

## Mikroelektronika és technológia, VI. sz gyakorlat

### Mérések a CMOS IC gyártási eljárás ellenőrzésére

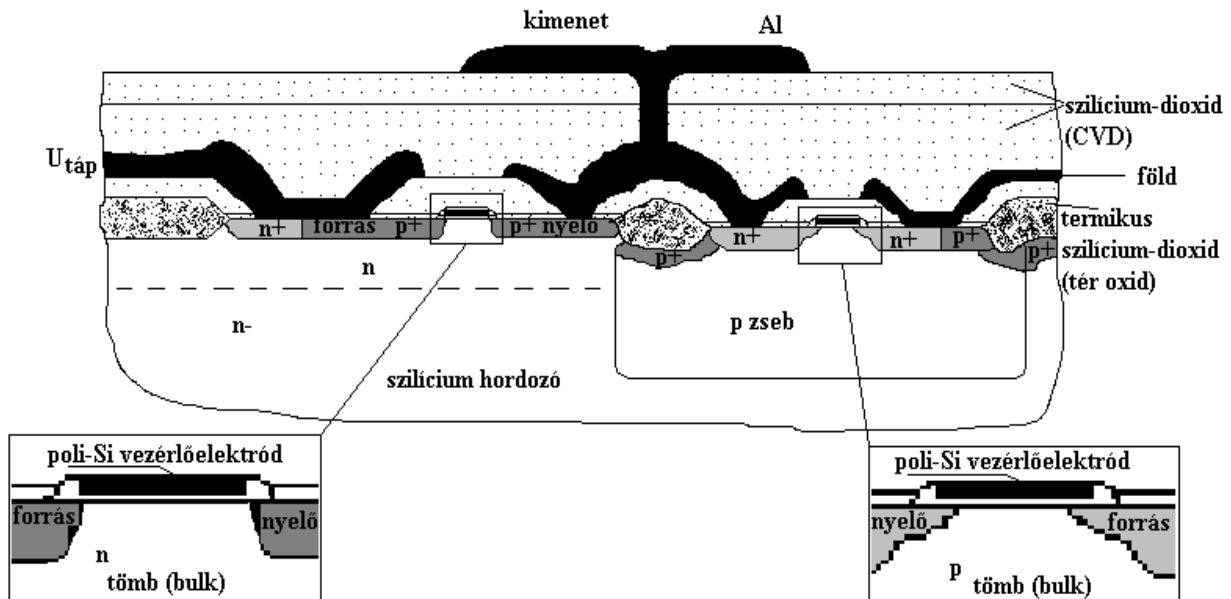
#### Célkitűzés:

A gyakorlat célja a CMOS IC-k viselkedésének megismerése, kapcsolat keresése az eszköz tulajdonságok és a technológia között, ezen keresztül a MOS rendszerek technológiájának és fizikai viselkedésének mélyebb megértése.

#### A méréshez szükséges elméleti ismeretek:

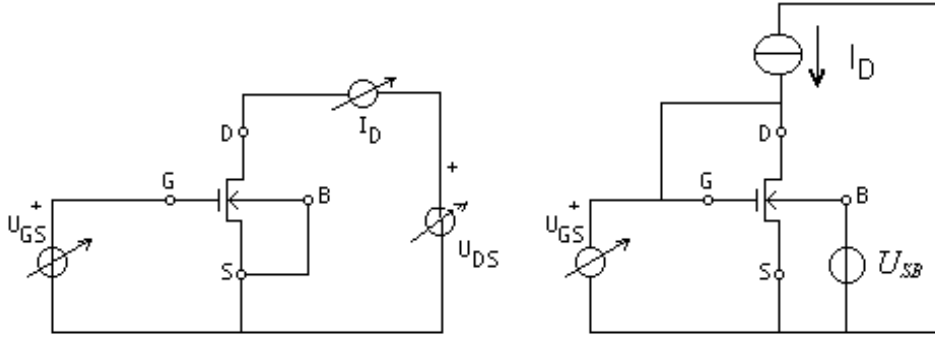
#### MOS tranzisztorok

Attól függően, hogy az MOS tranzisztor csatornájában az áram vezetését elektronok, vagy lyukak végzik, beszélünk elektronvezetéses (NMOS), vagy lyukvezetéses (PMOS) tranzisztorról. A korszerű CMOS integrált áramkörökben növekményes NMOS és PMOS tranzisztorok egyaránt megtalálhatók. Egy CMOS IC keresztmetszeti képét mutatja az 6.1. ábra.



6.1. ábra. CMOS integrált áramkör (inverter) keresztmetszeti képe a p és n csatornás MOS tranzisztorok kinagyított szerkezetével. A polikristályos szilíciumból készült vezérlőelektrodák azonos potenciálban vannak, ezeket a tömbtől néhány száz nm vastagságú  $\text{SiO}_2$  réteg választja el

A MOS tranzisztor karakterisztikáit először  $U_{SB}=0V$  esetén, a 6.2. ábra szerinti kapcsolásban vizsgáljuk



6.2.ábra. Mérőkapcsolások NMOS tranzisztorhoz. Baloldalon a kimeneti és transzfer karakterisztika meghatározására alkalmas kapcsolás: a vezérlőelektród és a nyelő feszültsége beállítható, eredmény az adott munkaponthoz tartozó nyelő áram. Jobb oldalon a küszöbfeszültség meghatározására alkalmas kapcsolás: az áramgenerátor a tranzisztor kinyitásaig emeli a nyelő és a hozzákapcsolt vezérlőelektród potenciálját.

A MOS tranzisztor karakterisztikáit viszonylag egyszerű matematikai összefüggések írják le. Ha a forrás és a nyelő közötti feszültség kicsi (u.n. trióda tartomány,  $U_{DS} < U_{GS} - V_T$ ), akkor

$$I_D = \frac{W}{L} \mathbf{m} C_{ox} \left[ (U_{GS} - V_T) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right], \quad (6.1)$$

ahol  $V_T$  a *küszöbfeszültség* (küszöbfeszültség), amit technológiai paraméterek és a munkaponti beállítás ( $U_{SB}$  feszültség) határoz meg,  $W$  az inverziós csatorna szélessége,  $L$  az inverziós csatorna hossza,  $C_{ox}$  a vezérlő elektróda felület egységre eső kapacitása,  $\mathbf{m}$  a töltéshordozók mozgékonyasága az inverziós csatornában, a  $W C_{ox} \mathbf{m} L$  szorzat az *áramkonstans*.

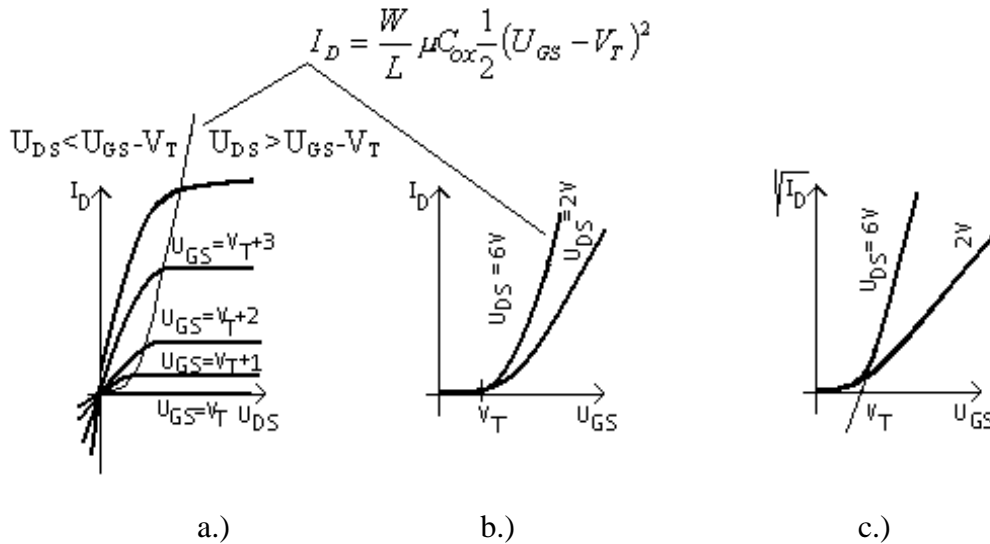
Ha a forrás és a nyelő közötti feszültség nagy (telítési tartomány,  $U_{DS} > U_{GS} - V_T$ ), akkor

$$I_D = \frac{W}{L} \mathbf{m} C_{ox} \frac{1}{2} (U_{GS} - V_T)^2. \quad (6.2)$$

A kimeneti ( $U_{DS} - I_D$ ) és transzfer ( $U_{GS} - I_D$ ) karakterisztikákat a 6.3. ábra mutatja. A kimeneti karakterisztikasereg (a.)  $U_{GS}$ -sel paraméterezett mezőjébe berajzolhatók az  $U_{DS} = U_{GS} - V_T$  egyenlőséget kielégítő pontok, ami egyenértékű az  $U_{DS} = U_{GS} - V_T$  behelyettesítésével a 6.1 összefüggésbe. Ez a kimeneti karakterisztika-sereggel összerajzolva megadja a trióda tartomány és a telítési tartomány közötti határt.

A transzfer ( $U_{GS} - I_D$ ) karakterisztika (6.3. ábra, b.) a telítési tartományban egy négyzetes parabola, amely  $V_T$ -nél simul az  $U_{GS}$  tengelybe. Kis  $U_{DS}$  esetén (a trióda tartomány elején) a transzfer karakterisztika egyenessé fajul, az eszköz vezérelhető ellenállásként viselkedik, a kimeneti vezetési értéke és az  $I_D$  áram egyaránt  $U_{GS} - V_T$ -vel arányos. A küszöbfeszültség alatti tartományban az áram közel zérus. (Pontosabb mérés és analízis az  $U_{GS}$ -sel exponenciálisan csökkenő áramot mutat a küszöbfeszültség alatti tartományban.)

A tranzszer ( $U_{GS}-I_D$ ) karakterisztikát négyzetgyökös  $I_D$  skálázással ábrázolva (6.3. ábra, c.) a telítési tartományban egyenes adódik, amely  $I_D=0$  értékre extrapolálva pontosan kijelöli  $V_T$  értékét.



6.3.ábra. MOS tranzisztor kimeneti (a.) és transzfer (b.c.) karakterisztikái

A tömbre (bulk) kapcsolt feszültség hatása

A forrás (source) és a nyelő (drain) között kialakuló csatornában a mozgásra képes töltéshordozók számát az oxidon keresztül a vezérlő elektród (gate) és a csatorna közötti potenciál befolyásolja.

A tömb (bulk) szerepe sok tekintetben hasonló a gate szerepéhez. Szokták is back-gate-nek (hátsó gate-nek) nevezni. Vizsgálatainkat most NMOS tranzisztor, azaz n-típusú csatorna esetében végezzük (p-típusú hordozó, n+ forrás és nyelő tartomány).

Ha a csatorna már kialakult, (azaz  $U_{GS} > V_T$ ), akkor a csatornához képest pozitívabb  $U_{GS}$  hatására nő a csatornában levő mozgásra képes elektronok száma, azaz nő az  $I_D$  áram, ha  $U_{GS}$  negatívabb, akkor csökken  $I_D$ .

Hasonlóképen, ha a tömb (bulk) potenciálját a forráshoz képest negatívabbá tesszük, akkor csökken az  $I_D$  drain áram. A jelenséget tekinthetjük úgy is, hogy negatívabb tömb (bulk) potenciál hatására megnő a ( $V_T$ ) küszöbfeszültség.

Általánosságban a MOS tranzisztorok küszöbfeszültségének  $U_{SB}$  függésére a legegyszerűbb fizikai magyarázat úgy adódik, ha a forrás és az inverziós csatorna tartományt valamint a tömb félvezetőt egy PN átmenetként kezeljük. A forrás és a tömb közé (záró irányú) feszültséget kapcsolva a kiürített rétegeknek mindkét oldalon meg kell növekedniük, ami azt jelenti, hogy a mozgékony töltéseket tartalmazó térrészek távolabb kerülnek egymástól. Ez a forrás és a tömb között a szokásos módon végbemegy, az inverziós csatorna és a tömb viszonylatában azonban a kiürített réteg csak a tömb felé nő, az inverziós oldalon viszont csökken a mozgékony töltések sűrűsége. Ezt a csökkenést csak egy nagyobb vezérlőelektróda feszültség kompenzálhatja, vagyis megnő az eszköz küszöbfeszültsége. Azonos töltésű inverziós réteget feltételezve az a megfontolás is helyes, hogy a tömbben megnövekedett kiürített réteg töltését a nagyobb vezérlőelektróda töltés (feszültség) kompenzálja.

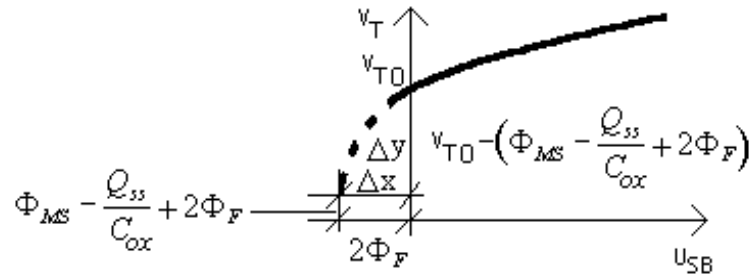
A küszöbfeszültség:

$$V_T = \Phi_{MS} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} + 2\Phi_F + \frac{\sqrt{2e_s q N_a}}{C_{ox}} \sqrt{2\Phi_F + U_{SB}} \quad (6.3)$$

ahol  $N_a$  a szubsztrát adalékkoncentrációja,  $Q_{ss}$  a felületi állapotokon tárolt töltés,  $\Phi_{MS}$  a kontaktpotenciál,  $\Phi_F$  a Fermi potenciál,  $\epsilon_s$  a szilícium dielektromos állandója,  $q$  az elemi töltés. A küszöbfeszültség  $U_{SB}$  függésének erősségét a  $K_B$  bulk állandó jellemzi:

$$K_B = \frac{\sqrt{2e_s q N_a}}{C_{ox}} \quad (6.4)$$

A (6.3) összefüggést mutatja a 6.4 ábra.

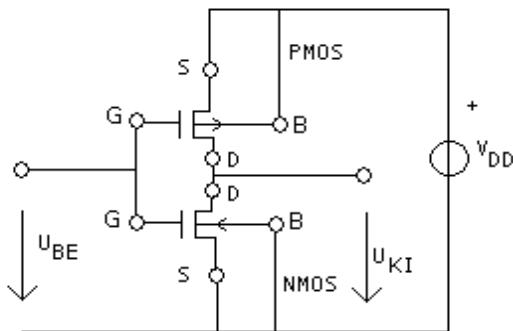


6.4. ábra. A küszöbfeszültség függése a bulk előfeszítésétől.  $V_{T0}$  a 0 voltos  $U_{SB}$  feszültség esetén mérhető küszöbfeszültséget jelenti.

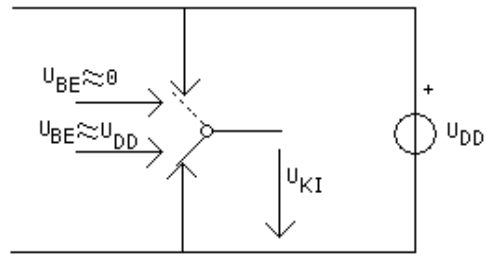
Vigyázat! A gate nincs közvetlen kapcsolatban a csatornával, közöttük van a szigetelő oxid, ezért a gate árama elhanyagolhatóan kicsi. Ezzel szemben a p típusúra adalékolt tömb (bulk) és a csatorna kapcsolatát egy olyan pn átmenetnek tekinthetjük, ahol az n oldal a csatorna. Ebből következik, hogy a tömb potenciálja a csatornáéhoz képest nem lehet pozitív (legfeljebb csak néhány tized V), különben kinyit a tömb-csatorna (és a tömb-forrás) átmenet, ami megzavarja a normál működést. A 6.4. ábrán szaggatottal jelölt tartomány tehát teljes egészében nem mérhető ki.

#### A CMOS inverter

A CMOS logikai áramkörök alapáramköre az 6.5. ábrán látható CMOS inverter. A 6.6. ábra a CMOS inverter legegyszerűbb helyettesítő képét mutatja. Az ábra szerint a CMOS invertert egy olyan Morse-kapcsolóval helyettesíthetjük, amely az inverter kimeneti pontját 0V-ra, vagy  $U_{DD}$ -re kapcsolja, a bemenetre adott jel logikai szintjének megfelelően. Az is látható, hogy statikus körülmények esetén, (azaz, ha  $U_{BE}=0V$ , vagy  $U_{DD}$ ), a CMOS inverter keresztirányú árama elhanyagolhatóan kicsiny, hiszen statikus körülmények esetén az NMOS, vagy a PMOS tranzisztorok közül az egyik biztosan zárt állapotban van.

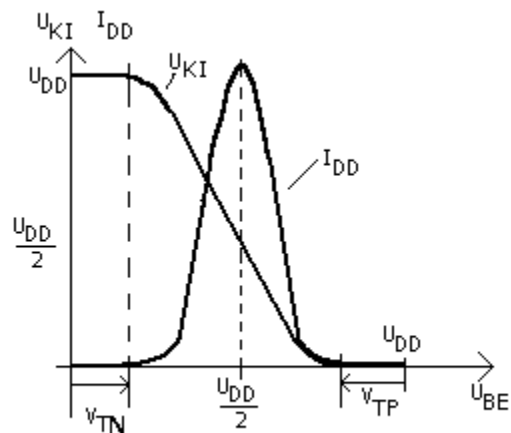


6.5. ábra. CMOS inverter



6.6. ábra. CMOS inverter helyettesítőképe

A 6.7. ábra a CMOS inverter transzfer karakterisztikáját mutatja, valamint a tápáramfelvétel ( $I_{DD}$ ) és a bemeneti feszültség közötti kapcsolatot. Látható, hogy ideális körülmények esetén (azaz, ha optimális technológiai feltételek mellett az NMOS és PMOS tranzisztorok karakterisztikája a feszültségek és áramok előjelétől eltekintve közel megegyezik, és az inverter terheletlen) az átkapcsolási transziensek során fellépő tápáramfelvétel maximuma  $U_{BE} = \frac{1}{2}U_{DD}$ -nél jelentkezik. Azonos abszolút értékű küszöbfeszültségek esetén ehhez az elektron-, és lyukmozgékonyságok arányának megfelelően az NMOS-hoz képest szélesebb csatornájú PMOS tranzisztorok szükségesek.



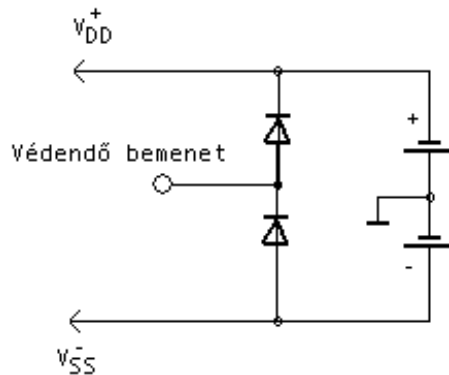
6.7. ábra. CMOS inverter transzfer karakterisztikája és tápáram felvétele

### A MOS eszközök védelme

A MOS eszközök statikus karakterisztikáinak felvétele elvileg a bipoláris eszközökhöz hasonló módon történik, azonban a mérési elrendezés kialakításánál és a mérés elvégzésénél jóval körültekintőbben kell eljárni. A fő problémát a MOS eszközök statikus töltésekkel szembeni érzékenysége okozza. Ennek oka, hogy a vezérlőelektródáról gyakorlatilag nem lehetséges a töltések eltávoztása a tömb felé.

A leggyakrabban használt megoldás szerint vagy az eszközbe (pl. IC-be, vagy diszkrét MOS tranzisztorba) beépített diódákkal, vagy a mérőáramkörbe beépített védődiódákkal biztosítjuk, hogy a belső potenciálok a tápfeszültség tartományban, azaz a  $V_{SS}$  és  $V_{DD}$  között maradjanak.

A mérőáramkörbe épített védődiódákkal a bemeneteket mindenképpen védeni kell, de fokozott védelmet érhetünk el, ha a mérendő IC minden lábát két-két védődiódával "megfoglaljuk" a 6.8 ábra szerint:



6.8 ábra A MOS eszközök statikus töltésekkel szembeni védelme

Természetesen, a mérési program kidolgozásakor ügyelni kell arra, hogy a védődiódák ne hogy kinyissanak.

#### Útmutató a felkészüléshez:

A gyakorlatra ismerni kell a MOS szerkezeteken különféle előfeszítések során kialakuló töltéseloszlásokat, a térerőket és a potenciálok (energia-sávdiagramokat), a CMOS technológia alapvető vonásait, az N és P csatornás MOS tranzisztorok működésének fizikai alapjait, az elektródákra adható előfeszítéseket, működési tartományokat.

Könyv, jegyzet:

Valkó-Tarnay-Székely: Elektronikus eszközök J5-1367,  
447-454.,461-500.o.

Dr.Mojzes Imre (szerk.), Mikroelektronika és elektronikai technológia, Műszaki Könyvkiadó,  
1995. 144-151.o.

Internet oldalak: <http://jas.eng.buffalo.edu/applets/index.html>,  
<http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/>

### A felkészülést ellenőrző kérdések:

1. Hasonlítsa össze a PN átmenetes FET és a MOS FET eszközöket!
2. A MOS kapacitás inverziós rétege a kisebbségi töltéshordozók élettartamánál több nagyságrenddel hosszabb idő (~1 sec) alatt épül fel. Miért lehetséges mégis a MOS tranzisztor bekapcsolása ns alatti időállandóval?
3. Rajzolja fel egy növekményes, n-csatornás MOS tranzisztor keresztmetszeti képét!
4. Rajzolja fel egy növekményes, p-csatornás MOS tranzisztor keresztmetszeti képét!
5. Rajzolja fel egy MOS tranzisztor transzfer karakterisztikáját!
6. Írja fel egy, a telítéssel tartományban működő növekményes, NMOS tranzisztor transzfer karakterisztikáját leíró egyenletet!
7. Hogyan függ egy MOS tranzisztor  $I_D$  árama a  $W/L$  viszonytól?
8. Rajzolja fel egy növekményes, NMOS tranzisztor kimeneti karakterisztikáját!
9. Ábrázolja a  $V_T$  küszöb feszültség és az  $U_{SB}$  feszültség kapcsolatát!
10. Egy NMOS tranzisztor esetében hogyan változik a  $V_T$  küszöb feszültség, ha a bulk potenciálja a source-hoz képest negatívabbá válik?
11. Rajzolja fel egy CMOS inverter
  - a.) keresztmetszetét vázlatosan,
  - b.) kapcsolási rajzát,
  - c.) transzfer karakterisztikáját
  - d.) tápáramfelvétel - bemeneti feszültség kapcsolatát!
12. Milyen (eszközfizikai és technológiai) okok eredményezhetik a CMOS inverter transzfer karakterisztikájának aszimmetriáját?
13. Elsősorban mivel szemben kell a MOS eszközöket védeni?  
Rajzoljon fel egy szokásos, védődiódákkal történő védelmet.

### Mérőeszközök:

Az Elektronikus Eszközök Tanszékén kifejlesztett, IBM PC-vel vezérelhető programozható mérésvezérlő állomás, amelynek részei:

-a PMU0 és PMU1 (Programable Measuring Unit) jelzésű mérő egységek, amelyek segítségével programból feszültséget, vagy áramot kényszeríthetünk a vizsgált kétpólusra, miközben mérjük (beolvassuk) az átfolyó áramot, vagy a megjelenő feszültséget,

-a DVM0 és DVM1 jelzésű, Digitális Voltmérőként használható két mérőegység, amelyek segítségével beolvashatjuk valamely kétpóluson megjelenő feszültséget.

A mérőállomás működtetésére szolgáló program ismertetője letölthető a [www.eet.bme.hu/publications/e\\_books/labor/pmu.pdf](http://www.eet.bme.hu/publications/e_books/labor/pmu.pdf) címről.

További műszerek:

HM 8040 tip. hármas tápegység

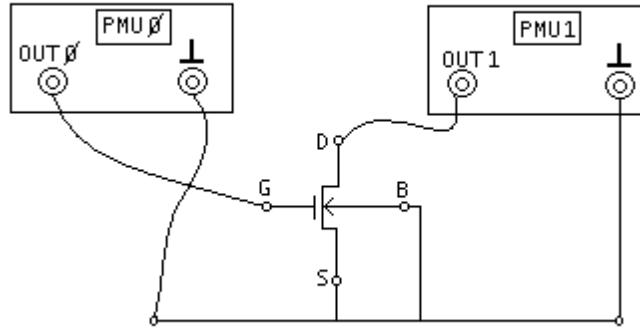
HM 8011-3 digitális multiméter

GANZUNIV-3 analóg kéziműszer

A méréseket MOS technológia ellenőrző (test) chipen végezzük.

Feladatok, az eredmények kiértékelése:

1. Küszöbfeszültség és áramkonstans meghatározása



6.9. ábra

Ábrázolja a kimeneti karakterisztikát és a transzfer karakterisztikát. Az utóbbit úgy is, hogy a függőleges tengelyen az áram négyzetgyökét ábrázolja!  
 Számítsa ki a küszöbfeszültség ( $V_T$ ) és az áramkonstans értékét!  
 Vizsgálja meg, hogy négyzetes jellegű-e a transzfer karakterisztika!

2. A  $w/L$  viszony hatásának vizsgálata.

A mérésvezető által kijelölt két különböző tranzisztoron határozza meg az áramkonstansok értékét, majd a két tranzisztor  $W/L$  viszonyainak arányát vesse össze a tranzisztorok fényképeiről leolvasható geometriai adatokkal!

3. Bulk állandó meghatározása

Az alábbi kapcsolásban vegye fel az NMOS tranzisztor  $V_T(U_{SB})$  karakterisztikáját  $U_{SB} = -0.5$  +0.5 V tartományban, valamint 1V, 4V és 9V esetében! A nyelőhöz csatlakozó áramgenerátor  $I_D=1\mu A$  áramot kényszerítsen.

Ábrázolja az így kapott  $V_T(U_{SB})$  függvénykapcsolatot, illesszen a mérési pontokra a 6.3. függvénykapcsolatnak megfelelő parabolát, majd az így kapott ábrából olvassa le a Fermi-potenciált ( $\Phi_F$ ) és számítsa ki a bulk-állandót! A bulk állandó a 6.4. ábra és a 6.3 összefüggés alapján ( $U_{SB} = 0$  esetre átrendezve) egyszerűen kiszámítható:

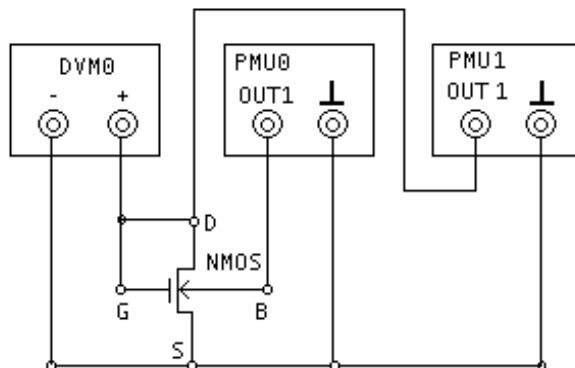
$$K_B = \frac{\sqrt{2e_s q N_a}}{C_{ox}} = \frac{V_{T0} - 2\Phi_F - \left( \Phi_{MS} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \right)}{\sqrt{2\Phi_F}} = \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x}} \quad (6.5)$$

Számítsa ki a tömb  $N_a$  adalékkoncentrációját! Ehhez a bulk állandó értéke és a felület egységre eső kapacitás ismerete szükséges, de egy gyors, bár kevésbé pontos becslés adható a Fermi potenciál alapján is:

$$\Phi_F = \frac{kT}{q} = \ln \frac{N}{n_i} \quad (6.6)$$



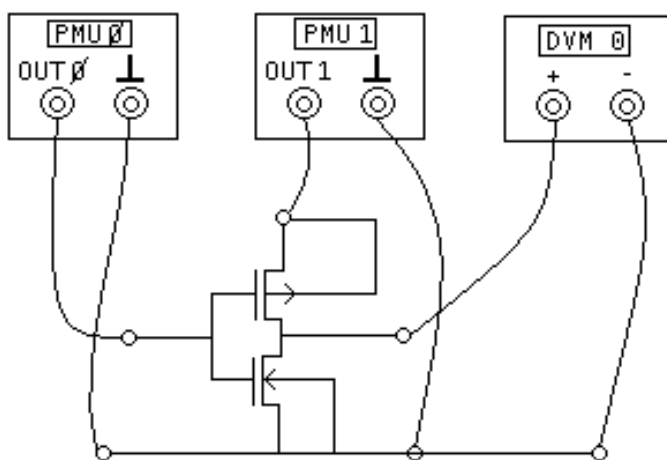
(Az intrinsic koncentrációhoz képest minden nagyságrend adalékolás növekedés 60 mV növekedést okoz  $\Phi_F$  értékében.)



6.10. ábra. Kapcsolás a bulk hatás vizsgálatához

#### 4. CMOS inverter vizsgálata

Az alábbi mérési elrendezés mellett vegye fel és ábrázolja egy CMOS inverter ( $U_{KI}-U_{BE}$ ) transzfer karakterisztikáját ( $U_{SB} = 0V$  feltétel mellett), valamint a tápáram felvétel - bemeneti feszültség ( $I_{DD}-U_{BE}$ ) függvénykapcsolatokat.



6.11. ábra. Mérési elrendezés CMOS inverter vizsgálatához

Az ábrázolást közös lin-lin koordináta-rendszerben végezze!

A mérés alapján vizsgálja meg:

- milyen kapcsolatot található a tápáramfelvétel és a küszöbfeszültségek között,
- $U_{BE} = \frac{1}{2} U_{DD}$  esetén mennyi az  $U_{KI}$  értéke, azaz az NMOS és a PMOS tranzisztorok megvalósításának eltérő technológiai feltételei mellett mennyire sikerült szimmetrikus transzfer karakterisztikát elérni,
- a mért ( $I_{DD} - U_{BE}$ ) függvénykapcsolat alapján mennyire különböznek a NMOS és a PMOS tranzisztorok küszöbfeszültségeinek abszolút értékei.