

1

Kirchoff törvények:

- Egy csomópontba befolyó áramok előjeles összege 0.
- Tetszőleges zárt hurokban a feszültségek összege 0.

Szuperpozíció elve:

- Lineáris hálózatok: amiben minden elem $I(U)$ karakterisztikáját lineáris egyenlet, vagy lin. diff. egyenlet írja le.
- A különböző gerjesztésekre adott együttes válasz meghatározható az egyes gerjesztésekre adott válaszok összegeként.
- Alkalmazásnál az ideális áramgenerátort szakadással, a feszültséggenerátort rövidzárral kell helyettesíteni.

Bode diagramm:

- Az átvitel abszolút értékét és a fáziseltolást szokás a frekvencia függvényében logaritmikusan ábrázolni, ez a BODE diagramm.
- Határfrekvencia: Az a pont, ahol az erősítés névleges erősítésnél 3dB-el kevesebb.
- Transzitifrekvencia: Az a frekvencia, ahol az erősítés abszolút értéke 1-re csökken.
- Sávszélesség: két határfrekvencia közötti frekvencia tartomány

Erősítők:

- Az erősítő aktív eszköz, teljesítményt erősít.
- Az erősítés: $A=U_{ki}/U_{be}$
- Ideális erősítőben: bemeneti ellenállás végtelen, kimeneti ellenállás 0.
- Az erősítés frekvenciafüggő.

Elektronok és lyukak:

- Elektronok: betöltött energiaállapotok a vezetési sáv alján. Negatív töltés, pozitív tömeg.
- Lyukak: be nem töltött energiaállapotok a vegyértéksáv tetején. Pozitív töltés, pozitív tömeg.
- Tiltott sáv szélessége: szigetelő>félvezető>fém (fémekben nincs tiltott sáv)

Intrinsic félvezető:

- elektron koncentráció (n_i) = lyuk koncentráció (p_i)

n típusú félvezető:

- Donor koncentráció (N_d^+) \approx elektron koncentráció (n_n)
- Elektron koncentráció nagyobb, mint a lyukkonzentráció
- Többségi töltéshordozók az elektronok, kisebbségi töltéshordozók a lyukak.
- W_d („donor sáv”) a vezetési sáv alatt helyezkedik el.

p típusú félvezető:

- Akceptor koncentráció (N_a^-) \approx lyukkonzentráció (n_p)
- Többségi töltéshordozók a lyukak, kisebbségi töltéshordozók az elektronok.
- W_a („akceptor sáv”) a vegyérték sáv felett helyezkedik el.

Dinamikus egyensúlyi állapot:

- Minden folyamat egyensúlyban van az inverzével: generáció a rekombinációval.
- Generációs ráta: időegység alatt, térfogategységben generálódó töltéshozó párok száma.
- Rekombinációs ráta: időegység alatt, térfogategységben rekombinálódó töltéshozó párok száma.

Termikus egyensúlyi állapot:

- Az intrinsic töltéshordozó koncentráció (n_i) nagyságát a hőmérséklet határozza meg: $n_i^2=f(T)$
- Adott hőmérsékleten: $n \times p = n_i^2$

Fermi szintek:

- Az energiaszintek betöltöttségének nagyságát a Fermi-Dirac eloszlási függvény határozza meg.
- Egyensúlyi állapotban a Fermi szint állandó a rendszerben.

Drift áram:

- Töltéshordozóknak elektromos erőter hatására történő mozgása.
- Drift sebesség: töltéshordozóknak az erőter irányában történő elmozdulásának sebessége.

Diffúziós áram:

- A részecskéknek a térbeli koncentrációkülönbség (okai a sűrűség különbség és a hőmozgás) megszüntetésére irányuló mozgása.
- A töltéshordozók a nagyobb koncentrációjú helyről a kisebb fele haladnak.

Folytonossági egyenletek:

- Végtelenül kis térrészben a töltéshordozók mennyiségének időbeli változását írják le.
- Parciális differenciális egyenlet rendszer.
- Minden félvezető probléma megoldásához ezeket kell megoldani.
- Megoldáshoz ismerni kell a határértékeket ill. a kezdeti értéket.
- Állandósult állapotban közönséges differenciálegyenlet rendszerré egyszerűsödik.

Poisson egyenlet:

- A töltéshordozó eloszlás és a potenciál eloszlás kapcsolatát írja le.
- Másodrendű diff. egyenlet rendszer
- Ez határozza meg egy tetszőlegesen adalékolt félvezetőanyagban a potenciál eloszlást, azaz a határfeltételeket a folytonossági egyenletek megoldásához
- Megoldása közelítő módszerekkel a különböző esetekre

Helyfüggő adalékolás:

- Két pont közötti potenciál különbség csak a pontok belső töltéshordozó koncentrációjától függ, a köztük lévő távolságtól nem.
- Boltzmann tényező segítségével a félvezetőkben ismert feszültség hatására kialakuló töltéshordozó koncentráció különbség számolható termikus egyensúlyban, vagy ahhoz közel.

A pn átmenet – félvezető dióda:

- A pn átmenet olyan egykristályos félvezető tartomány, amelyben egymással érintkezik egy p és egy n típusú zóna. Az 1 db pn átmenetből álló eszköz a dióda.
- Metallurgiai átmenet: ahol az anyag úgy viselkedik mintha intrinsic lenne. $N_D = N_A$
- Pozitív feszültségekre (nyitófeszültség) a feszültségtől exponenciálisan függő áram
- Negatív feszültségekre (zárófeszültség) nagyon kicsi, feszültségfüggetlen áram

A pn átmenet statikus viszonyai:

- A többségi töltéshordozók az átmenet környezetében átdiffundálnak a túloldalra: kiürített vagy ún. tértöltésréteg jön létre.
- Egyensúly: többségi töltéshordozók diffúziós árama egyensúlyban van a kisebbségi töltéshordozók drift áramával.
- A kiürített réteg annál keskenyebb minél nagyobb az adalékkoncentráció a tartományban.
- A kiürített réteg főleg az átmenetnek főként a gyengébben adalékolt oldalára terjed ki.
- Csak a kiürített rétegben van tértöltés, a p és az n tartományok elektromosan semlegesek.

A pn átmenet karakterisztika egyenlete:

- $I = I_0 (\exp(U/U_T) - 1)$ – ideális dióda egyenlet.

- Az eltérés okai kis áramoknál a tértöltésrétegben kialakuló áramok, amit az ideális karakterisztika egyenlet számításánál nem vettünk figyelembe. Nagy áramoknál pedig a soros ellenállás ill. a letörés.

Valóságos dióda karakterisztika:

- Rekombinációs áram: nyitóirányban a tértöltésrétegben a töltéshordozó injekció hatására megnő a töltéshordozó koncentráció, ami megnöveli a rekombinációt, azaz a valóságban ez is áramnövekedésként jelentkezik.
- Zárófeszültségek esetén a tértöltésrétegben az egyensúlyinál kisebb koncentráció miatt megnő a generáció, ami többlet töltéshordozó áramot (ún. generációs áram) eredményez.
- Letörés: Egy adott kritikus zárófeszültségnél, az ún. VBR letörési feszültségnél a dióda záróárama hirtelen megnő és viszonylag nagy áramok folynak a diódán nagyon kis további feszültségemelkedéssel.

A dióda karakterisztika hőmérséklet függése:

- Nyitó feszültségek esetén: Az adott áramhoz tartozó nyitófeszültség 1°C hőmérséklet növekedés hatására mintegy 2mV értékkel csökken.
- Zárófeszültségek esetén: az adott feszültséghez tartozó záróáram fokenként $\approx 7\text{-}10\%$ -kal nő.

A dióda munkapontja:

- R és a tápfeszültség változása csak kisebb mértékű változást okoz a munkaponti mennyiségekben. Ezekre a változásokra a dióda karakterisztika lineárisnak tekinthető, és a munkapontban a munkapontbeli érintővel g_d ill. annak reciprokával az ún. r_d differenciális ellenállással helyettesíthető.

A dióda kapcsoló működése:

- Nyitóirányban: $U_{ki} = U_M$
- Záróirányban: $U_{ki} = U_{be}$
- A bemeneti és a kimeneti feszültség kapcsolata, az ún. transzfer karakterisztika

A dióda modelljei – nagyjelű modell:

- Az egyenáramú viselkedést, munkaponti jellemzőket modellezzik.
- általában nemlineárisak, de mindig tartalmaznak valami egyszerűsítést.
- Ezeket használják pl számítógépes szimulációhoz.
- Ha az idő ill. frekvenciafüggést is modellezzik, kapacitásokat is tartalmaznak, ezek is lehetnek lineárisak vagy nemlineárisak.

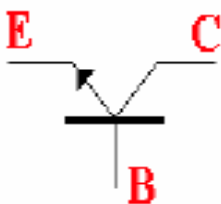
A dióda modelljei – kisjelű modell:

- Adott munkapontban a munkapont körüli kis megváltozások esetét írják le.
- Általában lineáris modellek, a munkapontban a karakterisztikákat érintővel helyettesítik.
- A kézi számítások megkönnyítését szolgálják elsősorban.
- Ha az idő ill. frekvenciafüggést is modellezzik, kapacitásokat is tartalmaznak.

Tranzisztorok:

- működés háttere bipoláris tranzisztornál: áram vezérelt áram forrás
- működés háttere térvezérelt tranzisztornál: feszültség vezérelt áram forrás

A bipoláris tranzisztor:



- Legalább az egyik szélső réteg (az emitter) nagyságrendekkel erősebben adalékolt, mint a középső.
- A középső réteg (bázis) sokkal vékonyabb, mint a kisebbségi hordozók diffúziós hosszúsága.

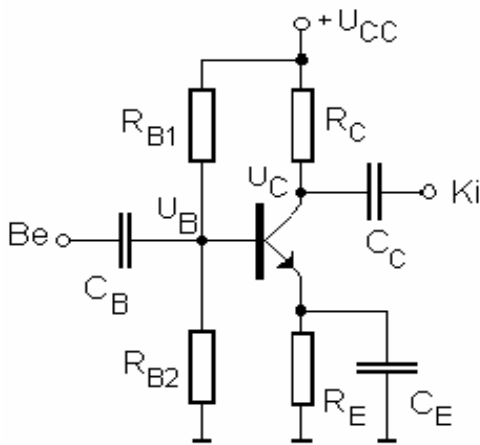
- Üzemállapotai:

| | EB átmenet | CB átmenet |
|--------------|------------|------------|
| normál-aktív | nyitott | zárt |
| inverz-aktív | zárt | nyitott |
| telítéses | nyitott | nyitott |
| lezárt | zárt | zárt |

Az Ebers-Moll modell:

- Teljesen szimmetrikus, a tranzisztor működését minden üzemiállapotban leírja.
- időfüggő vizsgálatokra is alkalmas
- minden üzemiállapot leírására alkalmas
- számítógépes szimulációhoz és kézi számításokhoz egyaránt alkalmas
- a bipoláris tranzisztor leggyakrabban használt modellje
- Annyira pontos, amennyire a benne használt pn átmenet modell

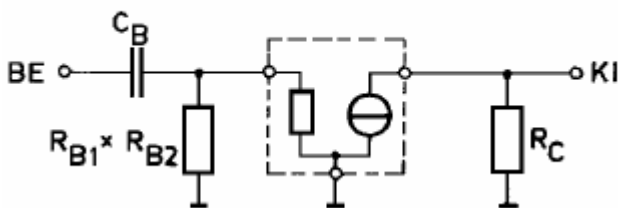
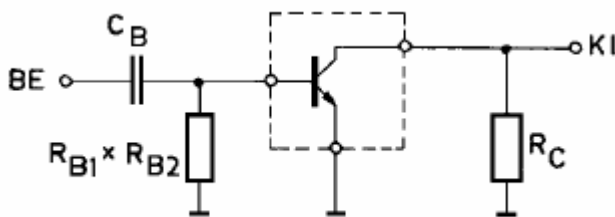
A BJT kisjelű helyettesítőképei:



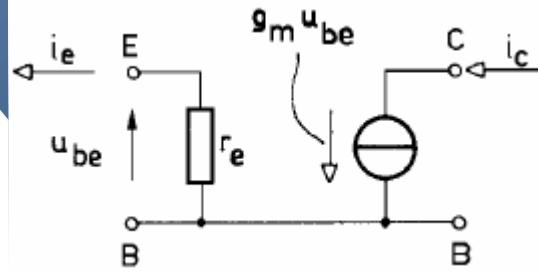
$$U_C = U_C \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$I_E \cong \frac{U_B - 0,7}{R_E}$$

$$U_C = U_{CC} - I_C \cdot R_C \cong U_{CC} - I_E \cdot R_C$$

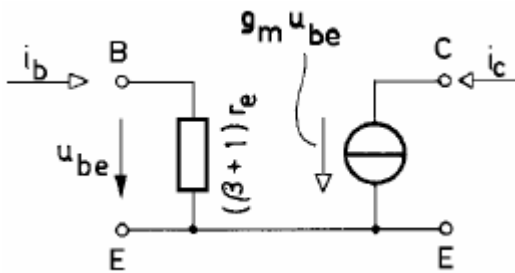


Földelt bázisos:



$$r_e = U_T / I_E$$

Földelt emitteres:

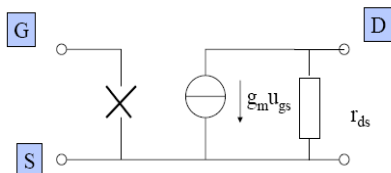


$$g_m = I_C / U_T$$

Térvezérelt tranzisztorok:

- Bemenő áramuk ≈ 0
- Kis teljesítményigény
- Kis helyigény
- a többségi töltéshordozók árama határozza meg a működést
- kisebb hőmérsékletfüggés
- Működésük alapja: feszültségvezérelt áramforrás

Kisjelű modell:



$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = \frac{2}{|V_P|} \sqrt{I_D I_{DSS}}$$

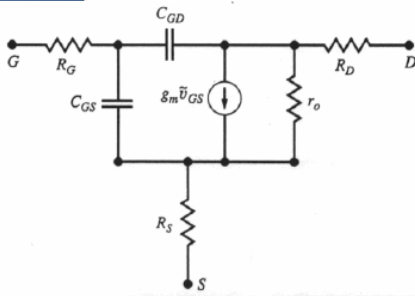
MOS tranzisztorok:

- Manapság a vezető technológia
- Küszöbfeszültséget befolyásolják:
 - ◆ az alkalmazott anyagok kilépési munkája
 - ◆ az oxid vastagsága, töltései, permittivitása
 - ◆ az Si adalékolása és permittivitása
- Növekményes MOS tranzisztor: ha $V_{GS} = 0$ esetén nincs áramvezető csatorna.
- Kiürítéses MOS tranzisztor: ha $V_{GS} = 0$ esetén van áramvezető csatorna.
- Transzer karakterisztika:

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{K}{2} (U_{GS} - V_T)^2$$

- Határfrekvenciája a gate méretének rövidülésével növekszik.

MOS tranzistorok kisjelű helyettesítőképe:



Integrált áramkörök:

- Ellenállás csökkentése: alumínium helyett réz alkalmazásával
- Kapacitás csökkentése: SiO₂ helyett más szigetelőanyag

VLSI áramkörök (11ea):

- Gyártási technológiájuk a planár (síkbeli) technológia.
- Adalékolási műveletek: diffúzió, ionimplantáció

Kapacitások MOS áramkörökben:

- Síkkondenzátor geometriájú
- A kapacitás gyakorlatilag feszültségfüggetlen

Vertikális pnp tranzisztor:

- Alatta nincs eltemetett réteg
- Kollektora mindig a negatív tápfeszültségre kapcsolódik

Ellenállások bipoláris áramkörökben – bázisdiffúziós ellenállás:

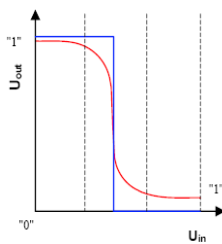
- közös szigeten lehet kialakítani, ezt pozitív tápfeszültségre kell kötni.
- nem pontosak a létrehozható ellenállások.
- a relatív pontosság, vagyis az azonosra tervezett ellenállások egyezése jó.
- Hőmérsékletfüggés: kb 0,1% / °C

Ellenállások bipoláris áramkörökben – megnyomott ellenállás:

- Nagy ellenállás értékek
- Pontatlanok, a letörési feszültség kicsi

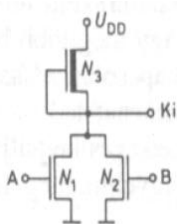
Inverterek:

- Transzfer karakterisztika:

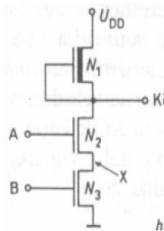


- A bemeneten lévő feszültségváltozások csak nagyon kis változást okoznak a kimeneten.
- Komparálási feszültség az $U_{in}=U_{out}$ és a karakterisztika metszéspontja

NOR kapu:



NAND kapu:



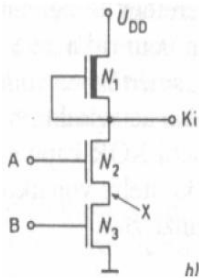
CMOS áramkörök:

- A logikai szintek „tiszták”: $U_H=U_{DD}$; $U_L=0V$
- A statikus áramfelvétel 0.
- Gyors működésűek
- Tápfeszültség érzéketlenek.
- Egy n és egy p típusú növekményes tranzisztorból állnak.
- Aktív terhelésű inverter, a 2 tranzisztort egyszerre vezéreljük
- Állandósult állapotban a két tranzisztor közül mindig csak az egyik vezet, a másik lezárt.

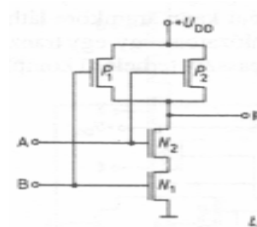
CMOS inverter:

- Kapcsolási ideje: csökkenthető a tápfeszültséggel vagy a W/L növelésével
- Statikus fogyasztás nincs, a kapu statikus állapotában áram nem folyik
- Dinamikus fogyasztás van. (egymásba vezetés + töltés-pumpálás)
- A töltéspumpálás teljesítmény igénye arányos a frekvenciával és a tápfeszültség négyzetével.
Vagyis $P_{cp}=f * CL * U_{DD}^2$
- Mindkét kaput vezéreljük

CMOS NOR kapu:



CMOS NAND kapu:



CMOS dominó logika:

- Előtöltést alkalmaznak.
- Csak dinamikus fogyasztás van.
- A digitális CMOS áramkörökben a leggyakrabban alkalmazott megoldás.

Aritmetikai elemek – Teljes összeadók:

- 3 bemenetük és 2 kimenetük van
- kaszkadosíthatóak
- Félösszeadóknál csak 2 bemenet van

Félvezető memóriák:

- RAM-nál az adat a tápfeszültség elvételekor elveszik
- RAM-ok sebességének növekedése nem tud lépést tartani a processzorokéval
- DRAM azonos felületen 4x sűrűbb mint az SRAM
- ROM: maszkprogramozott, gyártáskor kerül bele az információ

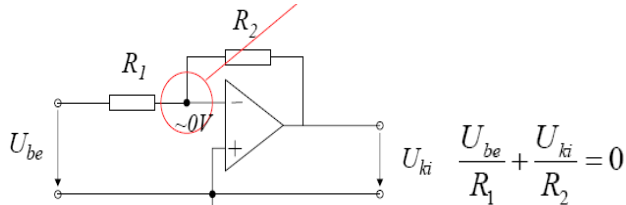
| Típus | Technika | Programozás | Törlés | Adat tárolás |
|-----------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| PROM | Bipoláris, CMOS | elektronikus, egyszer | - | |
| EPROM | CMOS | elektronikus | UV fénnel | FAMOS tranzisztor |
| OTP EPROM | CMOS | elektronikus, egyszer | - | |
| EEPROM | CMOS | elektronikus | elektronikusan, byte- onként | lebegő gate-s MOS tranzisztor |
| Flash EEPROM | CMOS | elektronikus | elektronikusan, egyszerre | lebegő gate-s MOS tranzisztor |

- Flash EEPROM sűrűsége összemérhető az EPROM sűrűségével

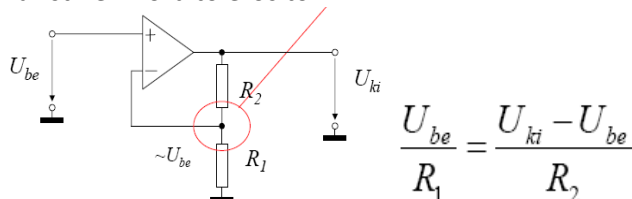
Műveleti erősítők:

- bemeneti ellenállás végtelen
- kimeneti ellenállás 0.
- bemenő árama 0.
- a két bemenet azonos potenciálon van

Fázisfordító erősítő:



Fázist nem fordító erősítő:



Integrált áramkörök tervezése:

- Az új IC gyártásához valamennyi maszkot meg kell tervezni és le kell gyártani
- ASIC áramkörök: részben előre gyártottak, részben előre tervezettek
- Custom ASICs: az összes maszk megtervezése és gyártása
- Semi-Custom ASICs: részben vagy teljesen előre gyártottak
- végleges kialakítás teljes egészében software-es úton történik
- vagy struktúráltak mint a custom áramkörök, de a maszk minták nagy része előre tervezett
- Gate array: fémezés réteg kivételével előre gyártottak.
- Standard cellás: a maszk minták cellák formájában előre meg vannak tervezve
- PLD: teljes egészében előre gyártottak, logikai funkciót az összekötések programozásával valósítjuk meg. PLA elrendezésűek.
- FPGA: gyorsan elkészíthető, kipróbálható hardware. Ma már intelligens tervező programok léteznek. Olcsóak. Sokszor újraprogramozhatóak.

Integrált áramkörök tesztelése:

- Scan design: olyan többletáramköri részeket építenek be az áramkörbe, amik a tesztelhetőséget segítik. Az áramkör 25-35%-a is lehet test overhead.
- Built in self test: beépített önteszt
- On-line self test: működés közben is állandóan működő önteszt
- Boundary Scan: A board tesztelést szolgálja. Minden I/O cella mellé BS cella. TestDataIn, TestDataOut, TestModeSelect, TClock, TestReSeT.

CRT monitor:

- a katódsugárcsőben vákuumban mozgó elektronok jelenítik meg a kívánt képet.
- pozicionálás: sztatikus vagy mágneses eltérítés (szöge 90..135 fok)
- Színes képcsövek: 3 elektronágyú, különböző színű képpontok elrendezése: delta (monitorok) vagy inline (TV-k)
- Képernyőt soronként pásztázza, képpontok intenzitását vezérlik
- Két félképre bontva, egyszerre vagy csak páros, vagy csak páratlan sorokat

LCD monitor:

- kiejtés céljára üveglapokkal határolt, 10-20um vastagságú folyadékkristály réteget alkalmaznak.
- vezérlés (mint a CRT-nél) pásztázással

- minden képpont 1-1 tranzisztor (vékonyréteg tranzisztorok: TFT), kapcsoló: kisüt vagy tölt
- Árnyaltos kép is kialakítható
- Képpont bekapcsolási idő közel azonos a képfrissítési idővel

Plazma Kijelző:

- Minden képpont 1-1 gázkisülési cső, az egyes csövek mátrixba vannak rendezve, egymástól függetlenül ki-be kapcsolhatóak.