

Framleiðsla smárása:

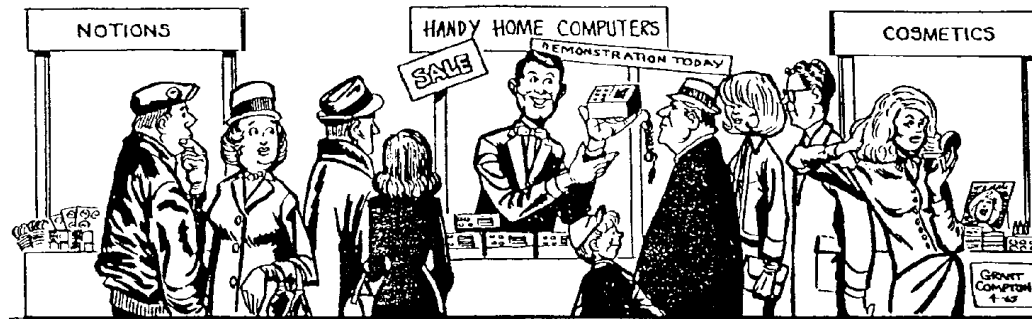
Lögmál Moore

kafli 1 b

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

1. vika haust 2018

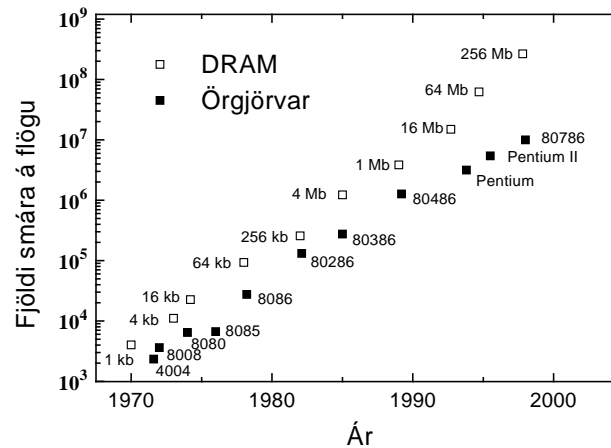


Integrated circuits will lead to such wonders as home computers—or at least terminals connected to central computer—automatic controls for automobiles, and personal portable communication equipment.

Gordon E. Moore, 1965

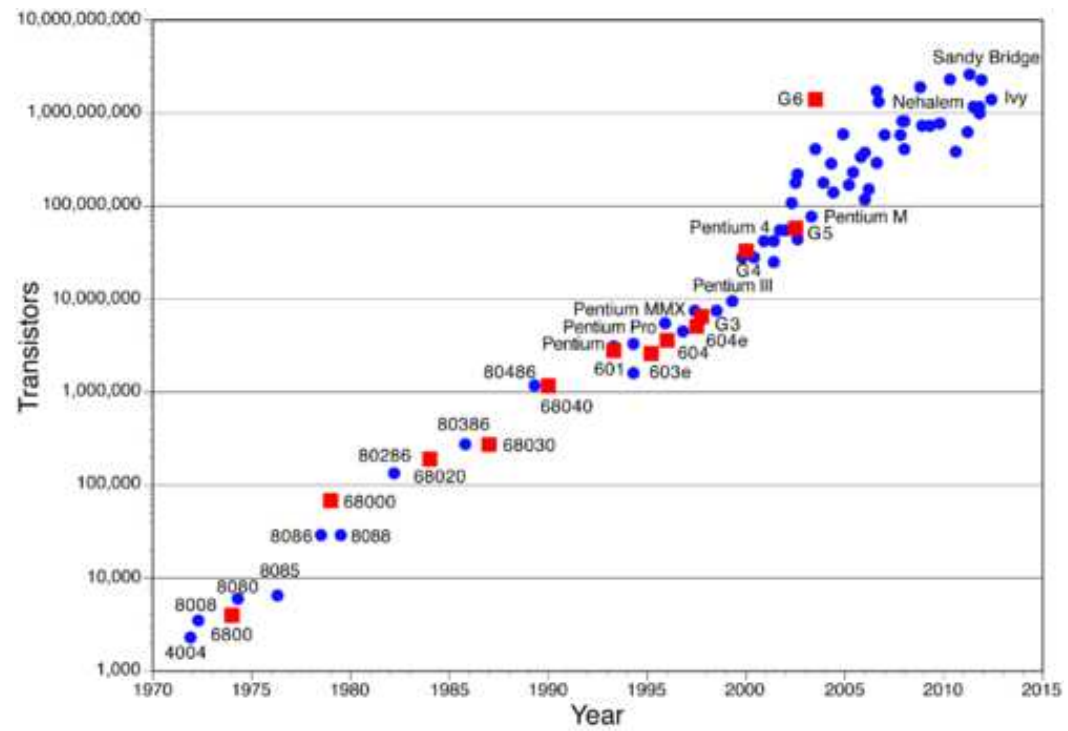
Lögmál Moore's

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

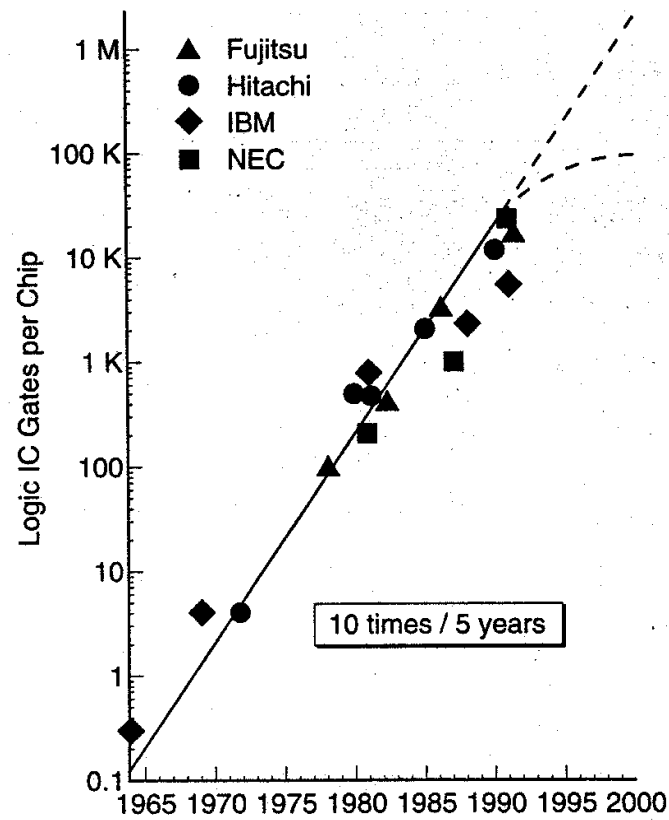


- Hann spáði að fjöldi tóla í smárás myndi tvöfaldast á hverju ári
- Árið 1975 endurnýjaði hann spá sína. Fjöldi tóla í smárás tvöfaldast á hverjum 18 mánuðum

Lögmál Moore's

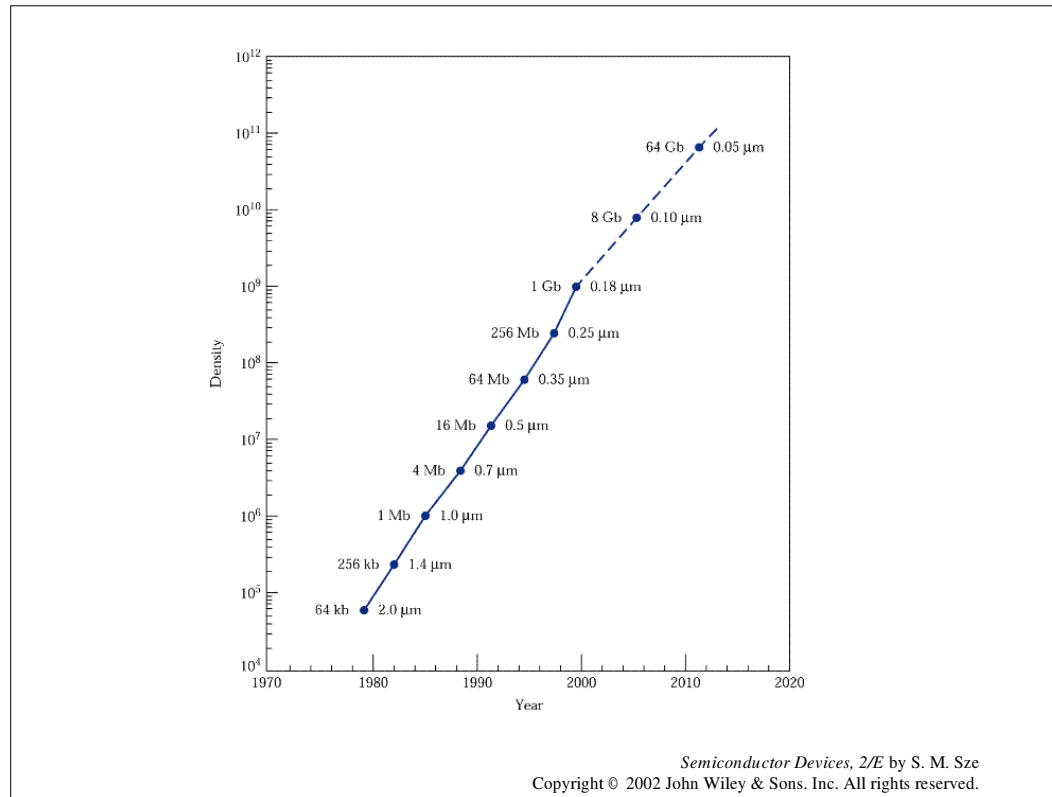


Lögmál Moore's



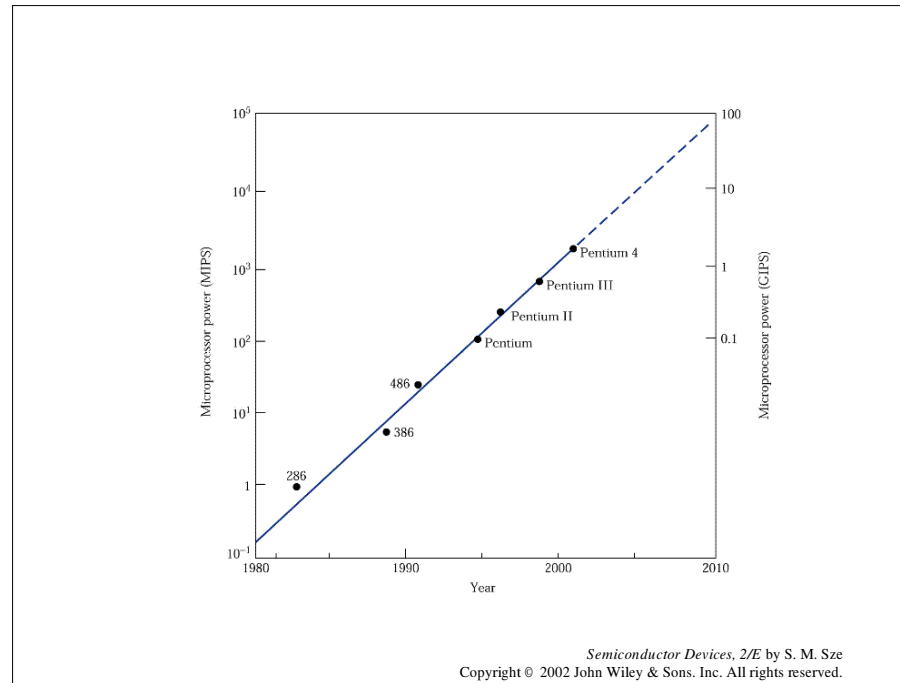
- Fjöldi hliða í smárás tífaldast á hverjum fimm árum

Lögmál Moore's



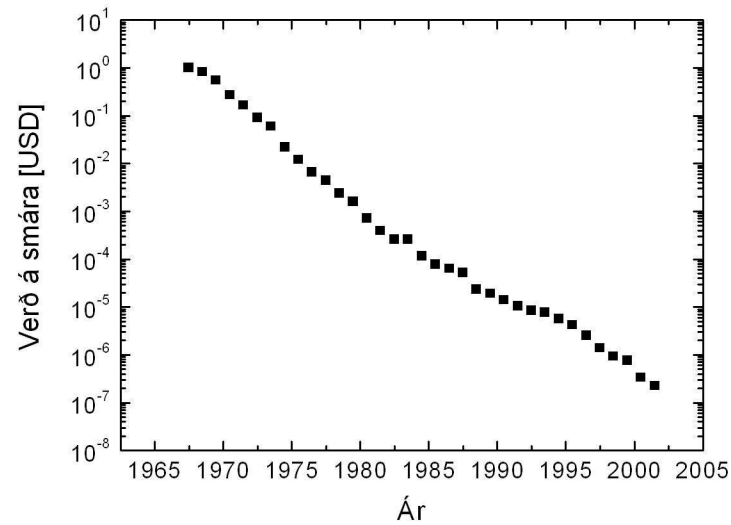
- Minnisþéttleiki DRAM fjórfaldast á hverjum 3 árum

Lögmál Moore's



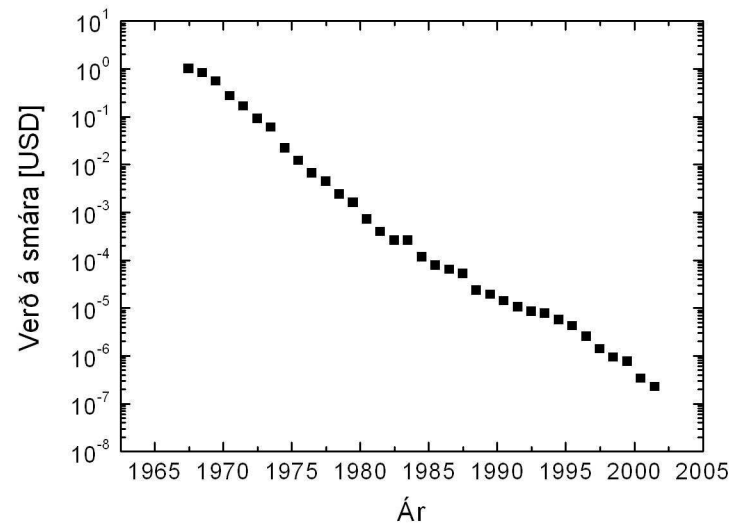
- Klukktíðni hefur tvöfaldast á hverjum þremur árum
- Reikniafl vex veldisvexti

Lögmál Moore's



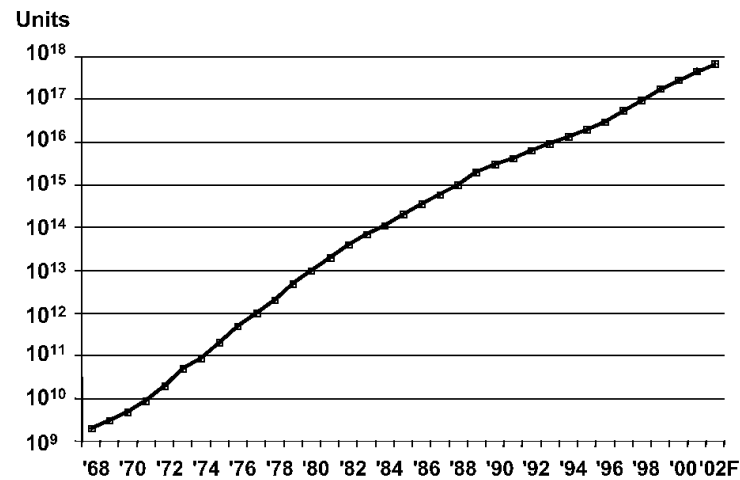
- Smækkun tóla hefur leitt til lækkunar kostnaðar á hverja aðgerð
- Kostnaður á hvern bita í minniseiningu hefur helmingast á hverjum 2 árum.

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

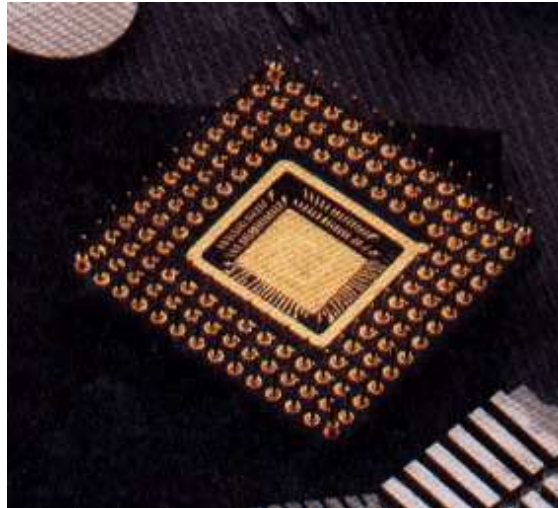
Lögmál Moore's

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

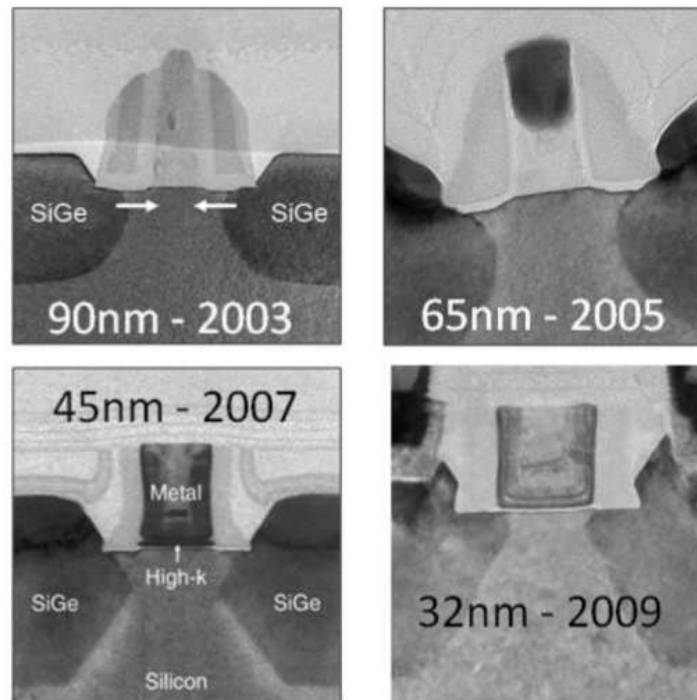
Lögmál Moore's - Áskorun

- 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 SiO₂) og lengd rásar 22 nm
- Intel hefur þegar framleitt smára sem eru 20 nm að stærð (júní 2001)
- Pentium 4 (Intel) byggir á 90 nm rásalengd (febrúar 2004)
- Xeon (Harpertown) (Intel) byggir á 45 nm rásalengd (2007) og Ivy Bridge-EX byggir á 22 nm rásalengd (2014)
- Xeon (Intel) er byggður á finFET með 14 nm node (2016)

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

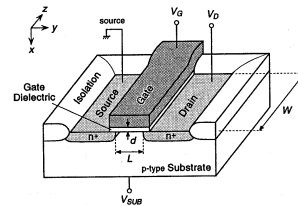
Lögmál Moore's - Áskorun



Kelin J. Kuhn, *IEEE Transaction on Electron Devices* **59** (7) (2012) 1813

- Próun MOSFET frá 90 nm (2003) til 32 nm (2009)

Skölun

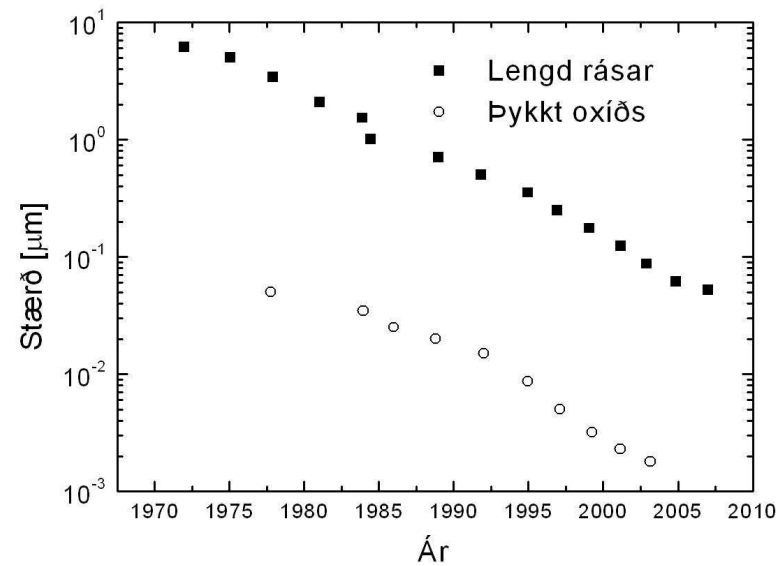


- Við skölun smára verður að skala allar víddir samtímis.
- Jafnframt verður að viðhalda sömu hleðslu á lind-, svelg- og rásasvæðum til að viðhalda lágu viðnámi tólsins
- Skölun smára kallar á aukningu þéttleika rafgjafa- og rafþegaíbótar til að viðhaldið sé heildarhleðslu á lindar- og svelgsvæðunum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

Leysnimörk

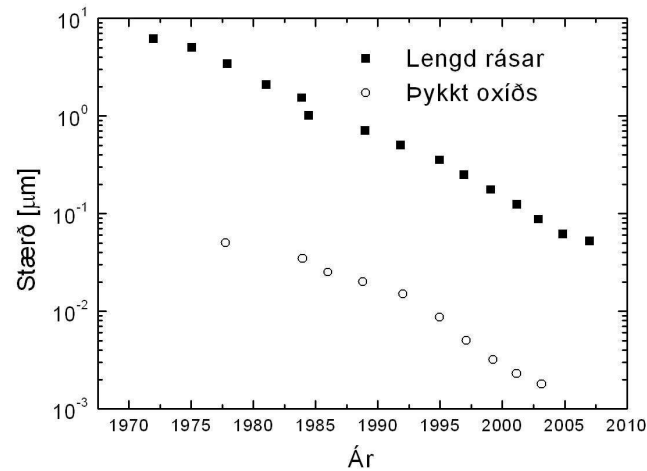
- Náttúran setur efri mörk á það hve mikið má íbæta með tilteknum atómum, leysnimörk
- Leysnimörkin eru varmafræðilegur eiginleiki og því óháð því hvernig íbótin er framkvæmd
- Ofan leysnimarkanna mynda íbótaratómin klasa og setjast ekki í grindarsæti kísils og auka því ekki þéttleika hreyfanlegra hleðslubera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



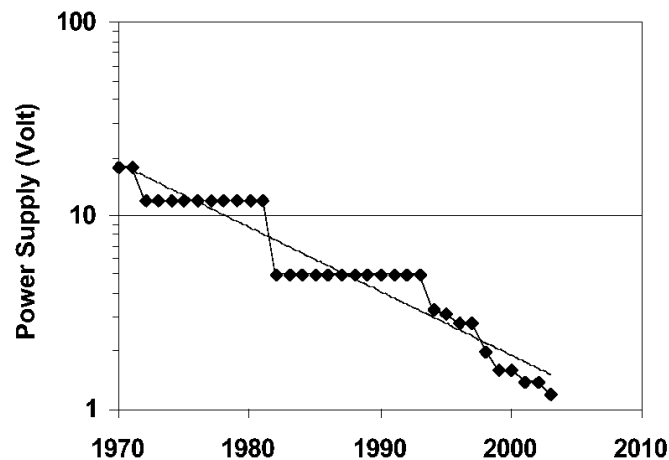
- Gáttaroxíðið er einnig að nálgast minnstu fræðilega þykkt sína.
- Með því að leggja spennu á gáttina dregst hleðsla að eða ýtist frá samskeytum kísils og oxíðs

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

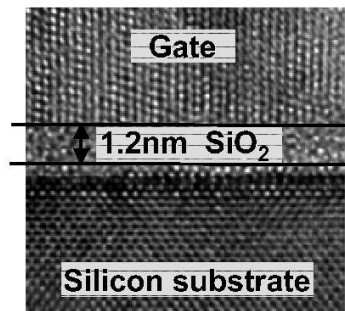
Lekastraumur



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

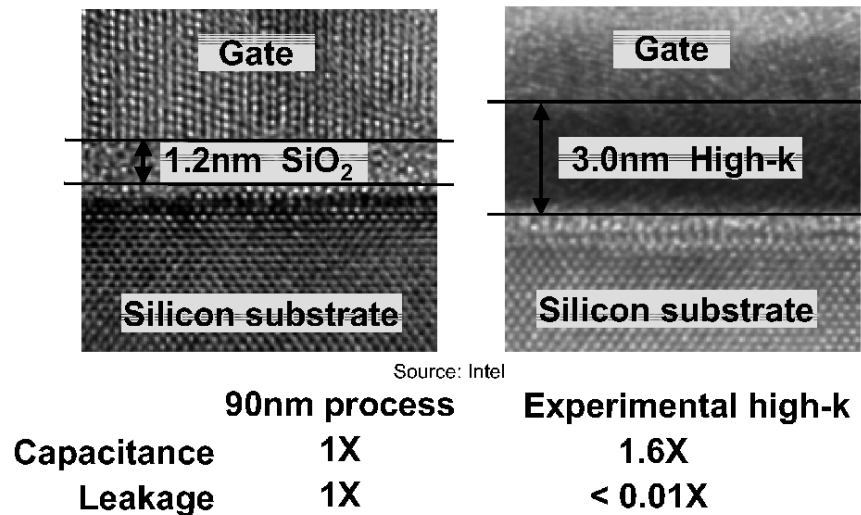
Lekastraumur



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 rafsvari verður einangrarinn bara nokkur atómlög á þykkt
- Hér má nota efni með hærri rafsvörunarstuðul (t.d. 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

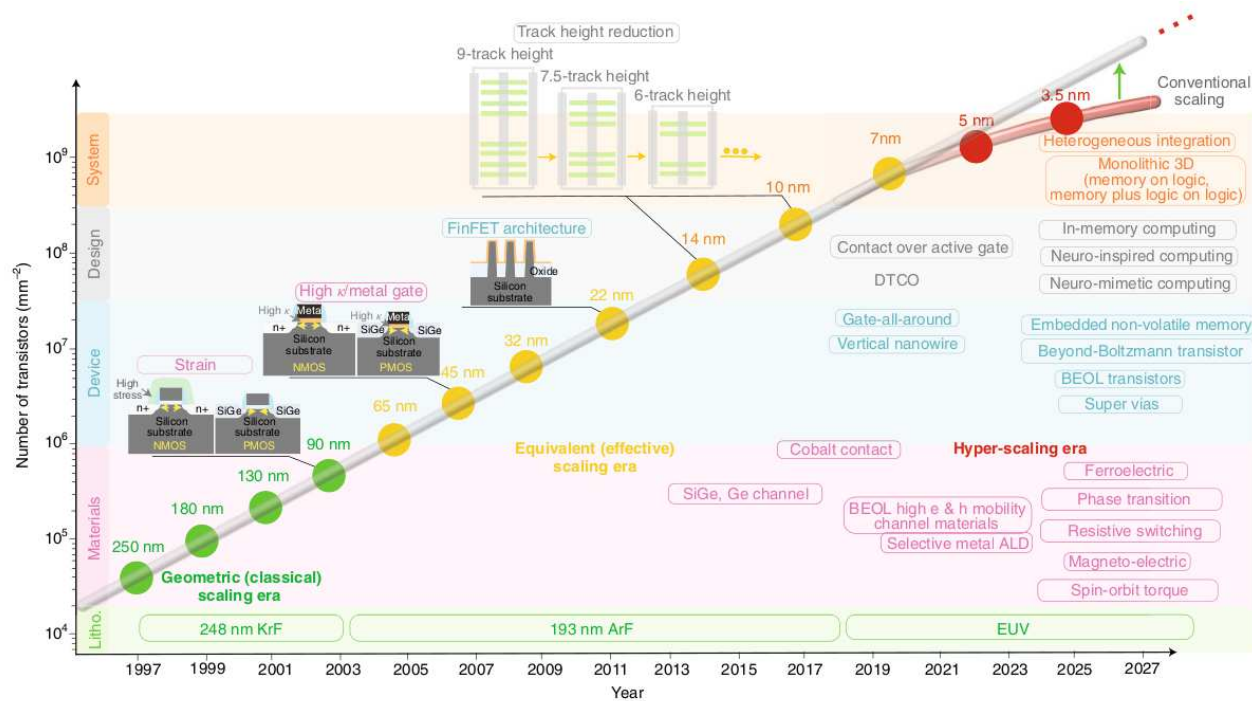
Lithography

- 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

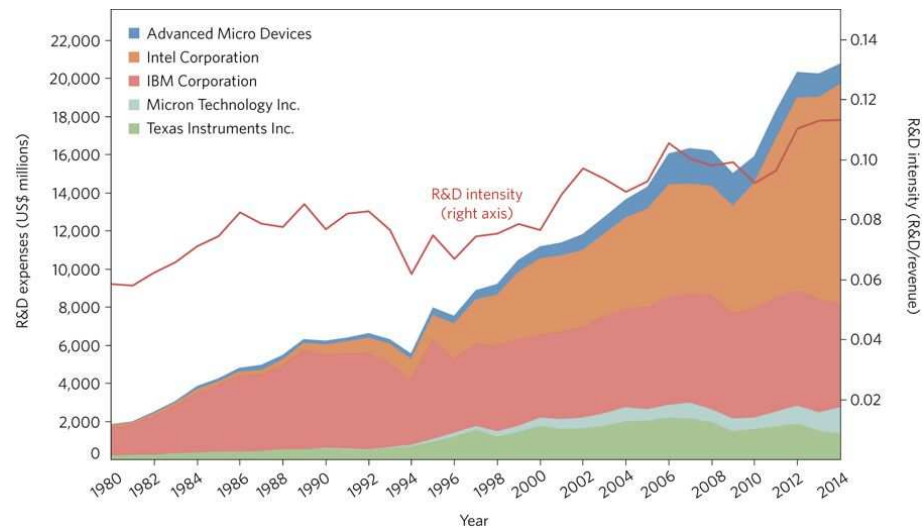
Hin þrjú tímabil skölunar



Sayef Salahuddin, Kai Ni and Suman Datta, Nature Electronics 1(8) 442–450 (2018)

geometric (or classical) scaling, equivalent (or effective) scaling, hyper-scaling (or functional diversification)

Annað lögmál Moore's

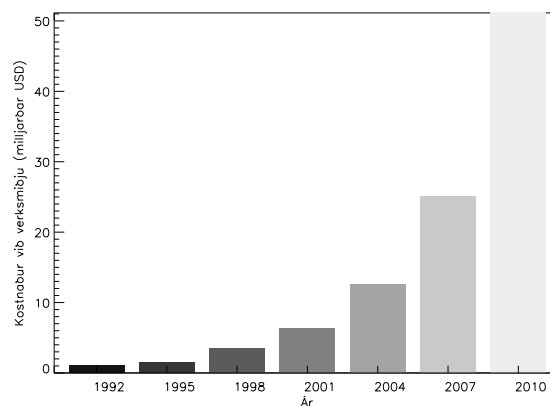


Hassan N. Khan, David A. Hounshell and Erica R. H. Fuchs, *Nature Electronics* **1** (1) (2018) 14 – 21

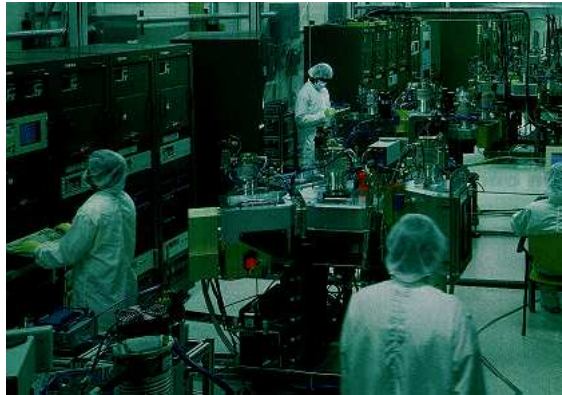
- Þróunarkostnaður í hálfleiðaraiðnaðinum í BNA fór að vaxa hratt undir lok tíunda áratugs tuttugustu aldar þegar nýar tæknilegar áskoranir fóru að veða þyngra

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



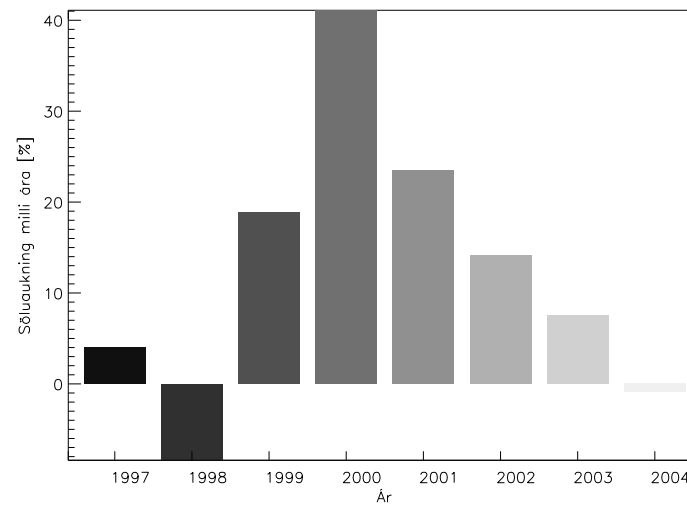
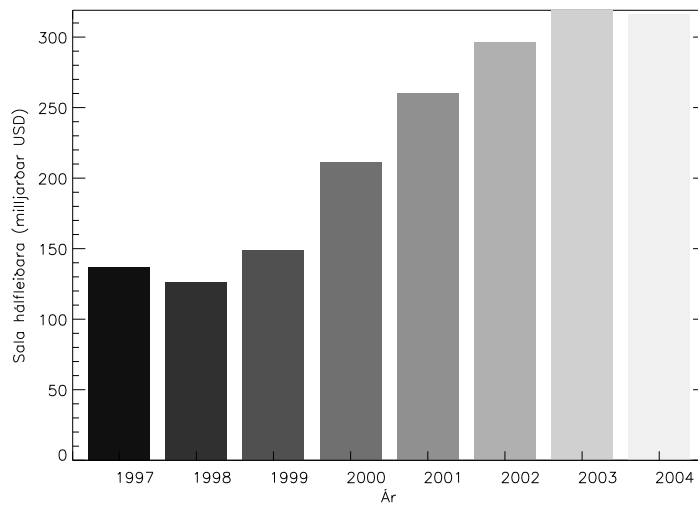
Annað lögmál Moore's



Kostnaður við nýja verksmiðju:

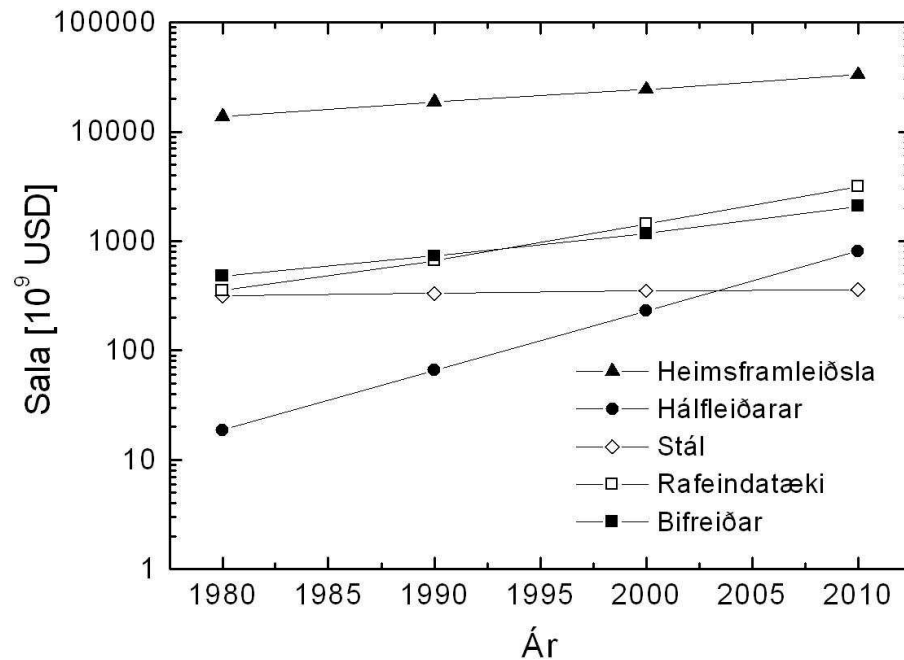
- 1966 USD 14.000.000
- 1995 USD 1.000.000.000
 - sem er $\sim 1\%$ árs markaðarins
- 2010 USD 50.000.000.000
 - sem er $\sim 10\%$ árs markaðarins

Hagfræðin



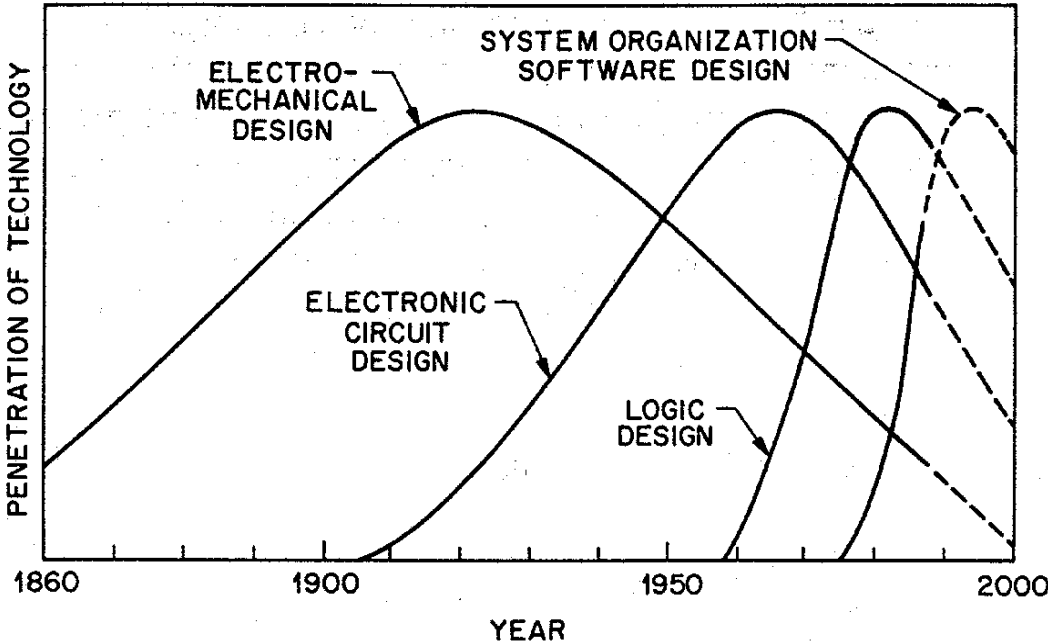
- Heimsmarkaður fyrir hálfleiðaratól fer hratt vaxandi

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, kaffi 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
- [9] Hassan N. Khan, David A. Hounshell and Erica R. H. Fuchs, Science and research policy at the end of Moore's law, *Nature Electronics* **1** (1) (2018) 14 – 21
- [10] Sayeef Salahuddin, Kai Ni and Suman Datta, *Nature Electronics* **1**(8) 442–450 (2018)