

hyväksymispäivä arvosana

arvostelija

## **Transistoriteknologian kehitys**

Ilpo Järvinen

Helsinki 20. maaliskuuta 2003

HELSINGIN YLIOPISTO  
Tietojenkäsittelytieteen laitos

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Transistori digitaalisten piirien komponenttina</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Tyhjiöputkista transistoriksi</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Integroinnin alkutaival</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>MOSFET</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Teknologian vakiintuminen</b>	<b>9</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>10</b>

# 1 Johdanto

Digitaalisten piirien toteuttamiseksi tarvitaan komponentteja, jotka toimivat transistorin tapaan. Ensimmäisiä tällaisia komponentteja olivat tyhjiöputket 1900-luvun alussa. Yhdistelemällä tarpeeksi näitä yksinkertaisia peruskomponentteja voidaan rakentaa monimutkainenkin piiri. Periaatteessa kaikki nykyaikaisetkin mikropiirit perustuvat näihin yksinkertaisiin komponentteihin.

Puolijohdetransistori kehitettiin korvaamaan tyhjiöputkia niissä olleiden lukuisien ongelmien takia. Transistorien keksimisen jälkeen seurasi joukko kehityskäsitteitä, joista lähes kaikki sijoituvat 1950- ja 1960-luvuille. Kuitenkin keksintöjen laajamittaiseen käyttöönottoon kesti kauimmillaan jopa pari vuosikymmentä. Tärkeimpiä keksintöjä ovat olleet usean transistorin tai muun komponentin integrointi yhdelle puolijohdepalaselle ja CMOS-teknologiaan johtanut kehitys, jotka yhdessä loivat vankan pohjan nykyaikaisille integroiduille piireille.

Jo transistorin keksimisestä saakka, on transistorilla ollut tärkeä kaupallinen merkitys, koska se kehitettiin korvaamaan paljon käytettyjä tyhjiöputkia. Kuitenkin erityisesti integroitujen piirien keksimisen jälkeen ovat kaupalliset sovellusalueet kasvaneet räjähdysmäisesti.

Aluksi esittelemme luvussa 2 transistorin teknisen toiminnan perusteita keskittyen digitaalisten piirien kannalta olennaisimpaan transistorityyppiin. Sen jälkeen keskitymme tärkeimpiin teknisiin keksintöihin sekä katsomme hiukan niistä kehitettyjä sovelluksia luvuissa 3, 4 ja 5. Luvussa 6 käymme läpi käytetyn tekniikan vakiintumista.

## 2 Transistori digitaalisten piirien komponenttina

Transistori on digitaalisten piirien ydinkomponentti. Keskitymme tässä luvussa unipolaariseen transistoriin, koska se jänniteohjauksensa takia soveltuu paremmin digitaalisissa piireissä tarvittaen operaatioiden toteuttamiseen. Toinen transistorityyppi on bipolaarinen, jota ohjataan virralla. Myös tämän tyyppisiä transistoreja tulee vastaamme transistorin kehitystä läpikäydessä.

Unipolaarinen transistori voi olla joko päästötilassa tai estotilassa toimien ikäänkuin kytkimenä, joka on joko auki tai kiinni. Tilaa ohjataan yhden transistorin navan jännitteen avulla. Tilasta riippuu, miltä kahden muun transistorin navan välinen kytkentä näyttää muun piirin kannalta. Päästötilassa (ideaalinen transistori) kytkentä vastaa oikosulkua ja estotilassa avointa piiriä. Aina, kun piirissä on kahden pisteen välillä jännite-ero (potentiaaliero) ja niiden välillä on jokin suljettu yhteys, kulkee piirissä virtaa. Piirissä kulkevista virroista taas aiheutuu piirin tehonkulutus, joka näkyy piirin lämpenemisenä.

Transistorissa ohjaava syöte määrittelee ulostulon jännitteen suuruuden. Tämä ominaisuus saadaan aikaiseksi puolijohdeilmiön ansiosta, kun puolijohdeessa oleviin vapaisiin elektroneihin tai niiden vajauksiin vaikutetaan syötteen avulla. Sen seurauksena transistoriin muodostuu joko sähköä johtava tai eristävä alue. Puolijohdeominaisuuksia säädellään lisäämällä valmistusprosessissa itse puolijohdemateriaaliin muita alkuaineita. Tämä epäpuhtaus muodostaa luonnollisen elektronien vajauksen tai vapaita elektroneja aineeseen.

Muodostamalla useista transistoreista suurempia kytkentöjä voidaan toteuttaa loogisia veräjiä (NOT, AND, OR, XOR, jne). Veräjän bittien loogisia tasoja (0 ja 1) kuvataan kahdella erisuuruisella jännitteellä, joista toinen on yleensä 0V (0-taso) ja toinen yleensä piirin käyttöjännitteen suuruinen, tosin poikkeuksia voivat olla esimerkiksi I/O:hon kytketyt transistorit, joille on määritelty eri suuruinen jännitetaso.

### 3 Tyhjiöputkista transistoriksi

Jo 1880-luvulla Thomas Edison huomasi lamppua kehittäessään tyhjiön sähkönjohtavuusominaisuuden. Kesti kuitenkin vuoteen 1906 saakka, kunnes sitä opittiin hyödyntämään tyhjiöputkissa. Tyhjiöputkien keksiminen mahdollisti nykyisen kaltaisen digitaalisen piirin toteuttamisen, mutta käytännössä niiden tarjoamaa potentiaalia osattiin hyödyntää vain analogisen tekniikan sovelluksiin kuten puhelintekniikkaan, radioihin ja vahvistimiin. 1930-luvun vaihteessa alkoivat ensimmäiset kokeiluluontoiset digitaaliset sovellukset saada jalansijaa, mutta

vasta 1940-luvun puolen välin jälkeen (mm. ENIAC:in myötä) tyhjiöputkia alettiin käyttää tehokkaasti digitaalisten piirien toteuttamiseen.

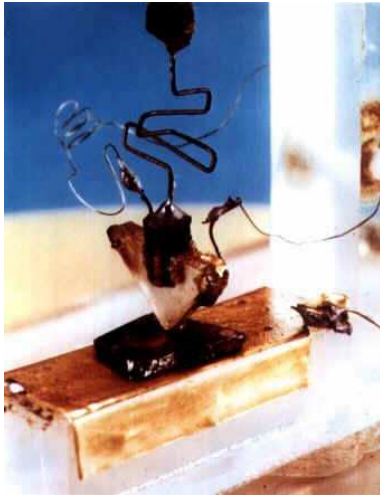
Tyhjiöputkien käyttöä vaivasivat kuitenkin monet ongelmat. Niiden toiminta oli ulkoisesta lämpötilasta riippuvainen, ja ne olivat epäluotettavia, minkä tähden usein rikkoutuneet tai loppuun palaneet putket aiheuttivat valtavan huoltamistarpeen. Lisäksi niiden tuottama lämpö, joka johtui suuresta tehon kulutuksesta, ja massiivinen koko aiheuttivat monia ongelmia jäähdytykselle ja käytölle monissa sovelluksissa. Siksi niiden tilalle oli tarpeellista löytää parempi tekniikka.

Oli aika siirtyä tutkimaan puolijohhteita, joiden ominaisuudet olivat pitkälti vielä hämärän peitossa. Jo 1926 Julius Lilienfield haki patenttia keksinnölleen, joka voidaan luokitella transistoriksi, sekä seuraavina vuosina useille sille läheistä sukua olleille keksinnöilleen [HoC03, ToM03]. Valitettavasti keksinnön arvoa ei tällöin juurikaan ymmärretty ja siksi sen kehittäminen jäi kesken.

Vuonna 1947 onnistuivat William Shockleyn johdolla John Bardeen ja Walter Brattain Bell Labsissa kehittämään ensimmäisen puolijohhteisiin perustuvan transistorin (point-contact germanium transistor) (kts. kuva 1) [ICK03]. Vaikka keksitty transistori ratkaisikin osan tyhjiöputkien ongelmista oli kyseisen toteutuksen ongelmana suuri kohina [Tra03]. Kolmikko sai keksinnöstään fysiikan Nobelin palkinnon vuonna 1956. Shockley kuitenkin jatkoi määrätietoisesti transistorin kehittämistä ja tuloksena syntyi vuonna 1951 bipolaaritransistori (bipolar junction transistor).

Transistori oli tyhjiöputkiin verrattuna ylivertainen komponentti. Sen pieni koko, virrankulutus ja hinta, hyvä lämmönsietokyky sekä pitkä elinikä tekivät siitä tyhjiöputkiin verrattuna houkuttelevan vaihtoehdon. Transistorit valmistettiin aluksi germaniumista, joka on kuitenkin kallista ja harvinaista materiaalia. Valmistuskustannuksien vähentämiseksi etsittiin muitakin valmistusmateriaaleja. Niistä käyttökelpoiseksi osoittautui pii, joka on maapallon toiseksi yleisin alkuaine. Ensimmäinen piistä rakennettu kaupalliseen massatuotantoon soveltuva transistori valmistui vuonna 1954 Texas Instrumentsilta, joka toi markkinoille samana vuonna myös ensimmäisen transistoreista rakennetun radion [TIH03].

Bell labs rakensi vuonna 1953 ensimmäisen kokonaan transistoreista rakenne-



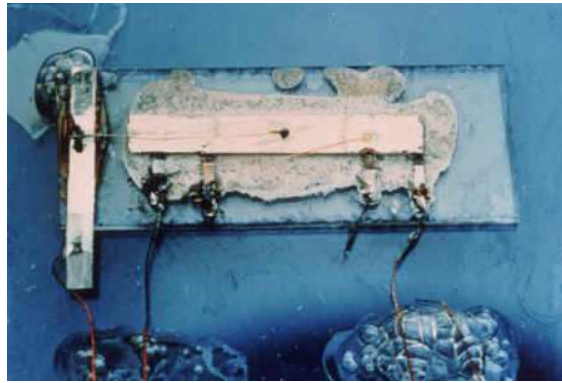
Kuva 1: Ensimmäinen transistori [ICK03]

tun tietokoneen TRADIC:in, jossa oli kaikkiaan 800 transistoria [HCF03]. Kaksi vuotta myöhemmin vuonna 1955 IBM valmisti ensimmäisen transistoreista koostun kaupallisesti hyödynnetyn tietokoneen [HCF03], tosin transistorien korkean hinnan takia siitä ei tullut myyntimenestystä. 1960-luvulla vauhti kiihtyi ja koko teollisuuden laajuinen siirtyminen tyhjiöputkista kohti transistoreja pääsi todella vauhtiin.

Transistori mahdollisti yhä suurempien kokonaisuuksien rakentamisen ilman tyhjiöputkille tyypillistä jatkuvasti tarvittavaa komponenttien vaihtamista. Silti tuhansista transistoreista rakennettu laite vaati edelleen suuren tilan, vaikkakin tilantarve oli kertaluokkia pienempi kuin tyhjiöputkilla. Sen seurauksena laitteiden kokoa oli edelleen tarpeellista pienentää, mihin integroidut piirit, joita käsittelemme seuraavassa luvussa, tarjosivatkin oivallisen mahdollisuuden.

## 4 Integroinnin alkutaival

Geoffrey Dummer tutki 1950-luvulla armeijan tutkatekniikan puitteissa mahdollisuutta toteuttaa integroituja piirejä, mutta hänen tutkimuksesta tekemänsä prototyyppi ei toiminut [HCo03]. Joten kunnia integroidun piirin keksimisestä meni Texas Instrumentsilla työskennelleelle Jack Kilbylle, joka huomasi vuonna 1958,

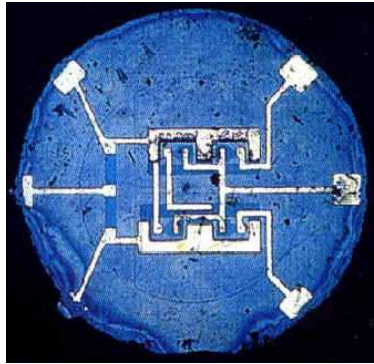


Kuva 2: Ensimmäinen integroitu piiri [ICK03]

että samasta puolijohdepalasta voidaan valmistaa useita komponentteja jakamatta sitä toisistaan irrallisiksi komponenteiksi. Hänen vuonna 1959 valmistamassa piirissä oli kaikkiaan 5 erilaista komponenttia samalla puolijohdepalalla (kts. kuva 2) [ICK03]. Kilbyn keksinnön arvo tunnustettiin lopulta vuonna 2000 fysiikan Nobel palkinnolla, jonka hän jakoi yhdessä Zhores Alferovin ja Herbert Kroemerin kanssa.

Shockley jäi pois Bell Labsilta, kokosi ympärilleen pienen joukon insinöörejä ja perusti vuonna 1955 Semiconductor Laboratoryn Silicon Valleyyn, joka oli ensimmäinen yritys alueella [Tra03]. Kuitenkin Shockleyn johtamistyyli johti nopeasti välien tulehtumiseen. Tämän seurauksena vuonna 1957 kahdeksan insinööriä, jotka olivat Julius Blank, Victor Grinich, Jean Hoerni, Gene Kleiner, Jay Last, Gordon Moore, Robert Noyce ja Sheldon Roberts [Tra03], erosi Shockleyn palveluksesta ja he perustivat itse yrityksen, joka tunnetaan nykyään nimellä Fairchild Semiconductor.

Kilbyn ratkaisu tarvitsi huomattavasti kehittelyä, sillä yhteydet eri komponenttien välillä olivat toteutettu kullasta valmistetuilla metallilangoilla [ICK03], jotka kulkivat piirin puolijohdekappaleen yläpuolella. Pian kuitenkin äskettäin perustetulla Fairchild Semiconductorilla Jean Hoerni, Kurt Lehovec ja Robert Noyce kehitti paremman ratkaisun, jossa puolijohdekappale oli tasainen levy (Planar Technology) (kts. kuva 3) [HCF03]. Tässä valmistusprosessissa piirin komponentit sisältävän puolijohdekappaleen päälle kerrostetaan ensiksi eristekerros, johon



Kuva 3: Tasoon valmistettu integroitu piiri [ICK03]

on valmistetut reiät yhdistivät puolijohdemateriaalissa olevat komponentit eriste-kerroksen päälle valmistettuun, komponentit toisiinsa kytkevään johdinkerrokseen [ICK03]. Nykyisten integroitujen piirienkin rakenne perustuu edellä kuvattuun oivallukseen, tosin eriste- ja johdinkerroksia on suurissa piireissä useita (jopa 8-10 johdinkerrosta).

Integroitujen piirien markkinoille oli heti tungosta. Sekä Texas Instruments helmikuussa että Fairchild Semiconductor heinäkuussa hakivat kehittämilleen valmistustekniikoille patenttia vuonna 1959 ja ne kävivät oikeustaistelua 1960-luvulle, joka päättyi lopulta teknologioiden ristiinlisensointiin [Red03]. Vuonna 1961 molemmat valmistivat ensimmäiset kaupalliset integroidut piirinsä [ICK03].

Monet ongelmat varjostivat integroitujen piirien alkutaivalta. Niiden valmistusprosessissa valmistunesta piireistä jopa 90% oli viallisia [Dun03] ja pelkästään tuotannon käynnistämisesäkin oli usein ongelmia, jotka viivästyttivät aikatauluja. Lisäksi niiden moninkertainen hinta verrattuna vastaavaan määrään yksittäisiä transistoreja oli monelle asiakkaalle liian suuri kynnys, tilavaatimusten pienennyksestäkin huolimatta. Kuitenkin valmistusprosessin kehittymisen ja parantumisen johdosta integroitujen piirien hinta laski 1960-luvulla nopeasti [Dun03].

Integroiduista piireistä on vaikea puhua, mainitsematta Gordon Moorea, jonka vuonna 1965 lanseeraama havainto, ns. Mooren laki, on ollut eräs koko integroitujen piirien kehityksen mittapuu. Tutkittuaan aikaisempien vuosien kehitystä, hän havaitsi samalle puolijohdepalalle valmistettujen transistorien määrän hin-



taa kohden tuplaantuvan 12 ja 24 kuukauden välisillä jaksoilla ja esittikin siitä ennustuksen, että kehitys tulee jatkumaan samankaltaisena tulevaisuudessa. Tarkennuksena hän tarjosi kaksinkertaistumisjaksoksi 18:sta kuukautta. Teoria piti pitkään pintansa puolijohdeteollisuuden johtotähtenä, vaikkakin viime aikoina Mooren havaintojen paikkansa pitävyydestä on esitetty kriittisiä arvioita [Tuo02] ja alle vuosikymmenen päästä saavutettavat fysikaaliset rajat tulevat varmasti hidastamaan kehityskulkua ellei korvaavaa valmistustekniikkaa löydetä ennen sitä.

Myös muistitekniologia kulki vauhdilla eteenpäin. Vuonna 1966 Robert Dennard keksi tavan, dynaamisen hajasaantimuistin (DRAM), jossa yhdellä transistorilla ja kondensaattorilla voitiin tallettaa yksi bitti tietoa [ICK03]. Tämä oli koko vaatimusten kannalta suuri askel vähintään kuusi transistoria vaatineisiin staattisiin ratkaisuihin (SRAM) verrattuna. Toinen suuri askel seurasi heti seuraavana vuonna, jolloin Fairchild Semiconductor valmisti ensimmäisen, 256 bittiä tallettavan integroidun RAM-piirin [HCF03]. Yhdessä nämä edistysaskeleet mahdollistivat nykyisen kaltaisten DRAM-lastujen valmistamisen. Jo samana vuonna IBM saikin valmiiksi ensimmäisen integroidun DRAM:in [HCF03]. Tästä kehitys jatkui vuonna 1969 1kb:n suuruisella RAM-piirillä Inteliltä, joka alkuaikoinaan tuotti myös muistipiirejä ja luopui niistä kokonaan vasta 1980-luvun alussa 1Mb:n suuruisen, ensimmäisen CMOS-tekniikkaan perustuvan DRAM-piirinsä jälkeen [ICK03].

## 5 MOSFET

Metallioksidin puolijohdeominaisuuteen perustuva transistori (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor; MOSFET tai pelkästään MOS) kehitettiin Bell Labsilla 1960 Dawon Kahngin ja Attallan toimesta [Tri03]. Ensimmäinen PMOS-transistoreihin (p-type MOS) perustuva integroitu piiri valmistettiin kuitenkin 1962 Steven Hofsteinin ja Fredric Heimanin toimesta RCA research laboratoryssä Princetonissa New Jerseyssä, koska Bell Labsilla ei käsitetty MOS:in mahdollisuuksia [HoM03, Tri03]. Valmistuskustannuksiltaan MOS-transistori oli aikai-

sempia halvempi ja se kulutti myös vähemmän tilaa ja tehoa, vaikkakin sen nopeus oli huonompi.

MOS-transistori on unipolaarinen. Niitä on kahta eri tyyppiä: NMOS (n-type MOS) ja PMOS. Erona niillä on syötteenä olevan jännitteen polariteetti. Ohjauvan jännitteen ollessa 0V NMOS on estotilassa ja PMOS päästötilassa ja käyttöjännitteellä vastaavasti toisinpäin.

Pelkästään joko NMOS- tai PMOS-transistoreista kootussa veräjässä kulkee kuitenkin stabiilissakin tilassa kokoajan virtaa, eikä se myöskään pysty täysin koptioimaan sisäänmenon suuruista päästöjännitettä ulostuloon. Tämä jännittemuutoksesta aiheutunut veräjän häiriönsietokyvyn aleneminen ja virrankulutuksesta aiheutuva jatkuva tehonkulutus, joka näkyy piirin lämpenemisenä, voidaan poistaa CMOS-tekniikalla.

CMOS (Complementary MOS) perustuu aiemmin kehitettyjen NMOS- ja PMOS-transistorien käyttöön samalla piirillä. Niillä saadaan aikaan molemmille digitaalisen piirin ulostulon jännitetasoille oma transistorikytkentä, joista pelkästään toinen on päästötilassa veräjän ollessa stabiilissa tilassa. Tällöin virtaa kuluu pelkästään tilanvaihdon yhteydessä. Koska NMOS- ja PMOS-transistorit toimivat ohjauvan jännitteen suhteen käänteisesti on tarpeen toteuttaa ulostulon ykköstaso kytkentä nollatason kytkennän loogisella komplementilla. Tästä johtuu CMOS-termin komplementtia tarkoittava sana. Sama ilmiö voidaan kuvata helposti matemaattisella logiikalla.

$$f = \begin{cases} 1, & \text{kun } a \text{ AND } b \\ 0, & \text{kun } \overline{(a \text{ AND } b)} = \bar{a} \text{ OR } \bar{b} \end{cases}$$

Vaikka CMOS:in keksikin jo 1963 Frank Wanlass Fairchild Semiconductorilla, niin käytännössä se vakiintui yleiseen käyttöön vasta vuosikymmeniä myöhemmin sen keksimisestä. Tähän perehdymme tarkemmin seuraavassa luvussa.

## 6 Teknologian vakiintuminen

1960-luvun jälkeen tärkeimmät keksinnöt transistoriteknologian osalta olivat tehty, tosin kaikkia keksintöjä ei kyetty alkuaikoina eikä vielä 1970-luvullakaan täysin hyödyntämään.

Aluksi integroiduista piireistä valmistettiin muutamia kymmeniä komponentteja (SSI, kts. taulukko 1) sisältäneitä standardipiirejä, joissa yleensä oli monia kapaleita jotakin yhden tyyppistä veräjää (esim. AND-veräjiä). Näitä piirejä hyödyntämällä voitiin piirilevyn kytkennöillä valmistaa monimutkaisempia rakenteita. Tätä tekniikkaa alettiin kutsua TTL-nimellä (Transistor-to-Transistor Logic). Monet 1960- ja 1970-luvulla valmistetut tietokoneet perustuivat pääosin TTL:ään, mistä tietenkin seurasi suuri tilan tarve. Parhaimmillaan niiden prosessorit saattoivat olla jopa kymmenen piirilevyn kokoisia jättiläisiä. 1960-luvun lopulla piirien koko kasvoi muutamisiin satoihin (MSI, kts. taulukko 1) ja tuhansiin 1970-luvulla (LSI, kts. taulukko 1).

Transistoreja	Lyhenne	
< 10	SSI	Small Scale Integration
10 - 100	MSI	Medium Scale Integration
100 - 5000	LSI	Large Scale Integration
5000 -	VLSI	Very Large Scale Integration

Taulukko 1: Integroitujen piirien koot (tarkat transistorimäärät vaihtelevat)

Intelin perustivat Gordon Moore, Robert Noyce ja William Shockley vuonna 1968. Aluksi Intel keskittyi muistipiirien toteuttamiseen, mutta vuonna 1969 Intel aloitti ensimmäisen mikroprosessorin suunnittelun BusiComin pyynnöstä. Suunnittelun prosessorin toteutuksessa ilmeni kuitenkin ongelmia, joiden viivästyttämisenä Intel4004 saatiin toimimaan vasta vuonna 1971. Se tunnetaan ensimmäisenä mikroprosessorina. 4-bittisessä prosessorissa oli kaikkiaan noin 2300 transistoria ja ne oli valmistettu 10 $\mu$ m viivanleveydellä. Samaan aikaan Texas Instruments kehitti tahollaan mikroprosessoria ja sekin valmistui saman vuonna.

1980-luvun vaihteessa teolliseen tuotantoon käytetty teknologia alkoi kovalla vauhdilla siirtyä CMOS-pohjaisiin piireihin, koska yksittäisten piirien transistori

määrät kasvoivat jo huomattavan suuriksi, mistä ilman CMOS:in käyttämistä olisi seurannut liian suuri lämmöntuotanto. Tässä vaiheessa viivanleveydet olivat vielä hiukan 1  $\mu\text{m}$  suurempia. Käytännössä muutokset CMOS:in käyttöönoton jälkeen ovat rajoittuneet viivanleveyden pienentämiseen.

## Lähteet

- Dun03 Peter Dunn, Tube, Transistor, Chip, [http://www.facsnet.org/tools/sci\\_tech/tech/fundamentals/tubechip.php3](http://www.facsnet.org/tools/sci_tech/tech/fundamentals/tubechip.php3). [19.03.2003]
- HCF03 The History Of Computing Foundation, <http://www.thocp.net/>. [19.03.2003]
- HCo03 History of Computers, <http://www.adventdigital.net/train/history.html>. [20.03.2003]
- HoC03 History of Computers, <http://www.maxmon.com/history.htm>. [19.03.2003]
- HoM03 The History of Microprocessors, <http://oz.plymouth.edu/~harding/historymicro.html>. [19.03.2003]
- ICK03 History of the integrated circuit, <http://www.icknowledge.com/history/history.html>. [19.03.2003]
- Red03 James Redin, A Tale of Two Brains, <http://dotpoint.com/xnumber/kilby.htm>. [19.03.2003]
- TIH03 Texas Instruments History, <http://www.texasinstruments.com/corp/docs/company/history/tihistory.htm>. [19.03.2003]
- ToM03 Timeline of Microcomputers, <http://www.angelfire.com/pq/pcmuseum/comphist.html>. [19.03.2003]

- Tra03 Transistorized! The History of the Invention of the Transistor, <http://www.pbs.org/transistor/index.html>. [19.03.2003]
- Tri03 Sol Triebwasser, The Triumph of MOS Technology: A Book Review, [http://www.ieee.org/organizations/pubs/newsletters/sscs/jan03/mos\\_tech.html](http://www.ieee.org/organizations/pubs/newsletters/sscs/jan03/mos_tech.html). [19.03.2003]
- Tuo02 Ilkka Tuomi, The Lives and the Death of Moore's Law, <http://www.jrc.es/~tuomiil/articles/TheLivesAndTheDeathOfMoore.pdf>. [12.03.2003]