פרמי במל"מ גבוהה מרמת פרמי במתכת.
- אלקט' יעברו לרמה אנרגטית נמוכה יותר - יעברו למתכת.
- יונים חיוביים נשארים במל"מ ויוצרים שדה שמפצה על זרמת האלקט' למתכת.

זרמים בדיודת שוטקי עם n type:

- זליגה של חורים מהמל"מ למתכת (זניח).
- מינהור של נושאי רוב מהמל"מ למתכת (זניח).
- תרמי-יוני: אלקטרונים מהמל"מ צוברים אנרגיה קינטית מספקת כדי לעבור את המחסום.

מחסום שוטקי:

$$n\text{-type: } \phi_{Bn} = \phi_M - \chi$$

$$p\text{-type: } \phi_{Bp} = E_g + \chi - \phi_M$$

- מחסום שוטקי הוא מחסום טבעי וקבוע שמונע מאלקטרונים לעבור מהמתכת למל"מ.
- בצד המל"מ יש מחסום קטן יותר, שניתן להורדה תחת ממתח מתאים.

צומת (מגע) אוהמי:

יש מחסום קטן מאוד מצד המל"מ, ותחת ממתח המחוסם הוא אפסי. לכן הצומת לא מפריע לתנועת האלקטרונים (זרם).

צומת MS תחת ממתח:

- מחסום שוטקי (צד המתכת) לא משתנה תחת ממתח.
- המחוסם שבצד המל"מ כן משתנה תחת ממתח.
- אם נשתמש באותה מתכת במל"מ ϕ וגם במל"מ χ , אז נקבל 2 צמתים שונות, האחד שוטקי והשני אוהמי.
- הפתרון: אם ניקח צומת שוטקי ונזהם חזק בקירבת המחוסם, נקבל מחסום צר מאוד שמאפשר מינהור.
- הזרמים בצומת MS הם זרמים טרמי יוניים. זרמים כתוצאה מחימום. במתכת יש יותר אלקטרונים מאשר במל"מ. אך במל"מ לכל אלקטרון יש יותר אנרגיה מאשר במתכת.

משוואות כלליות:

$$V_{bi} = \frac{1}{q}(\phi_B - (E_C - E_F)_{EB})$$

$$p\text{-type} \Rightarrow \epsilon_{(x)} = \frac{qN_D}{\epsilon_s}(w-x)$$

$$n\text{-type} \Rightarrow \epsilon_{(x)} = \frac{-qN_A}{\epsilon_s}(w-x)$$

$$p\text{-type} \Rightarrow V_{(x)} = \frac{qN_D}{\epsilon_s}(wx - \frac{x^2}{2}) - \phi_B$$

$$n\text{-type} \Rightarrow V_{(x)} = \frac{-qN_A}{2\epsilon_s}(w-x)^2$$

$$x_n, x_p = w \Rightarrow w = \left(\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} - V_A) \right)^{\frac{1}{2}}$$

(V_A - ממתח חיובי)

משוואות אופייני זרם-מתח:

(ρ עבור n ו-1 עבור p)

$$\begin{cases} I = I_S(e^{V/\phi_T} - 1) \\ I_S = AA^*T^2 e^{-\frac{\phi_B}{kT}} \end{cases}$$

$$A^* = \frac{4\pi q m_e^2 k^2}{h^3}$$

זרם הזליגה של חורים במל"מ n type:

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} P_{no} (e^{V/\phi_T} - 1)$$

מוליכות דינמית:

$$\frac{1}{RC} = \frac{\partial J}{\partial V} \Big|_{V=0}$$

התנגדות דינמית:

$$R_C = \frac{\phi_T}{A^* T^2} e^{\frac{\phi_B}{kT}}$$

הערה:

מאוד קטן ולכן ϕ_B זניח, כלומר, ניתן לומר שהזרם זניח - משמעות: הצומת נקראת "צומת מישרת". כלומר, אם נושים למשל מתח AC על הצומת, נקבל שהיא יוצרת זרם רק עבור ממתח קדמי, ועבור ממתח אחורי נקבל זרם אפס.

קיבול:

$$Q = qN_D w = [2\epsilon_s qN_D (V_{bi} - V)]^{\frac{1}{2}}$$

$$C = \frac{dQ}{dV} = \left(\frac{\epsilon_s qN_D}{2(V_{bi} - V)} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\epsilon_s}{w}$$

קבל MOS

Metal Oxide Semiconductor

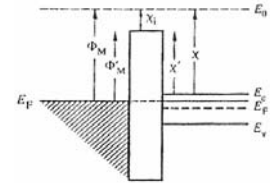
כללי:

- זוהי צומת מתכת-מל"מ כאשר ביניהם קיימת תחמוצת מבודדת.
- עם הפעלת מתח על קבל ה-MOS יוצר איזור מחסור על המל"מ בלבד (עד הגבול עם האוקסיד).
- קבל n-mos בנוי ממל"מ p-type.
- קבל p-mos בנוי ממל"מ n-type.

הנחות אידיאליות:

1. תחמוצת אידיאלית - ללא מטענים או יונים.
2. אין זרם דרך התחמוצת.
3. פונק' העבודה של המתכת שווה לזו של המל"מ.

$$\phi_s = \phi_m$$



קבל מוס תמיד נמצא במצב שיווי משקל. אף פעם לא עובר דרכו זרם.

סימונים:

- ϕ_s הוא פוטנציאל פני השטח של המל"מ, מידת כיפוף פסי האנרגיה.
- ϕ_F מרחק בין רמת פרמי לרמת פרמי האינטרינזית.
- V_G (Gate - G) ה"כ המתח שנופל על התחמוצת ועל המל"מ.
- ϵ_s קבוע דיאלקטרי של סיליקון.
- ϵ_{ox} קבוע הדיאלקטרי של האוקסיד.
- w רוחב איזור המחסור.
- X_{od} עובי התחמוצת.
- E_{ox} שדה על התחמוצת.
- E_s השדה על המל"מ.
- Q_s המטען על ה-Surface.
- Q_M המטען על גבול המתכת - אוקסיד.
- C_{ox} קיבול התחמוצת (ערך קבוע).
- C_s קיבול המיחסור (תלוי בממתח ורוחב איזור המיחסור).
- C_{tot} הקיבול השקול של ההתקן.
- Q_f מטענים קבועים בתחמוצת.
- Q_m מטענים ניידים בתחמוצת.
- Q_{et} מטענים שנמצאים במלכודות.
- Q_{ox} ה"כ מטענים בתחמוצת.
- V_{FB} אם נשים מתח זה על הקבל נחזור למצב האידיאלי.

נוסחאות:

$$\epsilon_s = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 ; \epsilon_{ox} = \epsilon_r - \epsilon_0 \cdot \epsilon_0$$

$$\phi_s = \frac{1}{q} [E_{f,bulk} - E_{f,surface}]$$

$$\phi_s = V_{(0)} = \frac{qN_A w^2}{2\epsilon_s}$$

$$\phi_{MS(F)} = \phi_{MS} = \phi_m - \phi_s$$

$$V_{ox} = X_{ox} \cdot E_{ox} = X_{ox} \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} E_s$$

$$V_G = \phi_s + V_{ox}$$

$$V_G = V_T \Rightarrow \phi_s = 2\phi_F$$

$$E_{ox} = - \frac{dV_{ox}}{dx}$$

$$V_{(x)} = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (w-x)^2$$

$$E_{(x)} = \frac{qN_A}{\epsilon_s} (w-x)$$

$$x=0 \Rightarrow E_{(0)} = E_s$$

עבור קבל n-mos אידיאלי (מל"מ p-type):

$$\phi_F = \phi_T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$$

$$V_T = \phi_s + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} x_{ox} \sqrt{\frac{2qN_A \phi_s}{\epsilon_s}} = 2\phi_F + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} x_{ox} \sqrt{\frac{4qN_A \phi_F}{\epsilon_s}}$$

$$V_T = \phi_s + \frac{Q_{dep}}{C_{ox}} ; Q_{dep} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} x_{ox} \sqrt{\frac{2qN_A \phi_s}{\epsilon_s}}$$

$$w_{p-type} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_s}{qN_A}}$$

עבור קבל p-mos אידיאלי (מל"מ n-type):

$$\phi_F = -\phi_T \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = E_{i,Bulk} - E_F$$

$$V_T = \phi_s - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} x_{ox} \sqrt{\frac{2qN_D (-\phi_s)}{\epsilon_s}} = 2\phi_F - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} x_{ox} \sqrt{\frac{4qN_D (-\phi_F)}{\epsilon_s}}$$

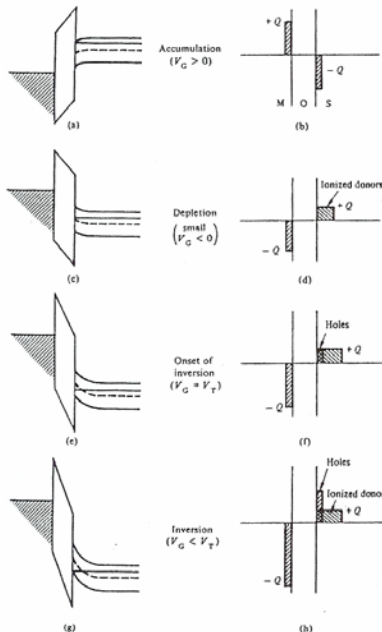
$$V_T = \phi_s - \frac{Q_{dep}}{C_{ox}} ; Q_{dep} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} x_{ox} \sqrt{\frac{2qN_D (-\phi_s)}{\epsilon_s}}$$

$$w_{n-type} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_s}{qN_D}}$$

הערה:

כאשר מפעילים מתח על השער (קבל המוס) הוא מתחלק בין המל"מ לתחמוצת ולא על המתכת.

מצבי קבל מוס: (עבור מל"מ n)



FlatBand

כאשר $V_g = 0$.

צבירה (Accumulation):

הפעלת מתח מתח שימשוך את מטעני הרוב לחיבור בין המל"מ לאוקסיד. רוב המתח נופל על התחמוצת.

מחסור (Depletion):

הפעלת מתח המרחיק את מטעני הרוב מהאוקסיד, שם נוצר איזור מחסור מהיונים שנשארו במקום. נוצרת גם משיכת מטעני מיעוט למקום.

היפוך (Inversion):

המשיכת פעולת המחסור עד להגעה למצב שבו הרמה האינטרינזית חוצה את רמת פרמי.

נק' ההיפוך היא כאשר ריכוז נושאי המיעוט על פני התחמוצת שווה לריכוז נושאי הרוב ב-BULK.

במצב זה נוצרת "תעלה" צרה ובתוכה נושאי מיעוט. שכבת המחסור מגיעה לגודל מקס' ולא גדלה יותר (Cd מגיע למינימום).

עבור מל"מ P-type:

$$n_{SURFACE} = n_s = n_i e^{\left(\frac{E_f - E_{(0)}}{\phi_T} \right)} ; p_{BULK} = P_B = n_i e^{\left(\frac{E_B - E_f}{\phi_T} \right)}$$

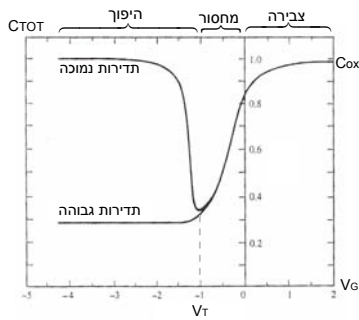
V_T - מתח סף:

המתח בו ריכוז המיעוט על גבול האוקסיד - סיליקון (Surface), שווה לריכוז הרוב בתוך המל"מ.

הערה:

בגלל שאין מטענים בתחמוצת, השדה שם קבוע.

קיבול של קבל מוס (אידיאלי):



השרטוט הוא עבור n-type בלבד.

כדי לעבור לשרטוט של p-type יש להפוך את הגרף לפי ציר y (מראה).

$$Q_M = -Q_s \Rightarrow \epsilon_{ox} \cdot E_{ox} = \epsilon_s E_s = |Q|$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} A}{x_{ox}} ; C_s = \frac{\epsilon_s A}{w}$$

קיבול כללי לפי מצבי קבל מוס:

צבירה

אין שכבת מיחסור לכן אין קיבול מיחסור.

$$C_{TOT} = C_{ox}$$

מיחסור

יש איזור מיחסור שגדל כל הזמן.

$$C_{TOT} = \frac{C_{ox} C_s}{C_s + C_{ox}}$$

היפוך

אם נפעיל מתח DC על הקבל ואח"כ נוסיף מתח AC נקבל תוספת מתח ΔQ .

בתדירות נמוכה נקבל ΔQ בשכבת ההפוך כי נושאי המיעוט מספיקים לעקוב אחרי שינויי ה-AC.

בתדירות גבוהה נקבל ΔQ בשכבת המחסור, כי נושאי המיעוט לא מספיקים להווצר / להעלם (תהליכי ה-G-R אינם מהירים מספיק).

תדירות גבוהה:

$$C_{TOT} = \frac{C_{ox} C_s}{C_s + C_{ox}}$$

תדירות נמוכה:

$$C_{TOT} = C_{ox}$$

קבל מוס לא אידיאלי:

$$1. \phi_m < \phi_s$$

2. התחמוצת לא אידיאלית.

$$-V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$V_T(notideal) = V_T(ideal) - V_{FB}$$

$$n-type: V_T(notideal) = 2\phi_F - \frac{Q_{dep}}{C_{ox}} + \phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$p-type: V_T(notideal) = 2\phi_F + \frac{Q_{dep}}{C_{ox}} + \phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

- בקבל לא אידיאלי יכול להווצר מצב שכפוף הפסים יוצר שכבת היפוך קבועה בחומר.

- מצב זה נקרא Normally On.

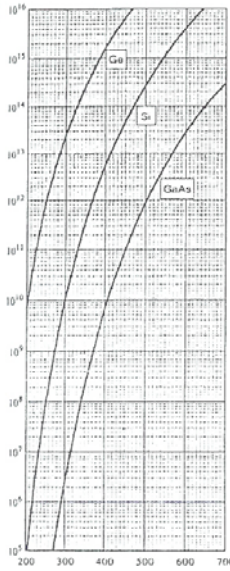
- כיפוף הפסים מוריד את V_t שצריך בד"כ ליצירת ההיפוך.

- ז"א קבל לא אידיאלי כל גרף הקיבול נע ימינה, V_t נע ימינה.

- אם ערך הקיבול ב $V_g = 0$ הוא לא CO אז הקבל לא אידיאלי.

- רוחב איזור המיחסור מקסימלי כאשר $V_G = V_T$.

ריכוז נתונים עבור מל"מים שונים



Si - סיליקון	
טמ' (K)	ni [m ⁻³]
273K (0°C)	8.86 · 10 ¹⁴
278K (5°C)	1.44 · 10 ¹⁵
283K (10°C)	2.30 · 10 ¹⁵
288K (15°C)	3.62 · 10 ¹⁵
293K (20°C)	5.62 · 10 ¹⁵
298K (25°C)	8.6 · 10 ¹⁵
300K (27°C)	1.00 · 10¹⁶
303K (30°C)	1.30 · 10 ¹⁶
308K (35°C)	1.93 · 10 ¹⁶
313K (40°C)	2.85 · 10 ¹⁶
318K (45°C)	4.15 · 10 ¹⁶
323K (50°C)	5.97 · 10 ¹⁶

GaAs	
טמ' (K)	ni [m ⁻³]
273K (0°C)	1.02 · 10 ¹¹
278K (5°C)	1.89 · 10 ¹¹
283K (10°C)	3.45 · 10 ¹¹
288K (15°C)	6.15 · 10 ¹¹
293K (20°C)	1.08 · 10 ¹²
298K (25°C)	1.85 · 10 ¹²
300K (27°C)	2.25 · 10¹²
303K (30°C)	3.13 · 10 ¹²
308K (35°C)	5.20 · 10 ¹²
313K (40°C)	8.51 · 10 ¹²
318K (45°C)	1.37 · 10 ¹³
323K (50°C)	2.18 · 10 ¹³

זיהום סיליקון בבורן = Na.
זיהום סיליקון ברותן = Nb.

Si - סיליקון - T = 300

ריכוז זיהום N _A +N _D [cm ⁻³]	ניידות [cm ² /(V·s)]		מקדם דיפוזיה [cm ² /s]	
	חורים	אלקט'	חורים	אלקט'
10 ¹⁴	490	1320	13	34
2x10 ¹⁴	485	1313	12.7	34
5x10 ¹⁴	480	1304	12.4	33.5
10 ¹⁵	470	1290	12	33
2x10 ¹⁵	460	1280	11.6	32.5
5x10 ¹⁵	439	1216	11.3	31
10 ¹⁶	400	1120	10.4	29
2x10 ¹⁶	359	1000	9.3	26
5x10 ¹⁶	292	826	7.6	21
10 ¹⁷	235	660	6.2	17
2x10 ¹⁷	186	517	4.8	13
5x10 ¹⁷	161	324	4.2	8
10 ¹⁸	100	230	2.6	6
2x10 ¹⁸	82	170	2	4.4
5x10 ¹⁸	68	124	1.7	3
10 ¹⁹	60	100	1.5	2.6

פערים אטוריים				
Ge	Si	GaAs	GaP	יהלום
0.67ev	1.12ev	1.43ev	2.25ev	5.33ev

מסות אפקטיביות		
m _p [*] /m ₀	m _n [*] /m ₀	מל"מ
0.81	1.18	Si
0.36	0.55	Ge
0.52	0.066	GaAs

$$V_D \geq V_{D,sat}$$

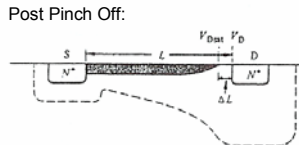
$$I_D = \frac{z}{L} \frac{\mu_n C_{ox}}{2} (V_G - V_T)^2$$

השדה בתעלה:

$$E = \frac{V_D}{L}$$

L - הוא אורך התעלה.

(P.O) Pinch Off



- עם הפעלת V_D, נוצר אזור מיחסור בין המל"מ לחלקים שמזוהמים ב n.
- ככל שנגביר את V_D, אזור המיחסור הזה יגדל.
- בשלב מסוים אזור המיחסור יתחיל להקטין את רוחב התעלה עד שישאר רק אזור מיחסור.
- באפקט זה נקרא pinch off.
- עד רגע קבלת ה V_D אנחנו בתחום הלינארי של האופיי.

בתעלה ארוכה:

- מרגע קבלת P.O רוב המתח יפול על אזור המיחסור מכיוון שיש לו התנגדות גדולה מאוד.
- אם נגדיל את V_D כל המתח הנוסף יפול על אזור המיחסור.
- רוחב אזור המיחסור יגדל, אך מכיוון שזו תעלה ארוכה גודל זה זניח.
- לכן השדה בתעלה לא ישתנה.
- הזרם יישפע רק מהשינויים באזור המיחסור.
- במצב זה נגיע לזרם רוויה.

בתעלה לא ארוכה:

- מכיוון שהתעלה קצרה, כל הגדלת א.מחסור תקטין את אורך התעלה.
- כתוצאה מכך השדה בתעלה יגדל באופן לינארי.
- במצב זה לא נגיע לזרם רוויה.

$$V_{D,sat} = V_G - V_T$$

טו"פ למציאת הזרם ב-Mosfet:

1. נמצא אם הקבל בקיטעון או הולכה ע"י מציאת V_T.
2. נמצא את V_{D,sat} כדי לראות אם אנחנו בתחום הלינארי או בתחום הלא לינארי.
3. הצבת נתונים בנוסחאות לזרם.

מודל ריבועי:

- הנחת רוחב אזור מחסור קבוע תחת ממתח.
- על גבול התחמוצת יש ריכוז מלכודות גבוה יותר, מכיוון שיש שם קשרים פתוחים.
- לכן ניידות האלקטרונים תרד ככל שמתקרבים לסיליקון.

$$\mu_n = \frac{\int_0^{x(y)} \mu_{n(x,y)} n_{(x,y)} dx}{\int_0^{x(y)} n_{(x,y)} dx} = \frac{q}{Q_{n(y)}} \int_0^{x(y)} \mu_{n(x,y)} n_{(x,y)} dx$$

$$Q_{n(y)} = -q \int_0^{x(y)} n_{(x,y)} dx$$

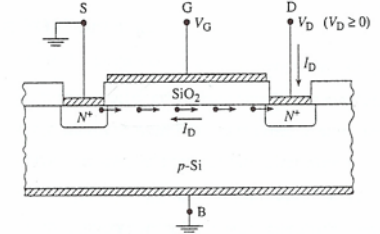
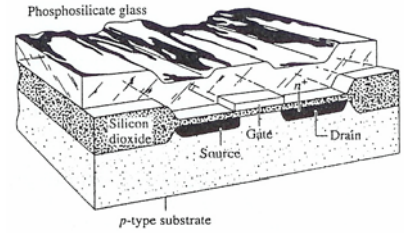
$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (2\phi_F - \phi)}$$

φ - הוא ממתח כתוצאה מ V_D.

הערה: GaAs לא ניתן ליצור קבל Mos או Mosfet כי אין לו תחמוצת טבעית.

טרנזיסטור MOS

MOSFET - MOS Field Effect Transistor



כלי:

- זהו התקן יוני פולרי - בו זרם סוג אחד של נושאי מטען.
- זהו טרנזיסטור מבוקר מתח.
- טרנזיסטור n-MOS מבוסס על מל"מ ק ויוצר את הזרם ע"י נושאי מיעוט n.
- טרנזיסטור p-MOS מבוסס על מל"מ n ויוצר את הזרם ע"י נושאי מיעוט p.

קיימים 2 סוגי Mosfet:

Enhancement Mosfet (העשרה)

- טרנזיסטור זה הוא מסוג Normally Off.
- הוא אינו מוליך (Off) כאשר אין שכתב היפוך.
- לאחר הפעלת מתחים מתאימים (V_G, V_D) ויצירת שכתב היפוך בתעלה הוא הופך למוליך (On).

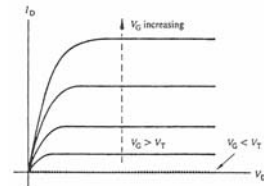
Depletion Mosfet (מחסור)

- טרנזיסטור זה הוא מסוג Normally On.
- הוא מוליך (On) גם ללא הפעלת V_G עקב שכתב היפוך הקיימת בתעלה.
- ניתן ליצור מצב זה ב-2 דרכים:
- שימוש בקבל MOS לא אידיאלי.
- זיהום איזור התעלה מראש.
- לאחר הפעלת מתחים מתאימים (V_G, V_D) ניתן "להבריח" את נושאי המיעוט מהתעלה וכך ליצור מצב של Off.

מכאן והלאה הכל מתייחס רק למל"מ p

- אם V_T > 0 אז הטרנזיסטור נקרא-normally off
- אם V_T < 0 אז הטרנזיסטור נקרא-normally on

אופיין מתח-זרם (מל"מ P):



- במתחים נמוכים האופיין הוא גרף לינארי.
- במתחים גבוהים האופיין מגיע לרוויה.

Z - עומק (המימד שלתוך הדף) התעלה.

תחום לינארי

$$V_D \leq V_{D,sat}$$

$$I_D = \frac{z}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right]$$

תחום לא לינארי (תחום רוויה)

נוסחאות שימושיות:

1. $|a + b| \leq |a| + |b|$
2. $|a \cdot b| \leq |a| \cdot |b|$
3. $\frac{1}{n(n+1)} = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}$
4. $\frac{a_1 + \dots + a_n}{n} \geq \sqrt[n]{a_1 \cdot \dots \cdot a_n}, a_1, \dots, a_n \geq 0$
5. $|\sin a| \leq |a| \quad |\sin b - \sin a| \leq |b - a|$
6. $\frac{f(b) - f(a)}{b - a} = f'(c), 0 < a < c < b$
7. $\sqrt[n]{Const} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 \quad \sqrt[n]{n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$
8. $b^n \geq n^b \quad b > 1$
9. $\frac{n^b}{b^n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$
10. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = 1$
11. $\lim_{y \rightarrow 0} (1 + y)^{\frac{1}{y}} = e$
12. $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e$
13. $\cos(90 - \alpha) < \alpha \quad \cos(\alpha) < \alpha - 90$
14. $\ln x < x$
15. $\sqrt[n]{a^n + b^n} \rightarrow a \quad a > b$
16. **לופיטל:**
17. $\frac{0}{0}, \frac{\pm\infty}{\pm\infty}, 0 \cdot \pm\infty$ של במצב
18. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(x)}{g'(x)}$
19. $\lim_{x \rightarrow 0} x^x = \lim_{x \rightarrow 0} e^{\ln x^x} = \lim_{x \rightarrow 0} e^{\frac{\ln x}{x}} = 1$
20. $\lim_{x \rightarrow 0} x^a = e^{\lim_{x \rightarrow 0} (a-1) \cdot \frac{1}{x}}$
21. $(a^x)' = a \cdot x^{a-1} \cdot \ln a$
22. $a = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot b_n = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n - a) \cdot b_n + a \cdot \sum_{n=1}^{\infty} b_n$
23. $\ln a + \ln b = \ln(a \cdot b)$
24. $\ln(x) < x, \ln(x+1) < x$
25. $x \geq 3 \Rightarrow \ln(x) > 1$
26. $n! < n^n$

סדרה חשבונית:

$$a_n = a_0 + n \cdot d$$

$$S_n = (a_0 + a_n) \cdot \frac{n+1}{2}$$

סדרה הנדסית:

$$a_n = a_0 \cdot q^n$$

$$S_n = a_0 \cdot \left(\frac{q^{n+1} - 1}{q - 1}\right)$$

גזרות מידיות:

1. $\sin' x = \cos x$
2. $\cos' x = -\sin x$
3. $\sinh' x = \cosh x$
4. $\cosh' x = \sinh x$
5. $\arcsin' x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
6. $\arccos' x = \frac{-1}{\sqrt{1-x^2}}$
7. $\arctan'(x) = \frac{1}{1+x^2}$
8. $\operatorname{arc cot}'(x) = \frac{-1}{1+x^2}$
9. $\tan'(x) = \frac{1}{\cos^2 x}$
10. $\cot'(x) = \frac{-1}{\sin^2 x}$
11. $(e^x)' = e^x$
12. $(\ln x)' = \frac{1}{x}$
13. $(a^x)' = a^x \ln a$
14. $(\log_a^x)' = \frac{1}{x \ln a}$

אינטגרלים מיידיים:

1. $\int \frac{1}{x} dx = \ln x + c$
2. $\int \ln x dx = x \ln x - x + c$
3. $\int \sin x dx = -\cos x + c$
4. $\int \frac{1}{\cos^2 x} dx = \tan x + c$
5. $\int \frac{1}{\sin^2 x} dx = -\cot x + c$
6. $\int \tan x dx = -\ln(\cos x) + c$
7. $\int \cot x dx = \ln(\sin x) + c$
8. $\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + c$
9. $\int \frac{1}{1+x^2} dx = \arctan x + c$
10. $\int \frac{1}{a^2+x^2} dx = \frac{1}{a} \arctan\left(\frac{x}{a}\right) + c$
11. $\int \frac{1}{a^2-x^2} dx = \frac{1}{2a} \ln\left(\frac{a+x}{a-x}\right) + c$
12. $\int \frac{1}{\sqrt{a^2-x^2}} dx = \arcsin\left(\frac{x}{a}\right) + c$
13. $\int \frac{1}{\sqrt{x^2 \pm a^2}} dx = \ln\left(x + \sqrt{x^2 \pm a^2}\right) + c$
14. $\int \frac{A}{x-a} dx = A \ln|x-a| + C$
15. $\int \frac{A}{(x-a)^n} dx = A \cdot \frac{1}{1-n} (x-a)^{1-n} + C$
16. $\int \frac{Ax+B}{x^2+px+q} dx = \frac{2B-Ap}{\sqrt{4q-p^2}} \cdot \arctan\left(\frac{2x+p}{\sqrt{4q-p^2}}\right)$

מד"ר מסדר ראשון:

$$y' + a_{(x)} \cdot y = b_{(x)}$$

$$\mu_{(x)} = e^{\int a_{(x)} dx}, c_{\mu} = 0$$

$$y = \frac{1}{\mu_{(x)}} \cdot \left(\int \mu_{(x)} \cdot b_{(x)} dx + c\right)$$

שונות

דוגמה פשוטה אך חשובה:

$$e^z = \sqrt{2} \cdot 1 = \sqrt{2} \cdot e^{2\pi i k} = e^{\ln \sqrt{2}} \cdot e^{2\pi i k} = e^{\ln \sqrt{2} + 2\pi i k}$$

$$z = \ln \sqrt{2} + 2\pi \cdot i \cdot k$$

נוסחת טיילור:

$$f(z - z_0) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!} \cdot (z - z_0)^n$$

נוסחאות שונות:

$$a^3 + b^3 = (a+b)(a^2 - ab + b^2)$$

$$(a+b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$$

$$(a-b)^3 = a^3 - 3a^2b + 3ab^2 - b^3$$

$$(a+b)^4 = a^4 + 4a^3b + 6a^2b^2 + 4ab^3 + b^4$$

$$(a-b)^4 = a^4 - 4a^3b + 6a^2b^2 - 4ab^3 + b^4$$

$$(a+b)^5 = a^5 + 5a^4b + 10a^3b^2 + 10a^2b^3 + 5ab^4 + b^5$$

$$(a-b)^5 = a^5 - 5a^4b + 10a^3b^2 - 10a^2b^3 + 5ab^4 - b^5$$

הבינום של ניוטון:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

$$(a+b)^n = a^n + \binom{n}{1} a^{n-1}b + \binom{n}{2} a^{n-2}b^2 + \dots + \binom{n}{n-1} ab^{n-1} + b^n$$

$$a^n - b^n = (a-b)(a^{n-1} + a^{n-2}b + a^{n-3}b^2 + \dots + b^{n-1})$$

זהויות טריגונומטריות:

1. $\sin(-\alpha) = -\sin \alpha$
2. $\cos(-\alpha) = \cos \alpha$
3. $\tan(-\alpha) = -\tan \alpha$
4. $\tan \alpha \cdot \cot \alpha = 1$
5. $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$
6. $1 + \tan^2 \alpha = 1/\cos^2 \alpha$
7. $1 + \cot^2 \alpha = 1/\sin^2 \alpha$
8. $\sin(2\alpha) = 2 \sin \alpha \cos \alpha$
9. $\cos(2\alpha) = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$
10. $\cos(2\alpha) = 2 \cos^2 \alpha - 1$
11. $\cos(2\alpha) = 1 - 2 \sin^2 \alpha$
12. $\tan(2\alpha) = 2 \tan \alpha / (1 - \tan^2 \alpha)$
13. $\sin(3\alpha) = 3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha$
14. $\cos(3\alpha) = 4 \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha$
15. $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin(a/2 + \beta/2) \cos(a/2 - \beta/2)$
16. $\sin \alpha - \sin \beta = 2 \sin(a/2 - \beta/2) \cos(a/2 + \beta/2)$
17. $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos(a/2 + \beta/2) \cos(a/2 - \beta/2)$
18. $\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin(a/2 + \beta/2) \sin(a/2 - \beta/2)$
19. $\sin \alpha \cos \beta = 1/2 (\sin(a + \beta) + \sin(a - \beta))$
20. $\sin \alpha \sin \beta = 1/2 (\cos(a - \beta) - \cos(a + \beta))$
21. $\cos \alpha \cos \beta = 1/2 (\cos(a + \beta) + \cos(a - \beta))$
22. $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$
23. $\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$
24. $\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$
25. $\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$
26. $\tan(\alpha + \beta) = (\tan \alpha + \tan \beta) / (1 - \tan \alpha \tan \beta)$
27. $\tan(\alpha - \beta) = (\tan \alpha - \tan \beta) / (1 + \tan \alpha \tan \beta)$
28. $\tan(\alpha + \beta) - \tan \alpha - \tan \beta = \tan(\alpha + \beta) \tan \alpha \tan \beta$
29. $\arcsin \alpha + \arccos \alpha = \pi / 2$

גזרת מסדר גבוה:

$$(f(x) \cdot g(x))^{(n)} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k)} \cdot g^{(n-k)}$$

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$