

**Framleiðsla smárása:**

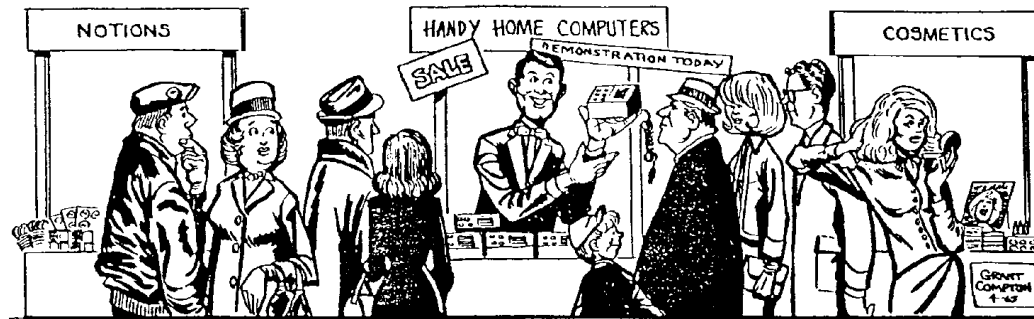
# **Lögmál Moore**

**kafli 1 b**

**Jón Tómas Guðmundsson**

**[tumi@hi.is](mailto:tumi@hi.is)**

**1. vika haust 2014**

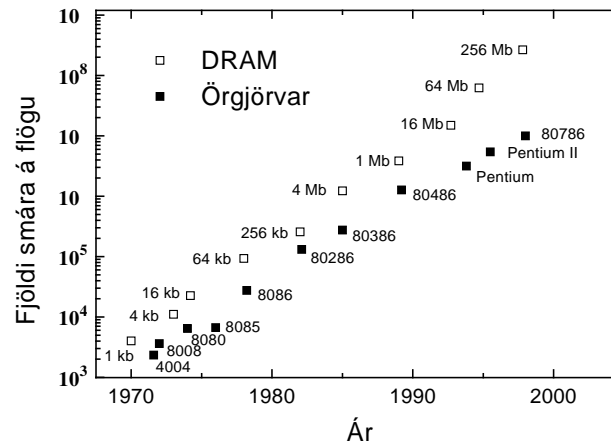


*Integrated circuits will lead to such wonders as home computers—or at least terminals connected to central computer—automatic controls for automobiles, and personal portable communication equipment.*

Gordon E. Moore, 1965

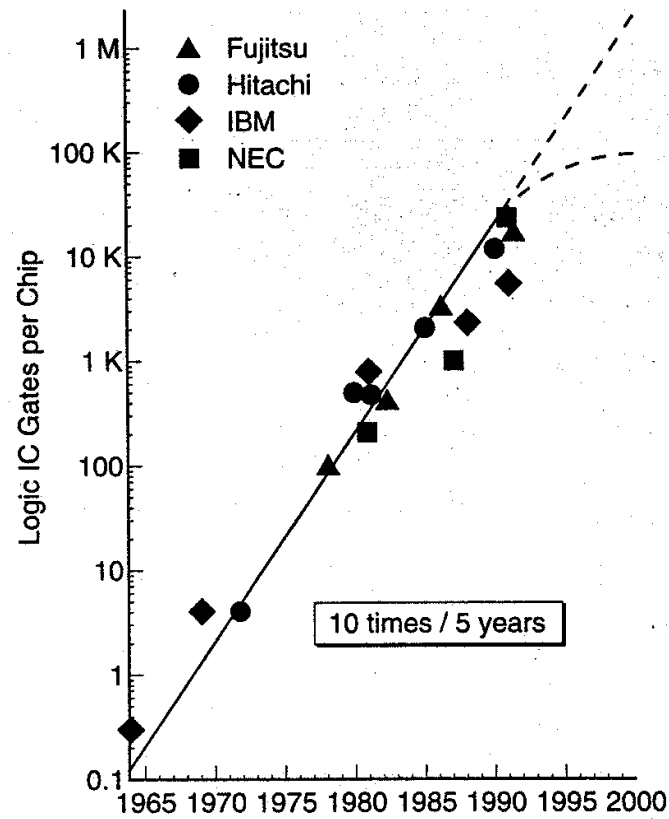
## Lögmál Moore's

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



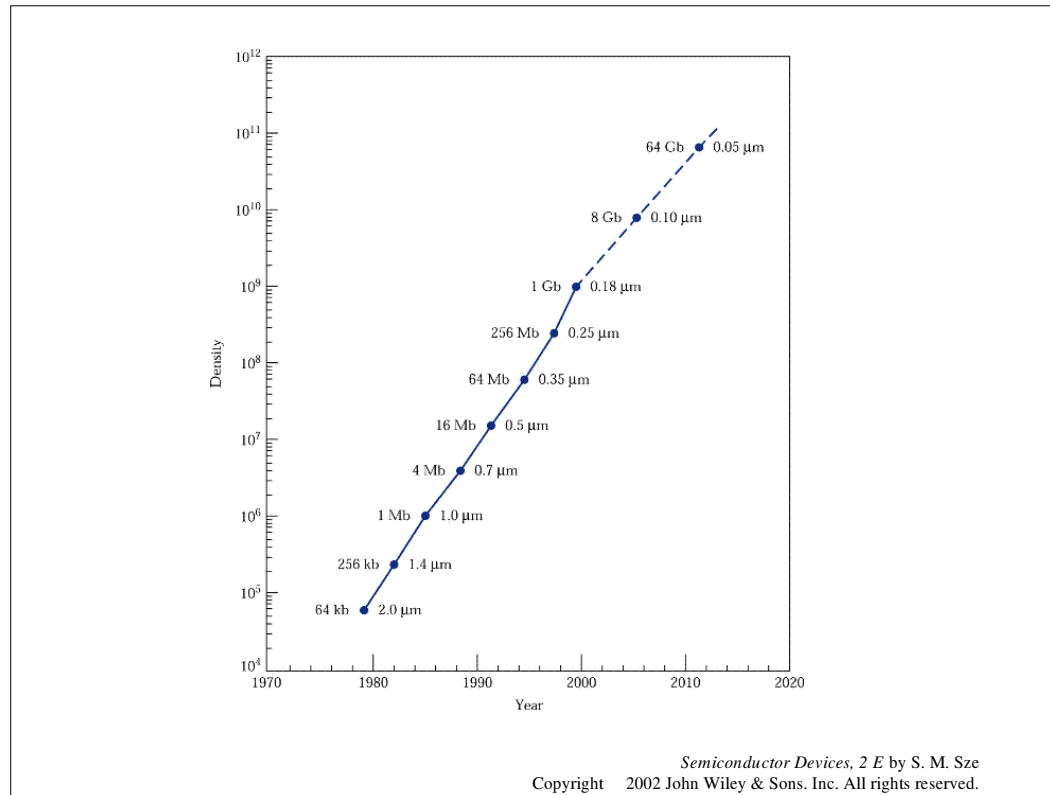
- Hann spáði að fjöldi tóla í smárás myndi tvöfaldast á hverju ári
- Árið 1975 endurnýjaði hann spá sína. Fjöldi tóla í smárás tvöfaldast á hverjum 18 mánuðum

# Lögmál Moore's



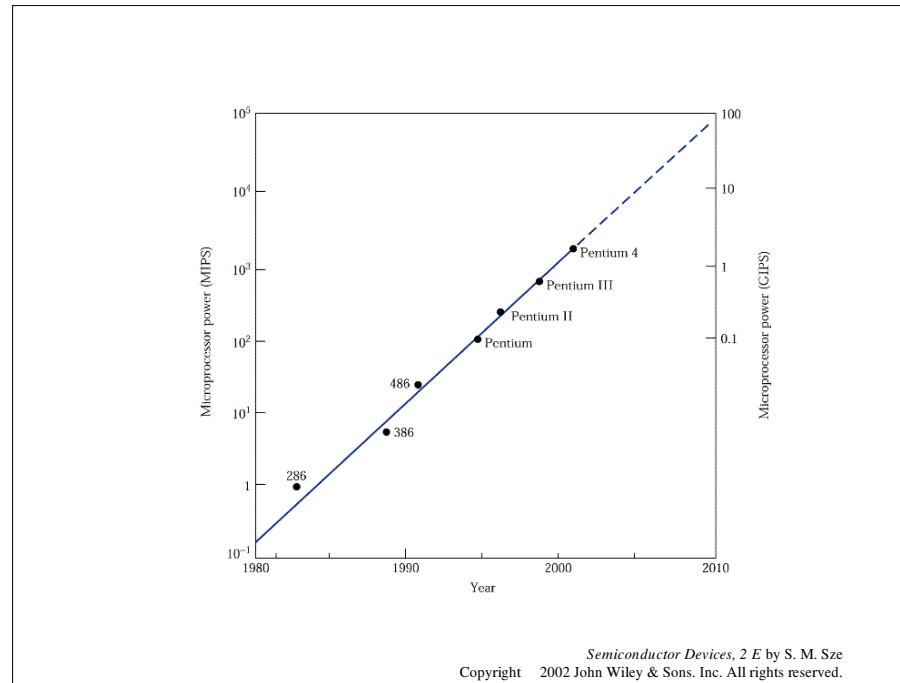
- Fjöldi hliða í smárás tífaldast á hverjum fimm árum

# Lögmál Moore's



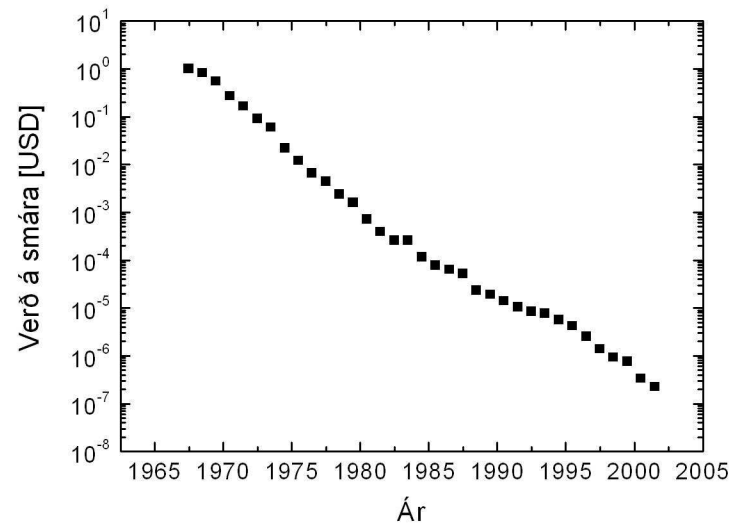
- Minnisþéttleiki DRAM fjórfaldast á hverjum 3 árum

# Lögmál Moore's



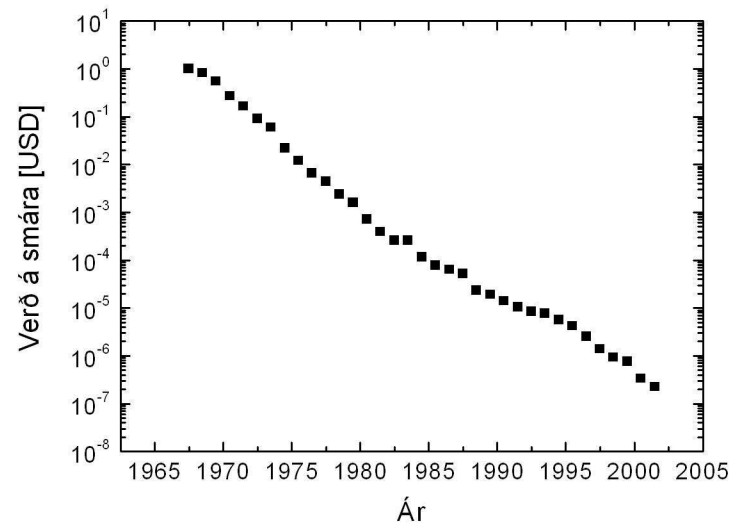
- Klukktíðni hefur tvöfaldast á hverjum þremur árum
- Reikniafl vex veldisvexti

## 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.

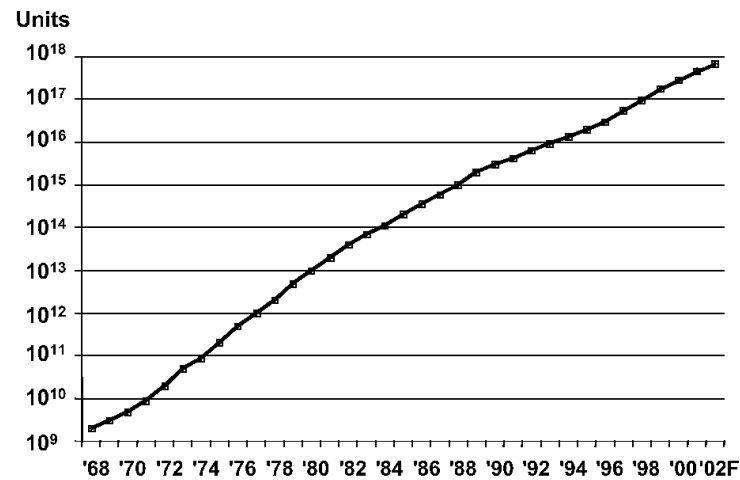
## Lögmál Moore's



- Smærri töl vinna hraðar og draga minna afl
- Þessi gríðarlega lækkun framleiðslukostnaðar ásamt með sífelld aukinni notkun eða neyslu hafa drifið þróunina áfram



# Lögmál Moore's



Source: Dataquest/Intel

Moore, 2003

- Fjöldi seldra smára hefur vaxið um átta stærðargráður á síðast liðnum 30 árum eða að meðaltali 78 % á ári
- “... for every ant in the world today, there are 100 transistors ...”  
Gordon Moore, ISSCC 2003

## Lögmál Moore's

---

---

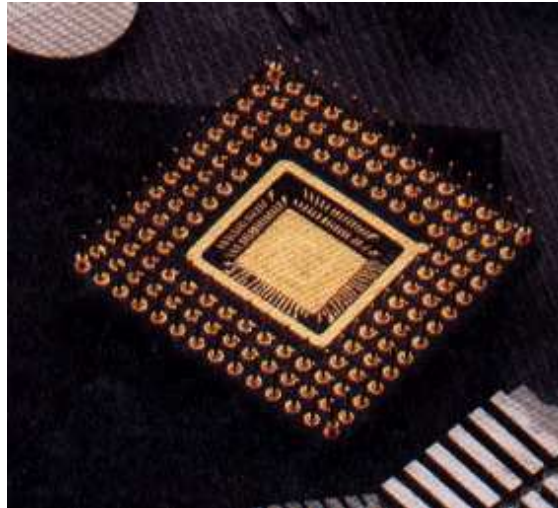
SSI	small scale integration	$< 10^2$ tól á flögu
MSI	medium scale integration	$10^2 - 2 \times 10^3$ tól á flögu
LSI	large scale integration	$2 \times 10^3 - 10^5$ tól á flögu
VLSI	very large scale integration	$10^5 - 10^7$ tól á flögu
ULSI	ultra large scale integration	$10^7 - 10^9$ tól á flögu

---

# Lögmál Moore's



## 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
- Intel Pentium 4 örgjörvinn (90 nm) inniheldur 125.000.000 smára

## Lögmál Moore's

*“Moore's 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

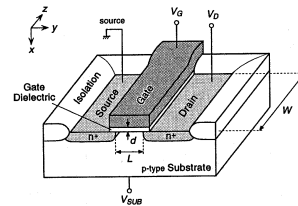
## Lögmál Moore's - Áskorun

- Samtök hálfleiðaraframleiðenda (e. Semiconductor Industrial Association (SIA)) setja reglulega fram áætlun eða spá um þróun iðnaðarins á komandi árum
- Þykkt gáttaroxíðs er komin niður fyrir 1.5 nm (miðað við SiO<sub>2</sub>) og lengd rásar 45 nm
- Intel hefur þegar framleitt smára sem eru 20 nm að stærð (júní 2001)
- Pentium 4 (Intel) byggir á 90 nm rásalengd (febrúar 2004)
- Xenon (Intel) byggir á 45 nm rásalengd (2009)

## Lögmál Moore's - Áskorun

	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

# Skölun



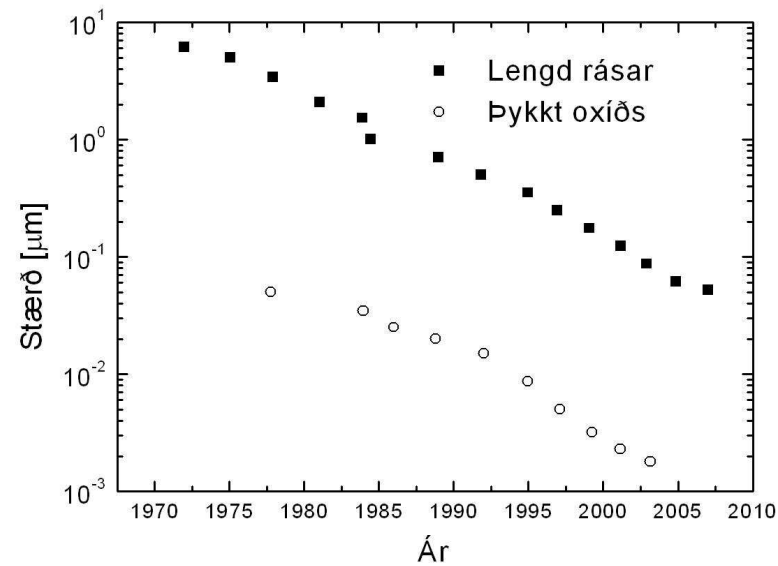
- Við skölun smára verður að skala allar víddir samtímis.
- Jafnframt verður að viðhalda sömu hleðslu á lind-, svelg- og rásasvæðum til að viðhalda lágu viðnámi tólsins
- Skölun smára kallar á aukningu þéttleika rafgjafa- og rafþegaíbótar til að viðhaldið sé heildarhleðslu á lindar- og svelgsvæðunum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



## Leysnimörk

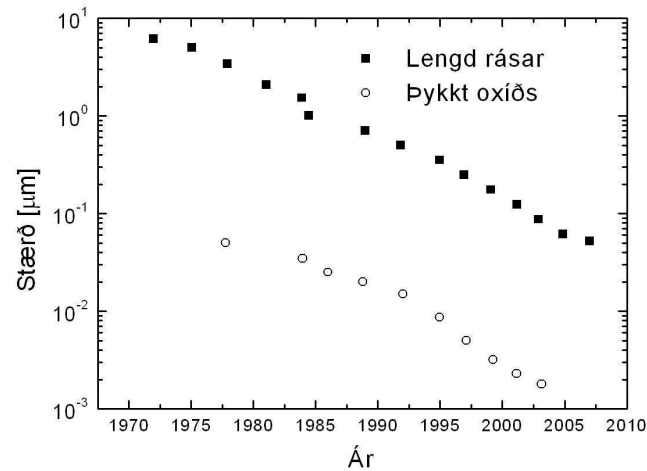
- Náttúran setur efri mörk á það hve mikið má íbæta með tilteknum atómum, leysnimörk
- Leysnimörkin eru varmafræðilegur eiginleiki og því óháð því hvernig íbótin er framkvæmd
- Ofan leysnimarkanna mynda íbótaratómin klasa og setjast ekki í grindarsæti kísils og auka því ekki þéttleika hreyfanlegra hleðslubera
- 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

# Gáttaroxíð



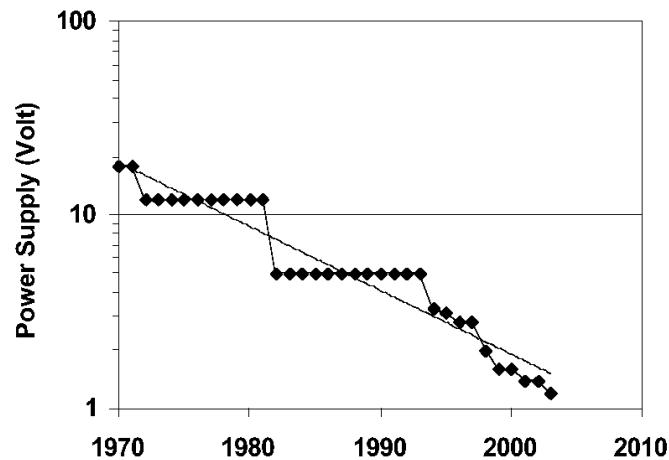
- Gáttaroxíðið er einnig að nálgast minnstu fræðilega þykkt sína.
- Með því að leggja spennu á gáttina dregst hleðsla að eða ýtist frá samskeytum kísils og oxíðs

# Gáttaroxíð



- 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

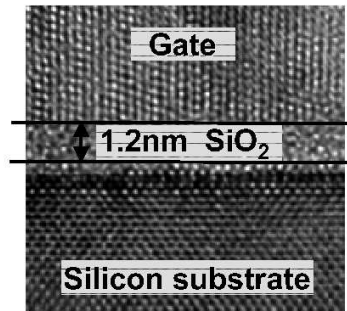
# Lekastraumur



Moore, 2003

- Nauðsynlegt hefur verið að lækka afgangaspennuna  $V_{dd}$  vegna lekastrauma og áreiðanleika
- Jafnframt því að skala afgangaspennuna niður hefur þykkt oxíðsins verið minnkuð til að viðhalda rafsviðsstyrknum

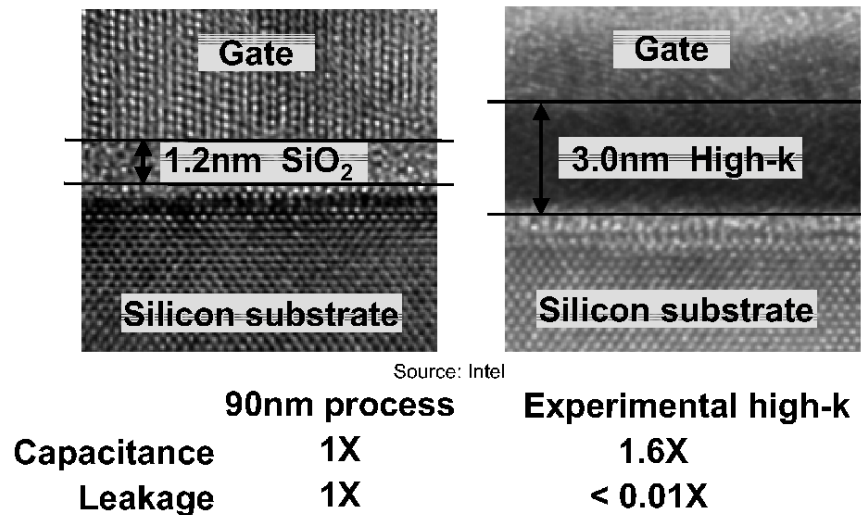
# Lekastraumur



Moore, 2003

- 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
- Þykkt oxíðs þarf að vera um 1.5 – 2 nm, sem samsvarar 3 til 4 atómlögum
- Fyrir þessa þykkt er smugstraumur um oxíðlagið verulegur

# Lekastraumur



Moore, 2003

- Ef kísíloxíð er notað sem rafsvári verður einangrarinn bara nokkur atómlög á þykkt
- Hér má nota efni með hærri rafsvörunarstuðul (t.d.  $\text{HfO}_2$ ) sem gefur sama rafsviðsstyrk með þykkari einangrara og þannig frestað þessu vandamáli

## Millitengi-rafsvararar

- 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

## Lithography

- 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

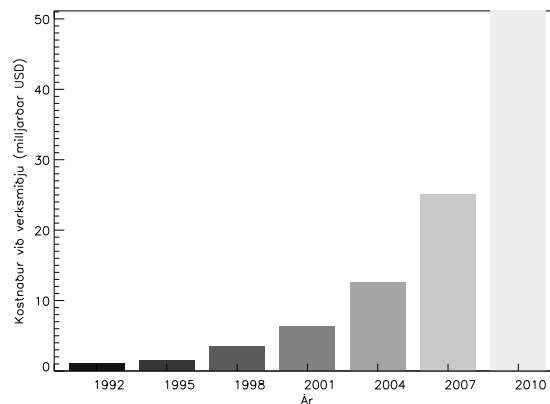


## Íbót

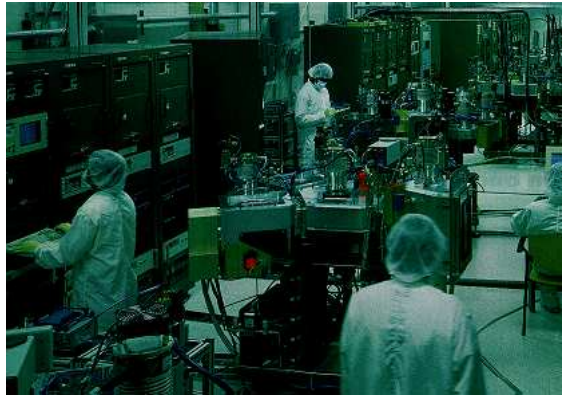
- Víddir smárans eru orðnar það litlar að fjöldi íbótaratóma sem stjórna rafeiginleikunum er af stærðargráðunni 100
- Lítil breyting í fjölda og dreifingu atómanna getur því valdið mikilli breytingu í rafeiginleikum smárans
- Fyrir rás sem inniheldur 10 milljón smára veldur þetta tilviljanakennda flökkt 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

## Annað lögmál Moore's

- Veldisaukning á flækjustigi smárása er nátengdur veldisvexti markaðarins fyrir smárásir, sem hefur nálega tvöfaldast á hverjum fimm árum
- 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, tvöfaldast með hverri nýrri kynslóð



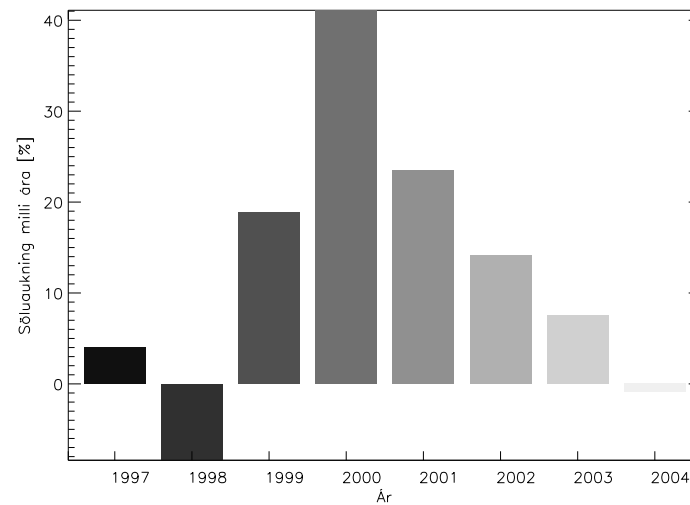
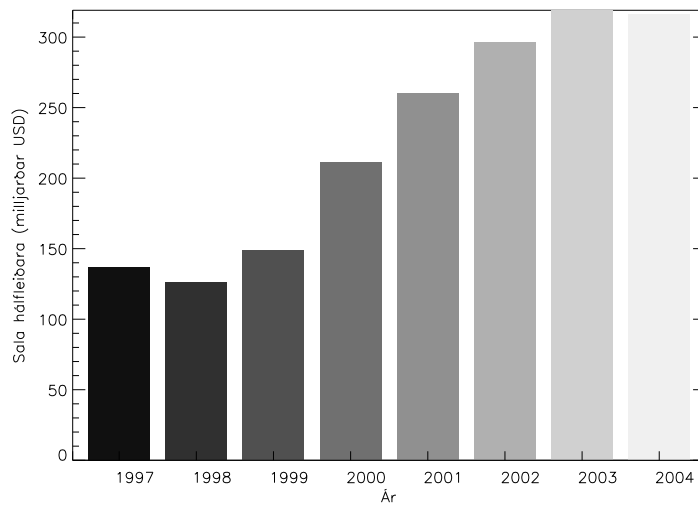
## Annað lögmál Moore's



Kostnaður við nýja verksmiðju:

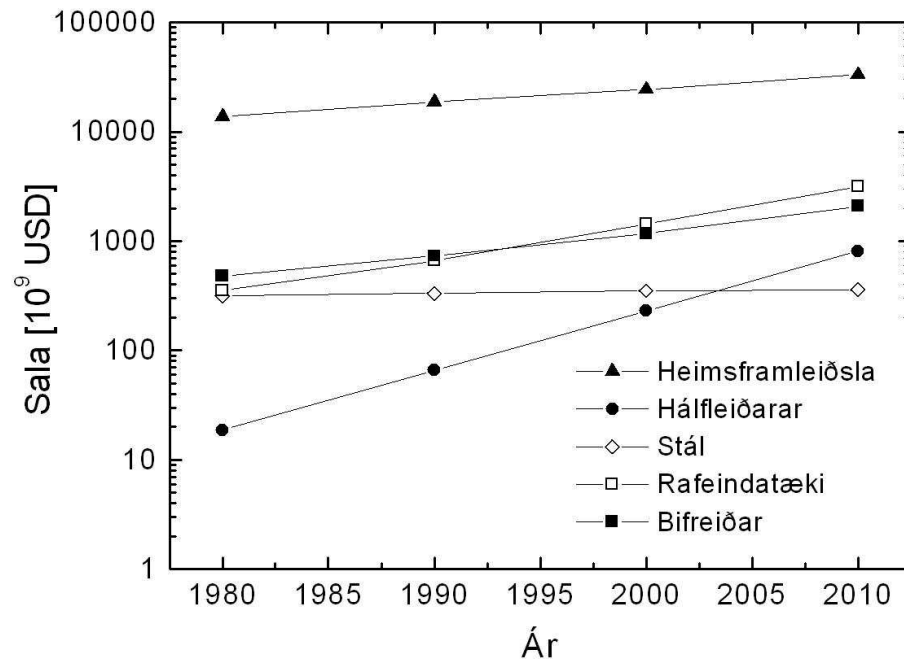
- 1966 USD 14.000.000
- 1995 USD 1.000.000.000
  - sem er  $\sim 1\%$  árs markaðarins
- 2010 USD 50.000.000.000
  - sem er  $\sim 10\%$  árs markaðarins

# Hagfræðin



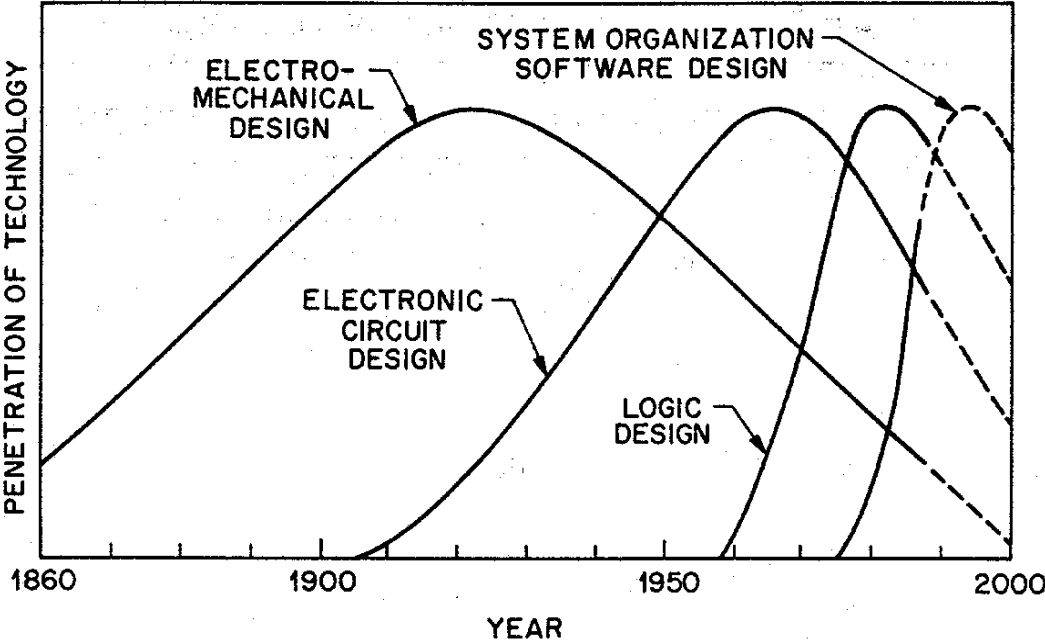
- Heimsmarkaður fyrir hálfleiðaratól fer hratt vaxandi

# Hagfræðin



- Heimsframleiðsla (GWP) og sala rafeinda-, bifreiða-, hálfleiðara og stáliðnaðarins á árunum 1980 – 2000 og spá til ársins 2010

# Hagfræðin



# Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2ed., John Wiley & Sons, 2002, kafla 1
- [2] G. E. Moore, Cramming more components onto integrated circuits, *Electronics*, **38**(8)(1965)
- [3] R. B. Schaller, Moore's law: past, present and future, *IEEE Spectrum*, **34**(6)(1997) 53 - 59
- [4] J. M. Rabaey, *Digital integrated circuits: A design perspective*, Prentice - Hall, 1996
- [5] S. M. Sze, Introduction, in *VLSI Technology*, editor S. M. Sze, McGraw-Hill, 1988
- [6] P. A. Packan, Pushing the limits, *Science*, **285**, (1999) 207 – 208
- [7] J. Birnbaum and R. S. Williams, Physics and the Information Revolution, *Physics Today*, **53**, (1)(2000) 38 – 42
- [8] G. E. Moore, No exponential is forever: but "Forever" can be delayed !, *Solid-State Circuits Conference, 2003. Digest of Technical Papers. ISSCC. 2003 IEEE International*, 9-13 Feb. 2003 Pages:20 - 23 vol.1