Saga og þróun tölvutækninnar

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

24. mars 2000

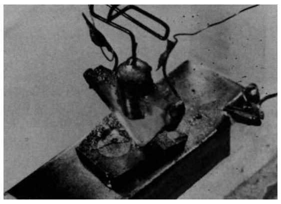
Upphafið

- Upphaf rafeindatækninnar má rekja til uppgötvunnar rafeindarinnar af J. J. Thomson árið 1897
- Skilningur á eiginleikum rafeindarinnar gerði mögulega tækni og þjónustu sem ekki hafði verið hægt að sjá fyrir
- 50 árum síðar 1947 voru lampar og liðar ráðandi tækni, lampatvistar, bakskauts-lampar og örbylgjuvakar voru framleiddir í miklu magni
- Það virtist sem þessi tækni næði að fullnægja öllum kröfum hins daglega lífs

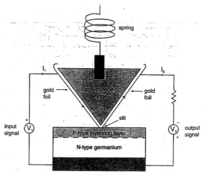
Upphafið

- Mervin Kelly, þá forseti Bell Laboratories, gerði sér grein fyrir takmörkunum þessarar tækni
- Hann taldi að skiptihraði liða, og ending og aflnotkun lampa myndi takmarka framfarir í fjarskiptum og annarri rafeindatækni
- Sumarið 1945 setti hann saman rannsóknarhóp til að skoða og skilja hálfleiðara
- Hópurinn hafði það langtíma markmið að skapa hálfleiðaratól sem kæmi í stað lampa og liða

Upphafið



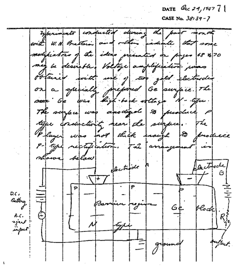
- Í desembermánuði 1947 settu þeir John Bardeen, William Schockley, og Walter Brattain saman fyrsta smárann í Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey



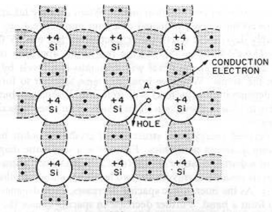
- Með því hófst notkun hálfleiðara í rafeindatækni

Upphafið

- Fyrir uppgötvun sína fengu þeir Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði árið 1956

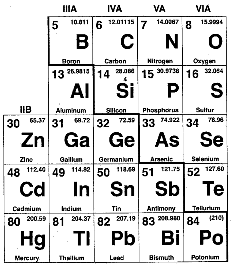


Leiðni hálfleiðara



- Hugmyndin var byggð á því að stjórna mætti rafstraum í gegnum þéttefni eins og kísil með því að bæta í það óhreinindum með tiltekinn fjölda gildisrafeinda

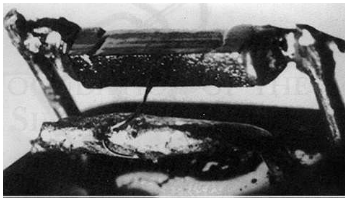
Leiðni hálfleiðara



- Í kísilgrindinni er sérhvert kísilatóm tengt fjórum næstu grönnum samgildum tengjum
- Þegar íbætt er með atómi sem hefur fimm gildisrafeindir eykst þéttleiki hreyfanlegra hleðslubera með því að þau gefa frá sér frjálsar rafeindir.
- Íbótaratóm með þrjár gildisrafeindir þarf að gleypa eina rafeind þegar það situr í sæti kísils, og myndar með því jákvætt hlaðinn hleðslubera sem nefndur er hola.

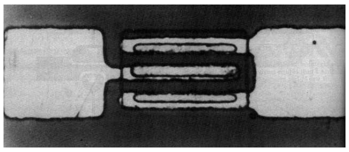
Upphafið

- Fyrsti tvískeytti smárinn var búinn til úr german í janúar 1948

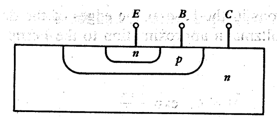


- Á fimm árum frá því að rannsóknarhópurinn hafði verið settur saman var smárinn fundin upp og verkun hans skilin
- Næsta skrefið var frekari þróun og lausn verkfræðilegra vandamála þannig að hagnýta mætti þessa mikilvægu uppgötvun
- Þetta tók 8 ár

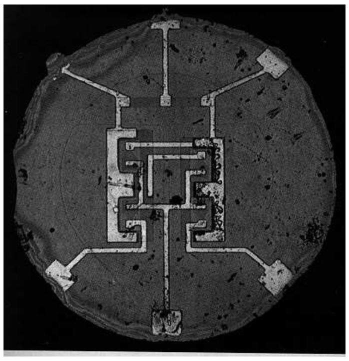
Upphafið



- Fyrsti flati smárinn búinn til af Jack Kilby hjá Fairchild Semiconductors og fljótlega upp úr því fyrsta smárásin hjá Texas Instruments (1958)
- Flatir smárar voru komnir í framleiðslu 1959 og smárásir 1962 hjá Fairchild Semiconductors



Upphafið



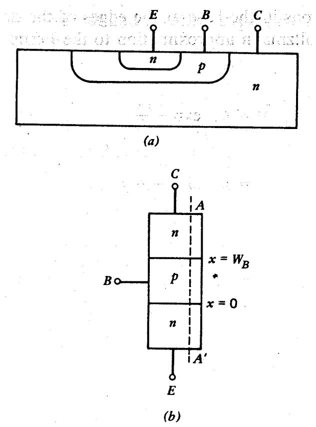
- Fyrstu smárásirnar, sem voru framleiddar af Fairchild Semiconductor og Texas Instruments, samanstóðu af nokkrum smárum og viðnámum. Þannig voru búin til einföld hlið og magnarar.

- Þar með hófst þróun smárása fyrir alvöru

Upphafið

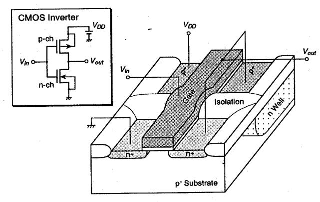
- 1947 Fyrsti smárinn
- 1956 Fyrsta hliðið
- 1958 Fyrsta smárásin
- 1960 Rökrása fjölskylda
- 1962 Transistor transistor logic (TTL)
- 1970s MOS hlið
- 1972 Fyrsti örgjörvinn (NMOS) Intel 4004
- 1974 Annar örgjörvinn (NMOS) Intel 8080
- 1980s CMOS

Tvískeyttir smárar



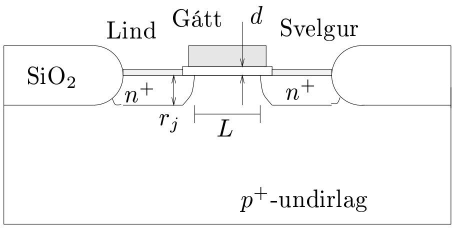
- Í rúma tvo áratugi voru tvískeyttir smárar ráðandi í smárásum
- Tvískeyttir smárar draga meira afl en MOS sem takmarkar fjölda og þéttni smára í smárás.

MOS



- Málmur-einangrari-hálfleiðari (MIS) smárar eru mikilvægustu tólin í nútíma ULSI rafeindatækni
- MIS smárinn samanstendur af hálfleiðandi undirlagi, gáttar skauti úr málmi (nú er gáttarskautið gjarnan ú fjölkristölluðum kísli), og einangrandi þunnfilmu
- Einangrarinn er oft kísiloxíð og þess vegna er þessi gerð smára oft nefnd MOS

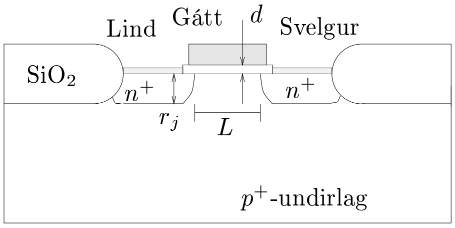
MOS



Helstu kennistærðir MOSFET eru

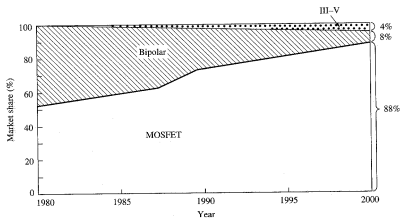
- rásalengdin, L
- þykkt oxíðlagsins, d
- dýpt samskeytanna, r_j
- íbótarþéttleiki undirlags, N_A

MOS



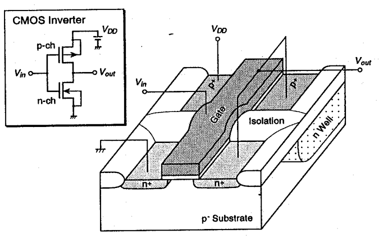
- MOS smárinn samanstendur af lind, svelg og gátt
- Lind og svelgur eru rafrænt einangruð frá hvort öðru með rásinni
- Gáttin er aðskilin frá rásinni með einangrandi kísiloxíði
- Með því að leggja spennu á gáttina yfir einangrandi oxíðið getur myndast leiðandi braut í rásinni milli lindar og svelgs
- Smárinn vinnur því sem stafrænn rofi þar sem gáttarspennan stýrir því hvort hann er opinn eða lokaður

MOS



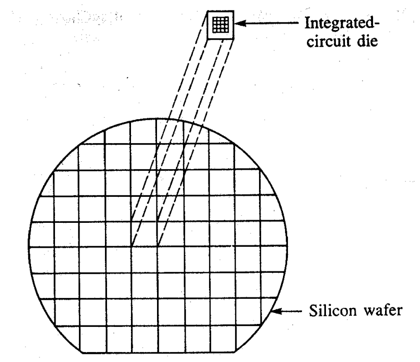
- Frá því á síðari hluta níunda áratugarins hafa CMOS rásir verið notaðar í allar venjulegar rásir eins og örgjörva og minni
- Þetta er vegna þess að aflnotkun og tilsvarandi ofhitnun takmörkuðu pökkun n-MOS við 10^6 hlið/cm^2.

MOS



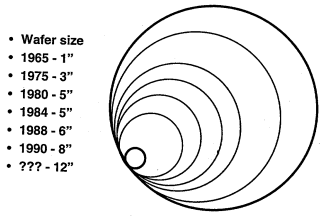
- Hver eining CMOS samanstendur af $n-$ og $p-$rása MOS smárum.
- Tólin tvö eru raðtengd frá $V_{\rm dd}$ til jarðar og annað þeirra leiðir þá ekki í hvorri stöðunni sem rásin er. Aðeins lítill lekastraumur fer þá um rásina nema rétt á meðan báðir smárarnir eru á, þannig að aðeins á meðan skipt er um stöðu fer einhver straumur um CMOSinn. Meðalaflnotkun er því lítil.

Þróunin

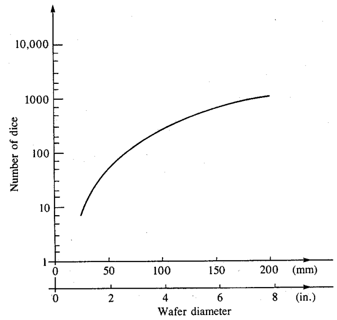


- Í upphafi var einn kísil smári á hverri flögu sem var 1 - 2 mm á kant.
- Í dag eru nokkrar milljónir tóla á hverri flögu sem er 7 mm × 7 mm.

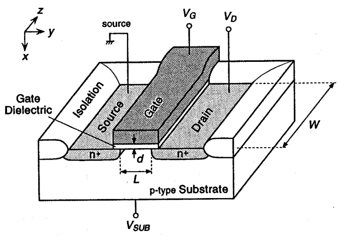
Þróunin



- Í árdaga voru skífurnar 1” - 2 ” í þvermál, nú eru 8” skífur notaðar í framleiðslunni



Þróunin

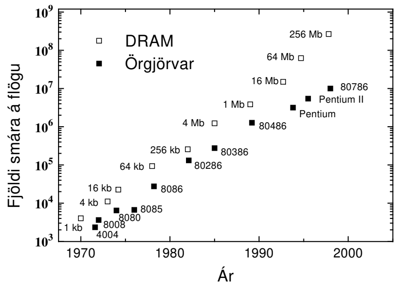


- Auknum fjölda tóla í smárás hefur verið náð með því að minnka hvern smára
- Í dag er $L = 0.18\ \mu$m og $d \approx 8$ nm

• Time	1970	1990	1994	X
• Wafer	2”	6”	8”	
• Feature	7μm	1μm	.5μm	
• DRAM	1kb	1Mb	64Mb	
• Chip	0.1cm²	1cm²	2cm²	
• Wafer $	$50	$500	$1000	
• Yield	20%	80%	80%	
• Chip $	$2	$4	$4	
• Cost/bit	0.2c	0.0004c	0.0003c	

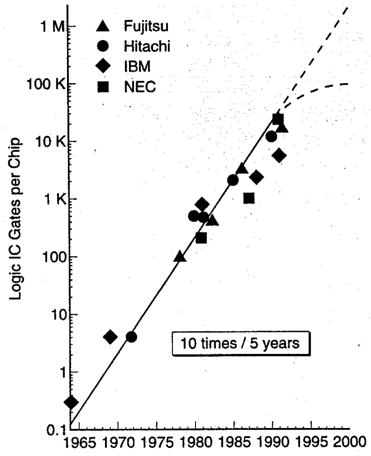
Lögmál Moore's

- Í apríl 1965 var Gordon E. Moore, þá hjá Fairchild Semiconductors, beðin um að spá um þróun smárása næstu 10 árin.



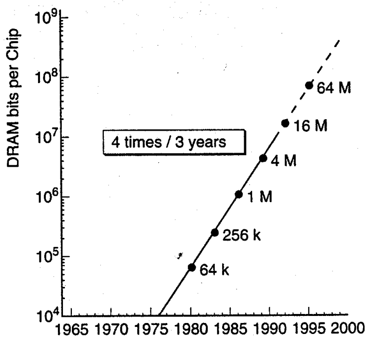
- Hann spáði að fjöldi tóla í smárás myndi tvöfaldast á hverju ári
- Árið 1975 endurnýjaði hann spá sína. Fjöldi tóla í smárás tvöfaldast á hverjum 18 mánuðum

Lögmál Moore's



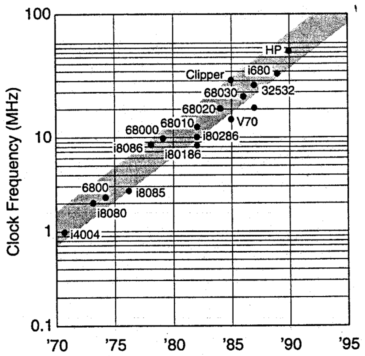
- Fjöldi hliða í smárás tífaldast á hverjum fimm árum

Lögmál Moore's



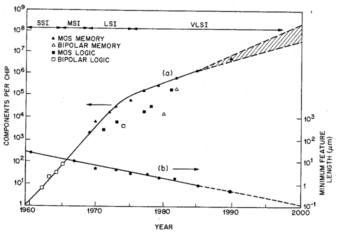
- Minnisþéttleiki fjórfaldast á hverjum 3 árum

Lögmál Moore's



- Klukkutíðni hefur tvöfaldast á hverjum þremur árum

Lögmál Moore's



- Smækkun tóla hefur leitt til lækkunnar kostnaðar á hverja aðgerð
- Kostnaður á hvern bita í minniseiningu hefur helmingast á hverjum 2 árum.
- Smærri tól vinna hraðar
- Smærri tól draga minna afl

Lögmál Moore's

YAHOO! FINANCE — Home - Yahoo! - Help

Get Quotes — Chart — symbol lookup

Welcome — Customize (Yahoo! ID required) - Sign In

Track your favorite stocks and more with Yahoo! Finance [Register/Sign In]

Quotes

Get ready for tax season with a visit to the Yahoo! Tax Center.

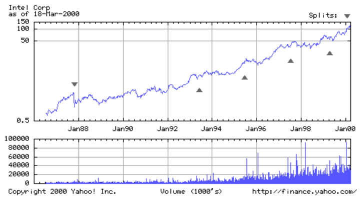
Click to trade or open an account. - Important Disclaimer

Views: Basic - DayWatch - Performance - Fundamentals - Detailed - [Create New View]

Wed Mar 22 6:49am ET - U.S. Markets open in 2 hours 41 minutes.

INTEL CORP (NasdaqNM:INTC) - More Info: News , SEC , Msgs , Profile , Research , Insider

Last Trade 4:01PM · **138 $^{7}/_{16}$**	Change 0 (0.00%)		Prev Cls 138 $^{7}/_{16}$	Volume 25,615,500	Div Date Mar 1
Day's Range 134 $^{1}/_{8}$ - 138 $^{7}/_{8}$	Bid 138 $^{1}/_{4}$	Ask 138 $^{3}/_{8}$	Open 135	Avg Vol 24,980,408	Ex-Div Feb 3
52-week Range 50 $^{1}/_{8}$ - 138 $^{7}/_{8}$	Earn/Shr 2.11	P/E 65.61	Mkt Cap 462.5B	Div/Shr 0.12	Yield 0.09



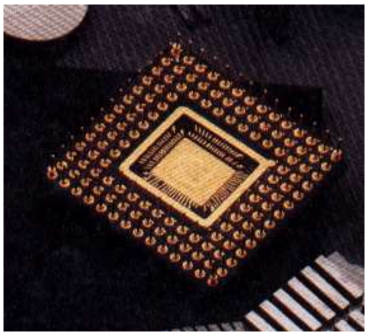
Splits: 29-Oct-87 [3:2], 7-Jun-93 [2:1], 19-Jun-95 [2:1], 14-Jul-97 [2:1], 12-Apr-99 [2:1]

Small: [1 day | 5 day | 1 year | none]
Big: [1 day | 5 day | 3 month | 1 year | 2 year | 5 year | **max**]
Table: [daily | weekly | monthly | dividends]

Type: **Basic**
vs S&P 500
Moving Avg

Quotes delayed 15 minutes for Nasdaq, 20 minutes otherwise.
Customize Finance (Yahoo! ID required) - COOL JOBS @ YAHOO - Yahoo! Finance Home

Lögmál Moore's



- Motorola PowerPC örgjörvinn inniheldur 7.000.000 smára
- Intel Pentium II örgjörvinn inniheldur 7.500.000 smára
- Digital Alpha örgjörvinn inniheldur 10.000.000 smára

Lögmál Moore's

"Moores law is why … smart people start saving for the next computer the day after they buy the one they have…"

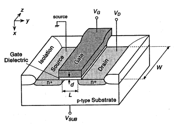
- Það sem vegið hefur þyngst í þessari þróun er sífelld smækkun einstakra smára
- Nú er svo komið að minnstu einingar smára nálgast víddir atómsins
- Það er raunhæft að gera ráð fyrir að hægja muni á þessari þróun

Lögmál Moore's - Vandamál

- Samtök hálfleiðaraframleiðenda (e. Semiconductor Industrial Association (SIA)) setja reglulega fram áætlun eða spá um þróun iðnaðarins á komandi árum
- Áætlun þeirra gerir ráð fyrir að innan 10 ára verði þykkt gáttaroxíðs komin niður fyrir 1.5 nm og að minnsta eining í rásinni verði um 70 nm

	2001	2002	2005	2008
Hönnun [nm]	150	130	100	70
Gáttar oxíð [nm]	2 – 3	2 – 3	1.5 – 2	< 1.5
Skeytadýpt [nm]	30 – 60	26 – 52	20 – 40	15 – 30
V_{dd} [V]	1.5 – 1.2	1.5 – 1.2	1.2 – 0.9	0.9 – 0.6
Gáttartöf [ps]	10 – 12	9 – 10	7	4 – 5

Lögmál Moore's - Vandamál

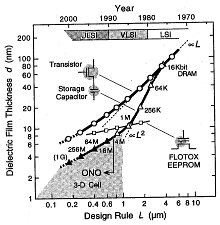


- Við skölun smára verður að skala allar víddir samtímis.
- Jafnframt verður að viðhalda sömu hleðslu á lind-, svelg- og rásasvæðum til að viðhalda lágu viðnámi tólsins
- Skölun smára kallar á aukningu þéttleika rafgjafa- og rafþegaíbótar til að viðhaldið sé heildarhleðslu á lindar- og svelgsvæðunum
- Íbótarþéttleiki í MOS smárum hefur aukist um tvær stærðargráður á undanförnum 20 árum og er í núverandi tæknilausnum um 1 % af þéttleika kísilgrindarinnar

Lögmál Moore's - Vandamál

- Náttúran setur efri mörk á það hve mikið má íbæta með tilteknum atómum, leysnimörk
- Leysnimörkin eru varmafræðilegur eiginleiki og því óháð því hvernig íbótin er framkvæmd
- Ofan leysnimarkanna mynda íbótaratómin klasa og setjast ekki í grindarsæti kísils og auka því ekki þéttleika hreyfanlegra hleðslubera
- Sú íbót sem nú er notuð hefur nú þegar náð leysnimörkunum
- Hér þarf því að koma til ný tækni ef frekari skölun smáranna á ekki að leiða til aukins viðnáms og minnkaðrar afkastagetu

Lögmál Moore's - Vandamál



- Gáttaroxíðið er einnig að nálgast minnstu fræðilega þykkt sína.
- Með því að leggja spennu á gáttina dregst hleðsla að eða ýtist frá samskeytum kísils og oxíðs
- Með því að þynna oxíðið verður rafsviðsstyrkurinn hærri, og hleðsluþéttleiki eykst, viðnám rásar minnkar og afkastageta smára eykst
- Hins vegar getur aukinn rafsviðsstyrkur leitt til niðurbrots oxíðlagsins og þar með eyðileggingar smára

Lögmál Moore's - Vandamál

- Nauðsynlegt mun reynast að lækka aflgjafaspennuna V_{dd} vegna lekastrauma og áreiðanleika
- Jafnframt því sem að aflgjafaspennnan hefur verið sköluð niður hefur þykkt oxíðsins verið minnkuð til að viðhalda rafsviðsstyrknum
- Nú er oxíð lagið orðið það þunnt að skammtafræðilegt smug rafeindanna frá kísilundirlaginu til gáttarskautsins er mögulegt
- Líkur á smugi rafeinda um mættisþröskuld er veldislega háður þykkt hans
- Innan 10 ára er áætlað að þykkt oxíðs verði um 1.5 – 2 nm, sem samsvarar 3 til 4 atómlögum
- Fyrir þessa þykkt er smugstraumur um oxíðlagið verulegur

Lögmál Moore's - Vandamál

- Frá árdögum hefur iðnaðurinn reitt sig á ál og álmelmi í millitengi og kísiloxíð í einangrara
- Til að halda megi áfram að auka afköst smárása í framtíðinni verður að fara að nota málma með hærri leiðni en ál og efni með lægri rafsvörunarstuðul en kísiloxíð sem einangrara á milli laga og leiðara
- Kopar sveimar hratt inn í kísil og sveimþröskuldar verða að koma til svo að koparinn nái ekki að snerta kísilyfirborð

Lögmál Moore's - Vandamál

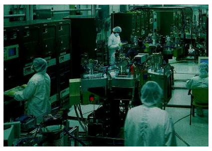
- Frá því að fyrsta smárásin var byggð hefur mynstrið verið flutt yfir á rásina með sýnilegu ljósi
- Með stöðugri smækkun minnstu eininga gefa ljósgjafarnir sífellt styttri bylgjulengdir, og í dag er notað útfjólublátt ljós (193 nm)
- Þrátt fyrir að hægt sé að framleiða smárásir sem eru minni en bylgjulend ljósgjafans er með núverandi tækni ekki hægt að fara neðar en 100 nm
- Ekki eru til nein efni sem hleypa í gegnum sig bylgjulengdum sem eru mikið styttri en 193 nm og því ekki hægt að framleiða linsur fyrir þessar stuttu bylgjulengdir
- Því þarf að þróa nýjar alveg aðferðir til að fara niður fyrir 100 nm. Til dæmis þá er verið er að skoða þá möguleika að skrifa rásina á flöguna með rafeindageisla

Lögmál Moore's - Vandamál

- Víddir smárans eru orðnar það litlar að fjöldi íbótaratóma sem stjórna rafeiginleikunum er af stærðargráðunni 100
- Lítil breyting í fjölda og dreifingu atómanna getur því valdið mikilli breytingu í rafeiginleikum smárans
- Fyrir rás sem inniheldur 10 milljón smára veldur þetta tilviljanakennda flökkt í eiginleikum þeirra ýmsum hönnunarvandamálum, t. d. flökkti í þröskuldsspennu
- Draga verður úr þessu flökkti ef minnka á smára það mikið að tugir atóma stjórni rafeiginleikunum

Lögmál Moore's

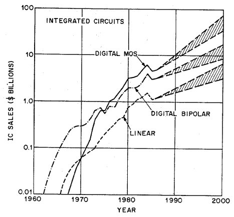
- Sumir telja að hagfræðin stöðvi vöxtinn áður en kemur að eðlisfræðilegum og tæknilegum vandkvæðum.
- Fjárfesting í verksmiðjum vex veldisvexti með auknum þéttleika tóla í smárásum



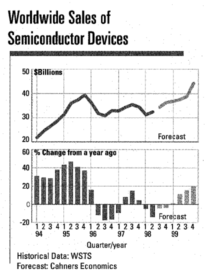
Kostnaður við nýja verksmiðju:

- 1966 USD 14.000.000
- 1995 USD 1.500.000.000
- 1998 USD 3.000.000.000
- 2005 USD 10.000.000.000

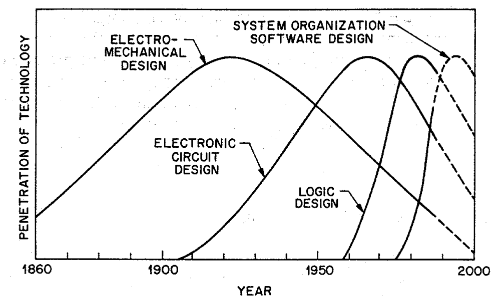
Hagfræðin



- Heimsmarkaður hálfleiðaratóla er rúmlega 30 milljarðar dala á ári (1999) og fer hratt vaxandi



Hagfræðin



Heimildir

[1] R. B. Schaller, Moore's law: past, present and future, *IEEE Spectrum*, **34**(6)(1997) 53 - 59

[2] I. M. Ross, The foundation of the silicon age, *Physics Today*, **50**(12)(1997) 34 - 39

[3] M. Riordan and L. Hoddeson, The Moses of Silicon Valley, *Physics Today*, **50**(12)(1997) 42 - 47

[4] M. Riordan, L. Hoddeson and C. Herring, The invention of the transistor, *Reviews of Modern Physics*, **71** (1999) S336 - S345

[5] J. M. Rabaey, *Digital integrated circuits: A design perspective*, Prentice - Hall, 1996

[6] S. M. Sze, Introduction, in *VLSI Technology*, editor S. M. Sze, McGraw-Hill, 1988

[7] P. A. Packan, "Pushing the limits," *Science*, **285**, (1999) 207 – 208