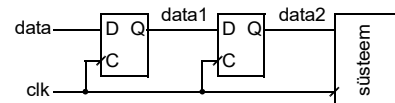
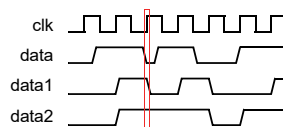
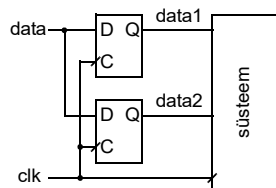
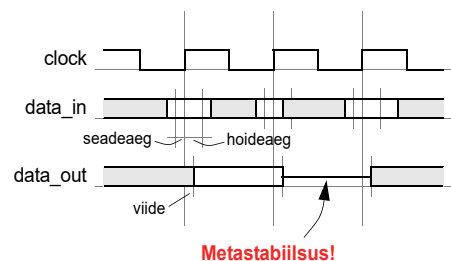


## Asünkroonsed süsteemid

- **Taktsignaali – sünkroonne digitaalsüsteem**
  - lihtne projekteerida, probleemid suurte süsteemide korral (signaali levimise aeg!)
- **Asünkroonne andmevahetus**
  - andmevahetus moodulite vahel, mis kasutavad erinevaid taktsignaale
    - signaal peab olema stabiilne takti muutumisel (setup & hold)
  - andmevahetus süsteemis, kus signaali levimise aeg on võrreldav taktsignaali perioodiga
    - hajus-süsteemid
    - süsteem kiibil (SoC)
    - kõikjal sama probleem – signaali stabiilsuse tagamine
  - andmevahetus asünkroonsete (self-timed) moodulite vahel
    - asünkroonsed automaadid
- **Asünkroonseid süsteeme tuleks kasutada seal, kus on neist kasu!**

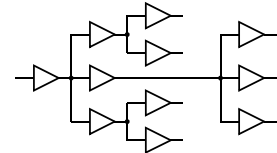
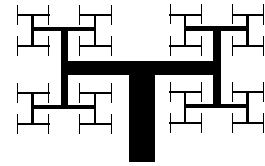
## Asünkroonsed sisendid

- **Signaalid moodulite vahel, mille taktsignaali võivad oluliselt erineda**
  - erinevate sagedustega taktsignaali
  - üksteisest kaugel asuvad moodulid
  - füüsikalised efektid – nt. värelemine
- **Vajalik on sisendite täiendav puhverdamine**
  - vähendab metastabiilsuse levimise tõenäosust



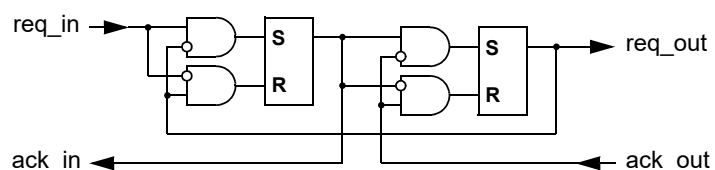
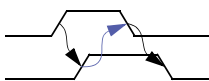
## Sünkroonne või asünkroonne nullimine?

- **Sünkroonne nullimine**
  - kõikidel mäluelementidel samal ajal
    - taktsignaali aktiivne front viiakse kõikide mäluelementideni (enamvähem) samal ajal
  - **takti olemasolu on vajalik**
    - taktsignaal ei pruugi alguses olemas olla
- **Asünkroonne nullimine**
  - **takti olemasolu ei ole vajalik**
    - mõjub mäluelemendile kindlasti
  - **nullimis-signaal võib eri mäluelementidel lõppeda erineval ajal**
    - signaali levimine võib olla erinev – vaadeldakse tavalise signaalina, kus sama-aegsus pole kriitiline
- **Kombineeritud lähenemine – algus asünkroonne, lõpp sünkroonne**



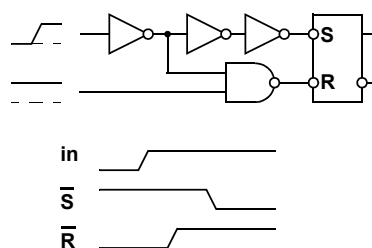
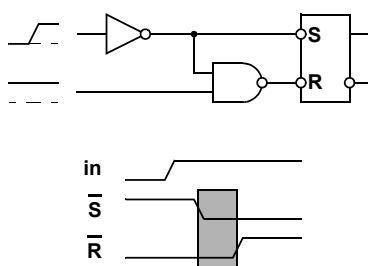
## Asünkroonsed automaadid

- Taktsignaal puudub
- Muutus sisendil on sündmuseks → isetakteeruv
- Signaalide võistlus (signal race) – kriitilise tee analüüs väga oluline
  - sündmus saabub eri teid pidi – võib näida kahe või enama sündmusena
- Asünkroonne andmevahetus
- Ilesünkroniseerivad süsteemid



## Asünkroonsed automaadid

- Automaadi tabel (GSA, olekudiagramm) aluseks
- Olekute kodeerimine
  - nn. naaberkoodid – erinevus ühes järgus
  - vähendab signaalide võistluse ohtu siirdel



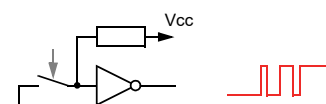
## Digitaalskeem – seos füüsilise maailmaga

- Sisendid, väljundid jms.
  - vt. nt. John F. Wakerly, "Digital design: principles and practices." Pearson/Prentice Hall

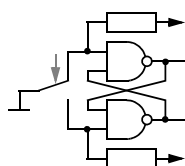
### Sisendid

#### 1) lülitid

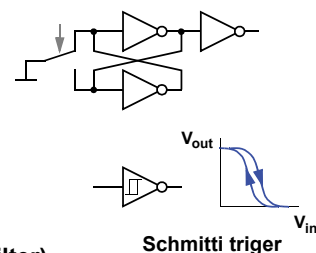
põhiprobleemiks kontaktide värelemine



võimalikud lahendused



... ja loomulikult ka RC-ahel (madalpääsfilter)

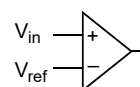


Schmitti triger

#### 2) ADC – analoog-digitaal muundurid

pinge -> kood  
vool -> kood  
sagedus -> kood  
jne.

põhi-elementideks komparaator  
võrreldakse erinevust sisend-  
ja tugipinge vahel  
paralleelne – n bitti ->  $2^n$  komparaatorit  
järjestikuline ~ FSM, DAC + komparaator

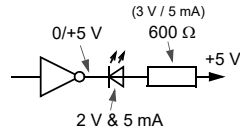


## Seos füüsilise maailmaga

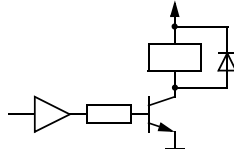
- Sisendid, väljundid jms.

### Väljundid

#### 1) indikaatorid (nt. LED)

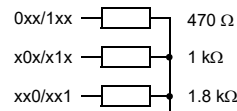


#### 2) täiturid (nt. rele)



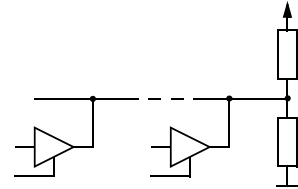
#### 3) DAC – digitaal-analoog muundurid

nt. XSA-3S1000  
[www.xess.com](http://www.xess.com)

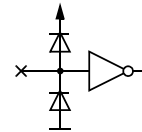


### Siinid

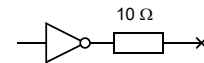
#### sobitus



#### kaitsedioodid



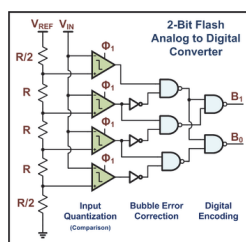
#### lühisekaitse



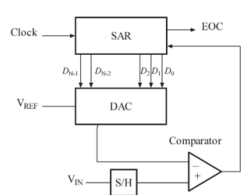
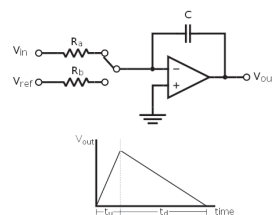
## ADC / DAC

- Analog-to-Digital-Converter / Digital-to-Analog-Converter

### ADC

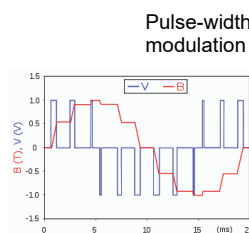


#### Integrating ADC

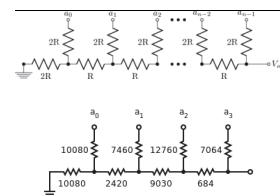


[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

#### Successive approximation ADC



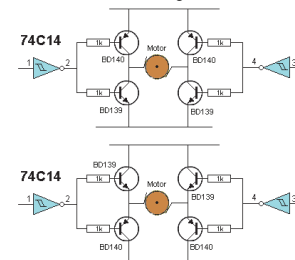
### DAC



#### Resistor ladders

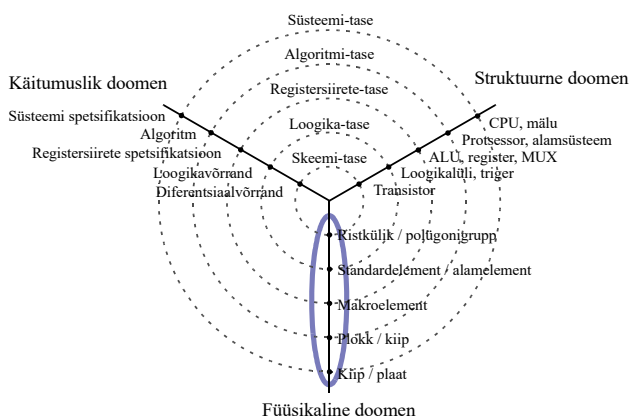
#### H-sild / H-bridge

[www.talkingelectronics.com](http://www.talkingelectronics.com)

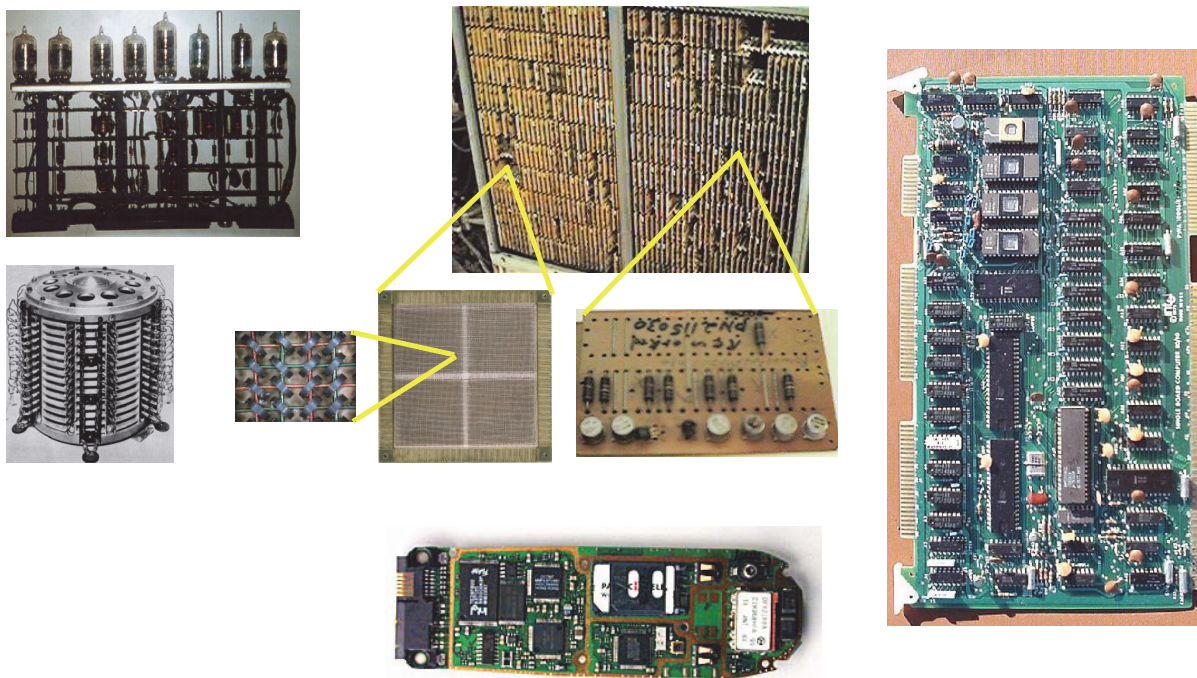


## Disaini põhietapid

- **Süsteemi disain - System design**  
*a.k.a. Arhitektuuri süntees - Architectural-level synthesis*
  - kirjeldus / spetsifikatsioon → plokk-skeem
  - makroskoopilise struktuuri määramine *ehk* kuidas on peamised ühendusplokid omavahel ühendatud
- **Loogikadisain - Logic Design**
  - plokk-skeem → loogikalülid
  - mikroskoopilise struktuuri määramine *ehk* kuidas on loogikalülid omavahel ühendatud
- **Füüsiline disain - Physical design**  
*a.k.a. Geomeetria süntees - Geometrical-level synthesis*
  - loogikalülid → transistorid, ühendusjuhtmed, mikroskeem

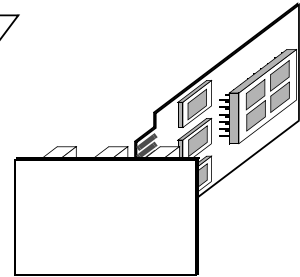
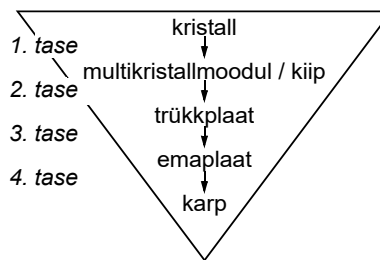


## Füüsiline realiseerimine – ajalugu ja tänapäev



## Pakendamine

- Pakendamise hierarhia
- Lahendatavad ülesanded
  - elektrilised
  - mehhaanilised
  - termilised

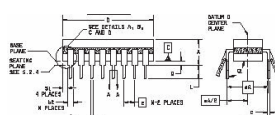


## Kiipide/korpuste tüübid

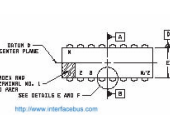
- Aukmonteeritavad (läbi trükkplaadi)
  - DIP: Dual In-line Package; PGA: Pin Grid Array
  - C-DIP, Cerdip, CPGA, TBD, HDIP, PDIP, PPGA, Shrink DIP, SIP
- Pindmonteeritavad
  - PLCC: Plastic Leaded Chip Carrier; SOIC: Small Outline IC; BGA: Ball Grid Array
  - BQFP, CBGA, CFP, CPGA, CQFP, TBD, DLCC, FBGA, fpBGA, JLCC, LCC, LCCC, LFBGA, LGA, MLCC, PBGA, PQFD, PQFP, PSOP, QFP, QSOP, SOJ, SSOP, TQFP, TSOP, TSSOP, TVSOP, VQFB
- [http://www.interfacebus.com/Design\\_Pack\\_types.html](http://www.interfacebus.com/Design_Pack_types.html)

## Kiipide, korpuste ja pakendamise näiteid

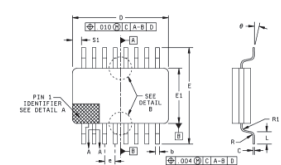
DIP



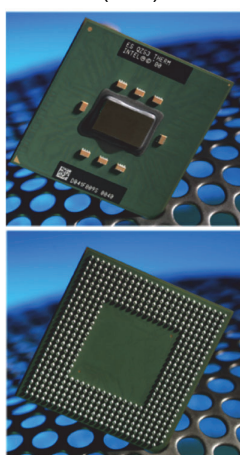
PLCC



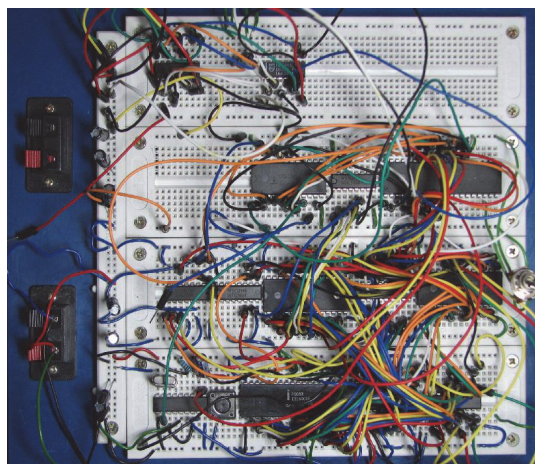
SOIC



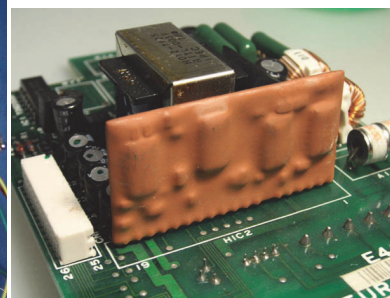
FCBGA (Intel)



prototüüpimine



ruumiline montaaž



hübriidmikroskeem

## VLSI füüsiline disain

- Loogika tase**

- loogikaelemendid / loogikaavaldised
- ahelad / bitid

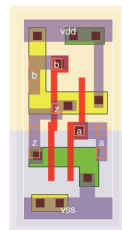
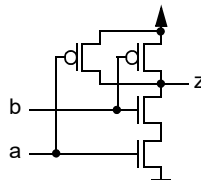
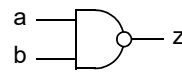
- Füüsika tase**

- transistorid / traadid

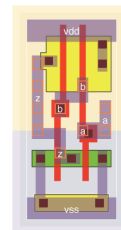
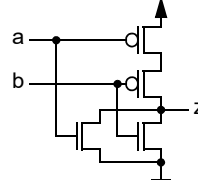
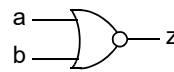
- polügonid

vt. ka <http://www.vlsitechnology.org/>

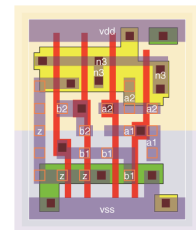
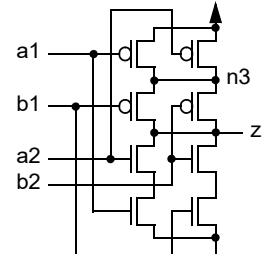
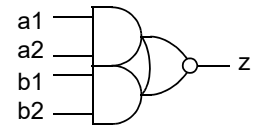
2-NAND



2-NOR



2-2-AND-NOR

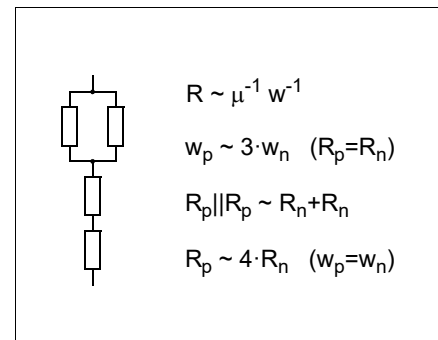
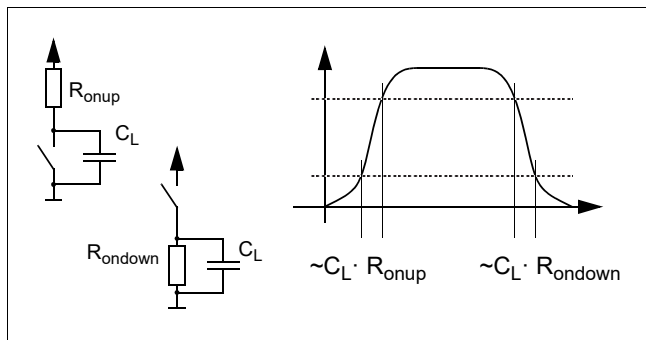
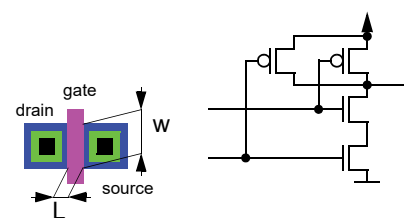


## CMOS - miks NAND?

- Materjalide omadused – mobiilsus –**

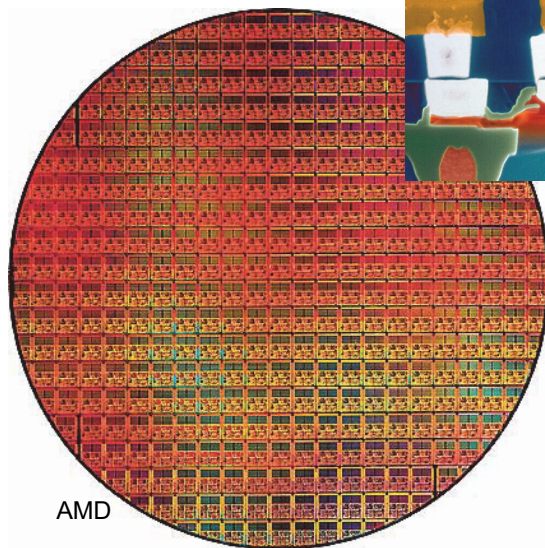
$$\mu_n = 1250 \text{ cm}^2 / \text{V sec} \quad \& \quad \mu_p = 480 \text{ cm}^2 / \text{V sec}$$

- $R \sim \mu^{-1}$  &  $R \sim L w^{-1}$  (L - konstant)

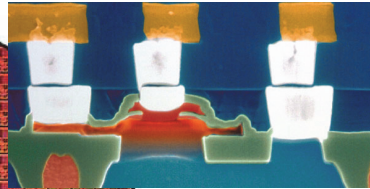


## Mikroskeemide valmistamine

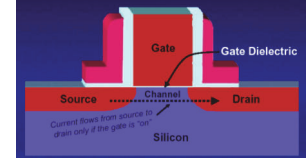
- maskid – ilmutamine
- söövitamine / lisamine
- pakendamine
- testimine



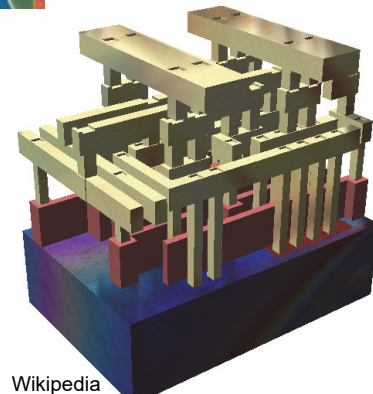
AMD



Brown University



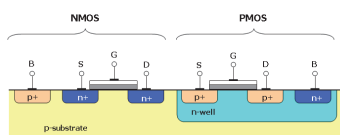
Robert Richmond, 2003



Wikipedia

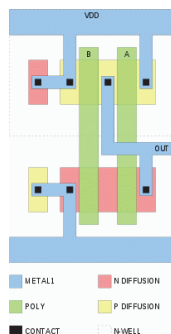
## Protsessi sammud (2D-transistorid)

### CMOS transistorid



n - elektronid [P, As, Sb]  
p - augud [B, Al]

### 2-NAND pinnalaotus



■ METALL ■ N DIFFUSION  
■ POLY ■ P DIFFUSION  
■ CONTACT ■ N-WELL

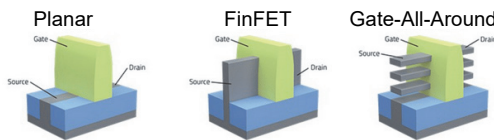
- Prepare wafer  
oxide  
substrate
- Apply photoresist  
PR  
oxide  
substrate
- Align photomask  
glass  
Cr  
PR  
oxide  
substrate
- Expose to UV light  
glass  
Cr  
PR  
oxide  
substrate
- Develop and remove photoresist exposed to UV light  
PR  
oxide  
substrate
- Etch exposed oxide  
PR  
oxide  
substrate
- Remove remaining photoresist  
oxide  
substrate

### söövitamise sammud

#### valmistamise sammud

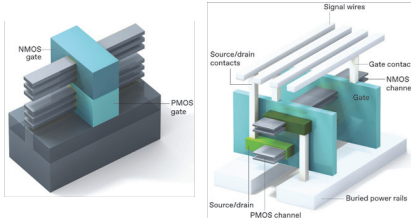
- Grow field oxide  
ox.  
p-type substrate
- Etch oxide for pMOSFET  
ox.  
p-type substrate
- Diffuse n-well  
ox.  
p-type substrate
- Etch oxide for nMOSFET  
ox.  
p-type substrate
- Grow gate oxide  
ox.  
p-type substrate
- Deposit polysilicon  
ox.  
p-type substrate
- Etch polysilicon and oxide  
ox.  
p-type substrate
- Implant sources and drains  
ox.  
p-type substrate
- Grow nitride  
ox.  
p-type substrate
- Etch nitride  
ox.  
p-type substrate
- Deposit metal  
ox.  
p-type substrate
- Etch metal  
ox.  
p-type substrate

## Alla-mikroni tehnoloogiad (3D-transistorid)



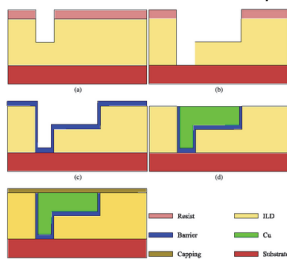
### Transistorid

<https://semiengineering.com/whats-after-finfets/>



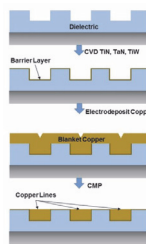
IEEE Spectrum 2022/12:  
The Transistor at 75:  
Taking Moore's Law to  
New Heights [pp.32-37]

### Dual-damascene fabrication process



### Traadid

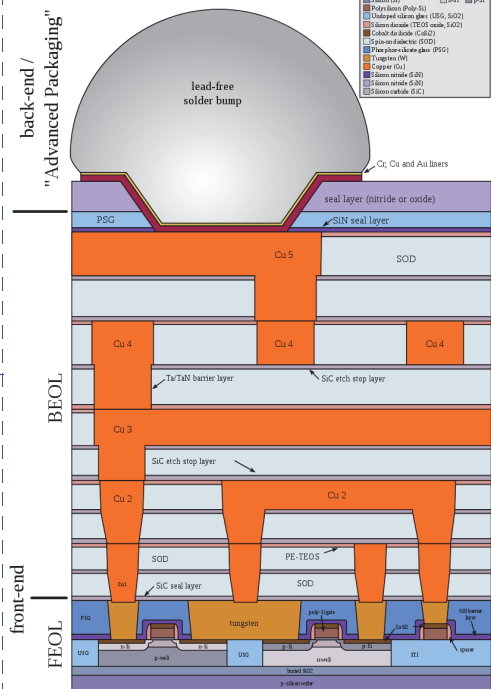
Chemical  
Mechanical  
Polishing in  
Damascene  
Process



<https://www.mks.com/n/chemical-mechanical-polishing>

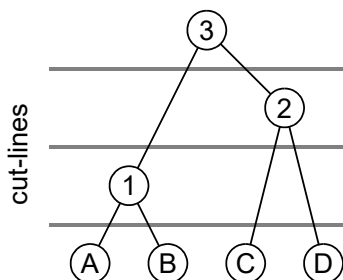
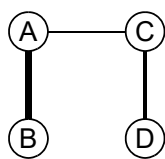
<https://picture.iczhiku.com/weixin/message1614096684818.html>

www.wikipedia.org

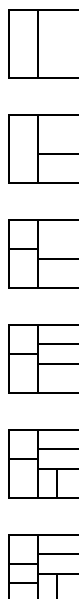


## Pinnalaotuse süntees

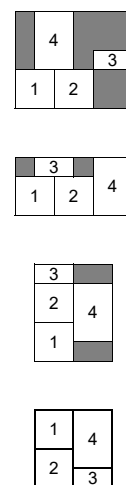
### • Tükeldamine



### • Pinnaplaneering



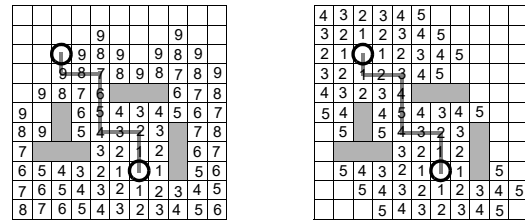
### • Paigaldamine



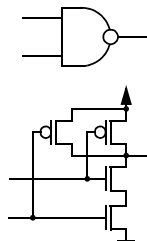
## Pinnalaotuse süntees

- **Ruutimine (trasseerimine)**
- **labürindi läbimine**
  - vajab palju mälu!
  - kahesuunaline otsimine
  - mitmekihiline ruutimine

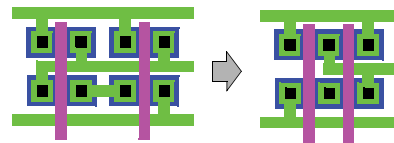
Ruutimine



- **Pinnalaotuse optimeerimine**
- **Pinnalaotuse kontroll**
  - DRC (Design Rule Check)

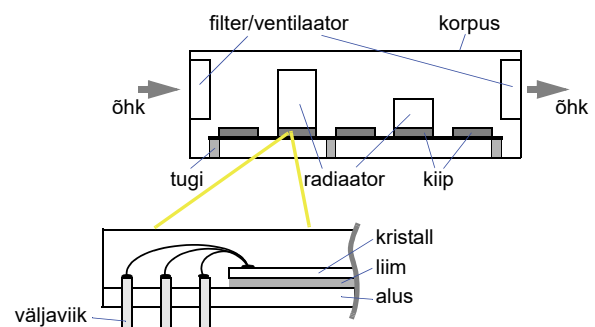
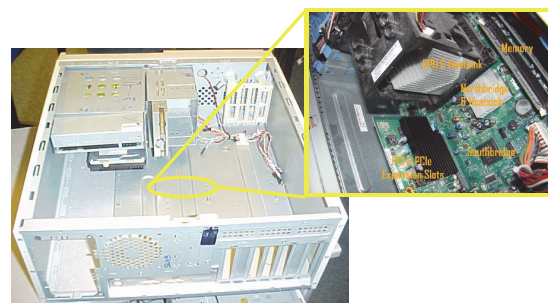


Optimeerimine



## Pakendamine - korpused

- **Füüsilised nõuded ja piirangud**
  - mõõtmed, liidesed
  - vastupidavus - tolm, vibratsioon
- **Termilised nõuded ja piirangud**
  - töötemperatuuri vahemik
  - jahutamine / küte
- **Elektrilised nõuded ja piirangud**
  - elektritoide
  - kaitse - liigpinge, elektromagnetväljad
- **Ergonoomilised nõuded ja piirangud**
  - väljanägemine, kasutajaliides, müra

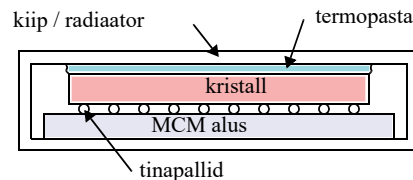
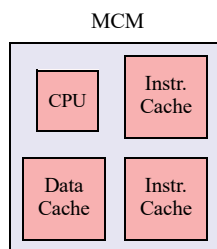


## Termilised probleemid

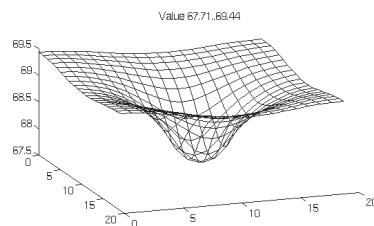
### Jahutamine

#### Näidisdisain (MCM)

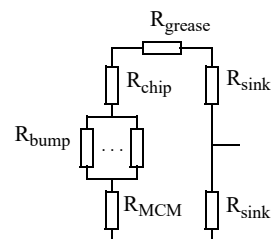
- CPU - 68 mm<sup>2</sup>, cache - 112 mm<sup>2</sup>
- koguvõimsus - 72 W
- soojuse eemaldamine
  - kristall (GaAs): 46 W/mK
  - väljaviigud (tinapallid):  
d 0.1 mm, samm 0.25 mm, 36 W/mK (CPU 361 & cache 441)
  - termopasta:  
paksus 0.2 mm, 1.1 W/mK
  - MCM alus (alumina):  
27x27 mm, 20 W/mK
  - kiip/radiaator (Al): 238 W/mK



Temperatuuri jaotus väljaviigu ümbruses



Soojusvoo mudel

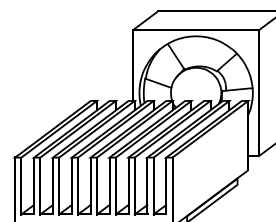
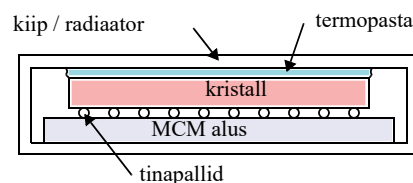


## Termilised probleemid

### Jahutamine (järg)

- temperatuuride vahed
  - väljaviik & MCM: 20-25 K
  - koos termopastaga: 15-16 K
- radiaator
  - vaba õhuvool: 5 W/m<sup>2</sup>K
  - sundjahutus (ventilaator): 50 W/m<sup>2</sup>K
  - kristalli temperatuur ≤ 80°C
  - radiaatori pindala [cm<sup>2</sup>]:

| Radiaatori temperatuur [°C] | Keskkonna temperatuur |      |             |      |
|-----------------------------|-----------------------|------|-------------|------|
|                             | vaba õhuvool          |      | sundjahutus |      |
|                             | 50°C                  | 30°C | 50°C        | 30°C |
| 64.0                        | 10286                 | 4237 | 1029        | 424  |

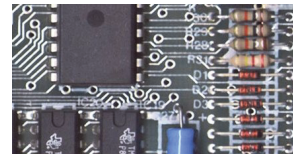


### Termiline paisumine

- kristall (GaAs): 6.8·10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> (paisub kuni 1.4 μm); MCM alus (alumina): 7.7·10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>

## Trükkplaadid

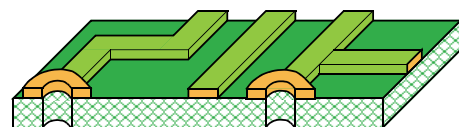
- **PCB (Printed Circuit Board)**
- **Valmistamine ja projekteerimine**
  - töökindlus, maksumus, jõudlus...
  - **Komponendid**
    - mikroskeemid, transistorid, takistid, kondensaatorid jne.
  - Ühendused
  - Liidesed
  - Kinnitused
- **Trükkplaadi valmistamine**
- **Komponentide paigaldamine (ja kinnitamine)**
- **Elektriliste ühenduste loomine (nt. jootmine)**



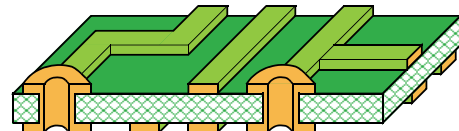
## Trükkplaatide valmistamine

- **Vasega (Cu) kaetud tekstoliit (klaasriie+epoksüvaik)**
- **Ühekihiline trükkplaat**
  - ühendusrajad (alumine pool)
- **Kahekihiline trükkplaat**
  - ühendusrajad
  - metalliseeritud läbiviigud
- **Mitmekihiline trükkplaat**
  - mitu kahekihilist plaati
  - läbiviikude asukohad!

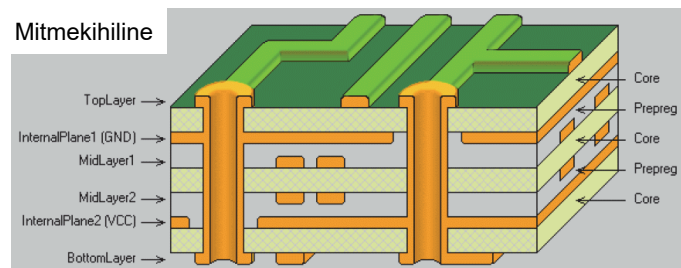
Ühekihiline



Kahekihiline



Mitmekihiline



## Trükkplaatide valmistamine

### Väikeseeriad / üksikeksemplarid

- Täielikult vasega kaetud plaat (1- või 2-kihiline)
- Läbiviikude puurimine (drilling)
- Läbiviikude galvaaniline metalliseerimine
- Ühendusradade loomine == liigse vase eemaldamine
  - liigse metalli söövitamine (etching)
    - 1) kaitsekihi peale kandmine (radade positiivkujutis)
      - a) kaitselaki / -värvi joonistamine / siiditrükk
      - b) printimine (fototundlik materjal, termokiled jne.)
    - 2) söövitamine ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  jne.)
  - liigse metalli välja freesimine (milling)
- Komponentide paigaldamine
  - vajaduse korral ka kinnitamine (nt. liimimine)
- Jootmine
  - mehhaniseeritud (tinalaine) või käsitsi

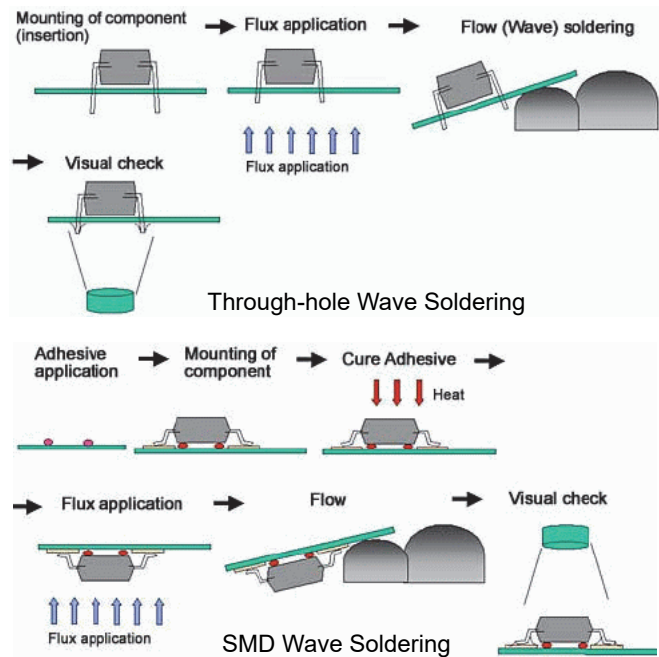
## Trükkplaatide valmistamine

### Suurseeriad

- Läbiviikude puurimine (metalliga katmata plaat)
- Ühendusradade loomine == vasekihi galvaaniline kasvatamine
  - keemiliselt kantakse peale õhuke vasekiht
  - radade asukohtade trükkimine (fotolitograafia)
  - galvaaniline radade kasvatamine vajaliku paksuseni (tagab ka läbiviikude metalliseerimise)
  - liigse vase eemaldamine (söövitamine)
- Kaitsekihi (-laki) ja jootevedeliku/-tinaga katmine
- Komponentide (mehhaniseeritud) paigaldamine
  - vajaduse korral ka kinnitamine (nt. liimimine)
- Jootmine
  - mehhaniseeritud

## Trükkplaatide valmistamine

- **Valmistamine**
  - komponentide kinnitamine
  - jootmine
    - jootevedelik / -tina
  - termilised probleemid
    - suured vasespinnad
    - komponentide ülekuumenemine
- **kvaliteedi kontroll**
  - visuaalne
- **lõppviimistlus**
  - puhastamine
  - kaitselakkimine
- **lõpptestimine**
  - funktsionaalsuse kontroll



## Trükkplaatide valmistamine

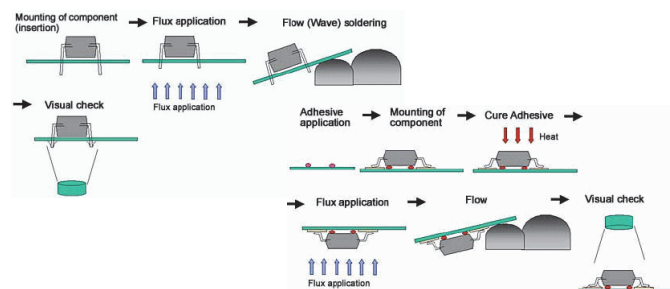
### Wave Soldering

Electro Soft Inc.

<https://www.youtube.com/watch?v=inHzaJIE7-4>

Agrowtek Inc.

<https://www.youtube.com/watch?v=VWH58QrprVc>



### SMD Reflow Soldering

GIGABYTE factory tour

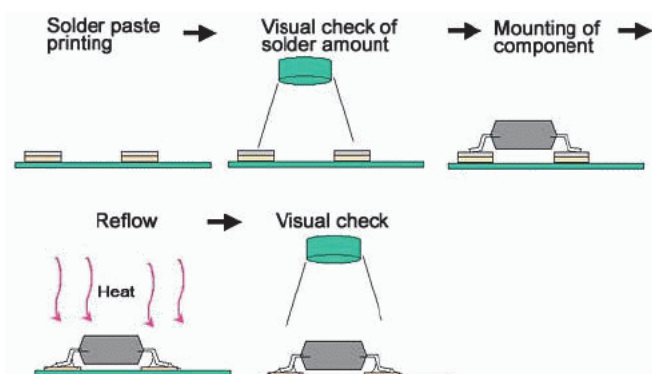
<https://www.youtube.com/watch?v=Va3Bfn4inA>

Tutorial

<https://www.youtube.com/watch?v=gu0v8lfLcKg>

SMD reflow at home

<https://www.youtube.com/watch?v=U48Nose31d4>



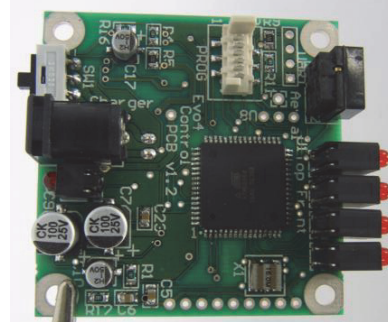
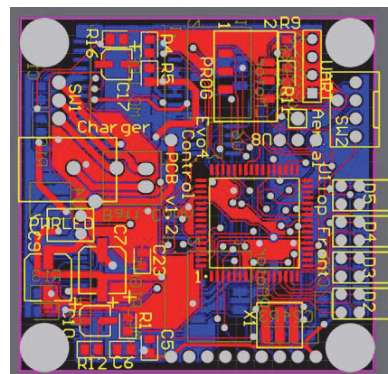
## Trükkplaatide valmistamine

### Praktilisi nõuandeid

- Mõõtühik on *mil* (1/1000 tolli, st. 0,0254 mm)
- Augud
  - mida väiksem auk, seda kallim plaat
  - väikseimad augud võiksid olla 0,5 mm või suurem
  - mida paksem plaat, seda suuremad augud – 2 mm plaat -> mitte alla 0,4 mm augud
- Ühendusrajad
  - liiga kitsad rajad ja radadevahed tekitavad probleeme
  - soovitatav laius 0,25 mm (10 mil)
- Polügonid (suured pinnad, nt. maakiht)
  - kasutatakse ekraaniks, jahutamiseks jne.
  - väikseim vahe polügoni ja radade vahel vähemalt 0,25 mm
- Jootemask
  - kõikide jootepiirkondade jaoks peaks olema jootemaskis (kaitselakk) vastav auk
- Markeering
  - ei tohi sattuda jootekohtadele, täpsus ~0,5 mm

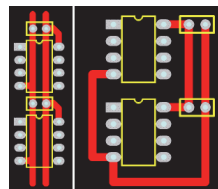
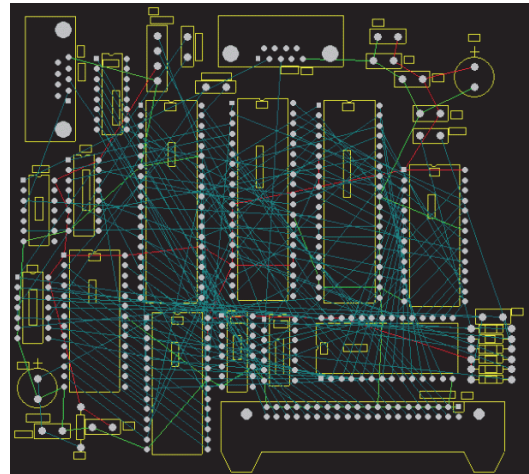
## Trükkplaatide projekteerimine

- Skeemist moodulini
  - Skeemi sisestamine
  - Komponentide paigaldamine
    - siinide asukohad
    - tugikomponendid
  - Ruutimine
    - harakapesa (rat-nest) asendamine traatidega
    - toiteühendused
  - Kontroll (DRC)
    - radade mõõtmed
    - radadevahelised kaugused
    - aukudevahelised kaugused
    - jne.

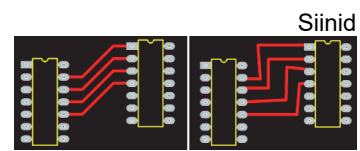


## Trükkplaatide projekteerimine

- **Projekteerimine**
- **PCB Design Tutorial**
  - David L. Jones
  - <http://www.alternatezone.com/>
- **Mõningaid soovitusi**
  - **Toite ühendamine**
    - filterkondensaatorid
  - **Siinide ühendamine**
  - **Mitmekihilised plaadid**
    - läbiviikude tüübid – läbi terve plaadi, (osaliselt) peidetud
    - läbiviikude asukohad – sünkroniseerimine
- **EAGLE**
  - Easily Applicable Graphical Layout Editor
  - CadSoft Online – <http://www.cadsoft.de/>



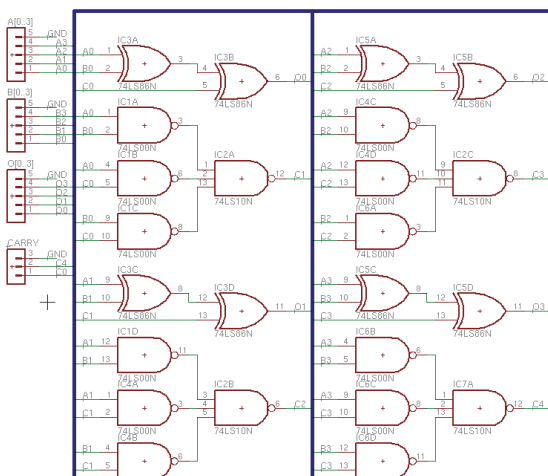
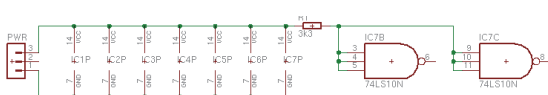
Toite



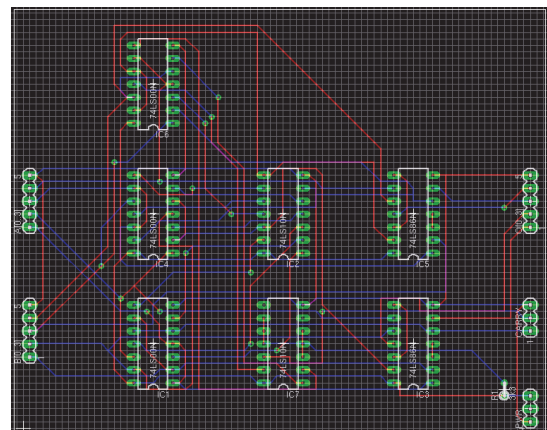
Siinid

## Näidisdisain – 4-bitine summaator

7 kiipi: 2x(4x2-XOR), 3x(4x2-NAND), 2x(3x3-NAND)



36 ahelat, 82 ühendust, 17 läbiviiku



36 ahelat, 82 ühendust, 64 läbiviiku

