

Nanótækni:

Rafeindatækni - Lögmál Moore um alla eilífð?

Jón Tómas Guðmundsson

Verkfræðideild Háskóla Íslands

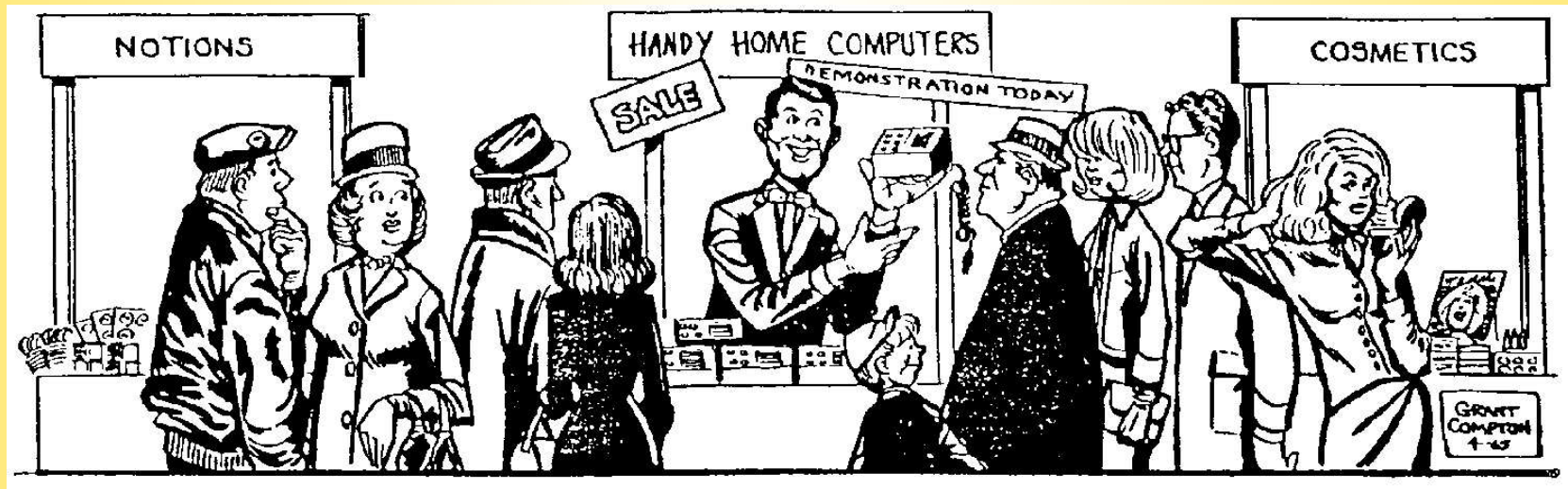
og

Viðar Guðmundsson

Raunvísindastofnun Háskólans

tumi@hi.is

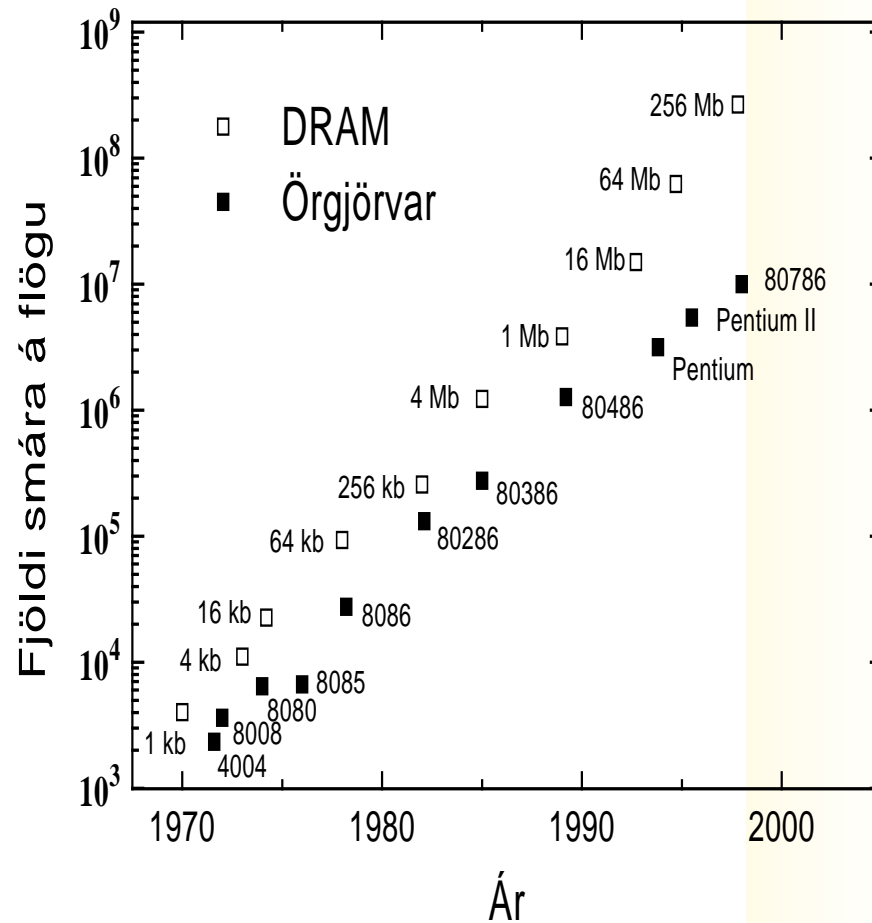
vidar@raunvis.hi.is



***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.*

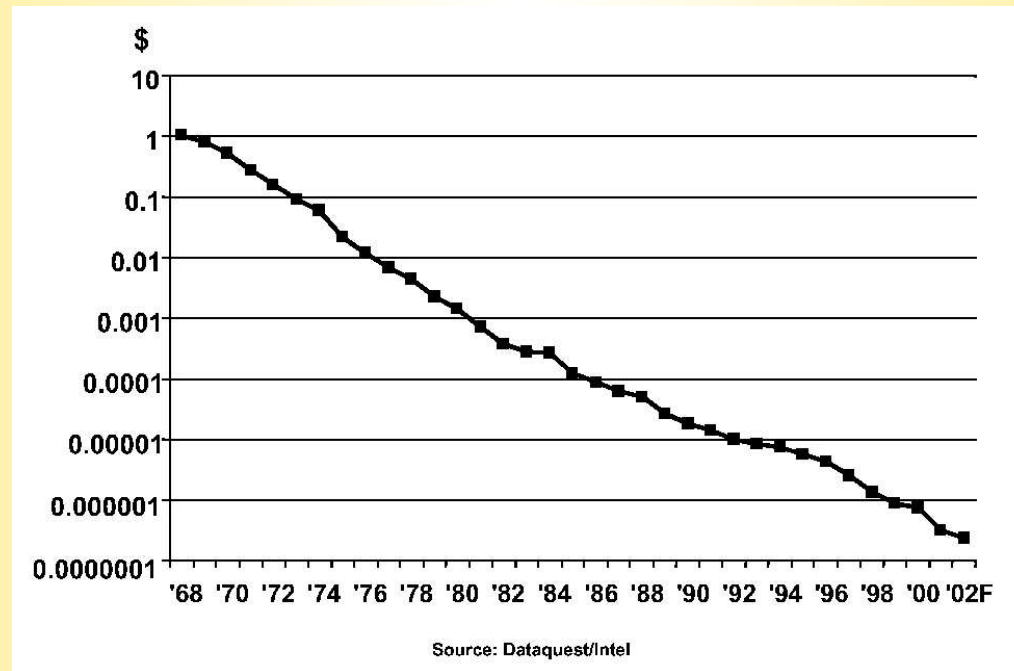
Gordon E. Moore [Moore, 1965]

Lögmál Moore's



- Í apríl 1965 var Gordon E. Moore, þá hjá Fairchild Semiconductors, beðinn 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

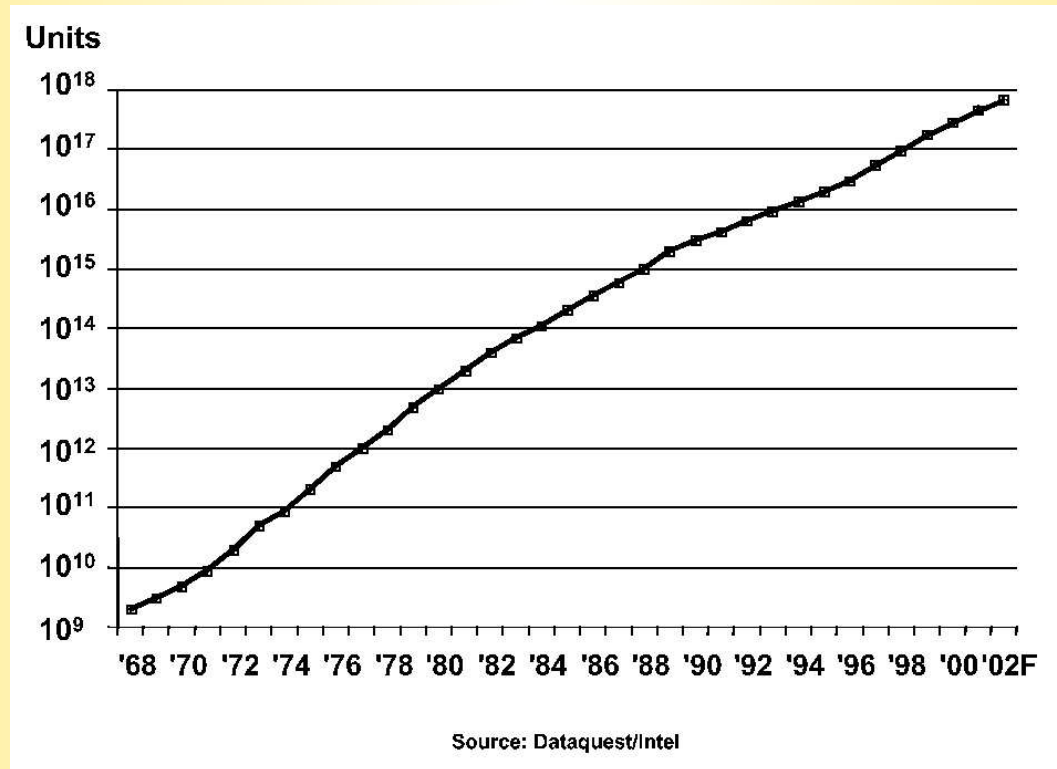
Lögmál Moore's



[Moore, 2003]

- Kostnaður/bita í minniseiningu hefur helmingast á hverjum 2 árum.
- Smærri tól vinna hraðar
- Smærri tól draga minna afl
- **Smækkun tóla** → minni kostnaður á hverja aðgerð
- Gríðarlega lækkun framleiðslukostnaðar + sífelld aukin notkun → **frekari þróun**

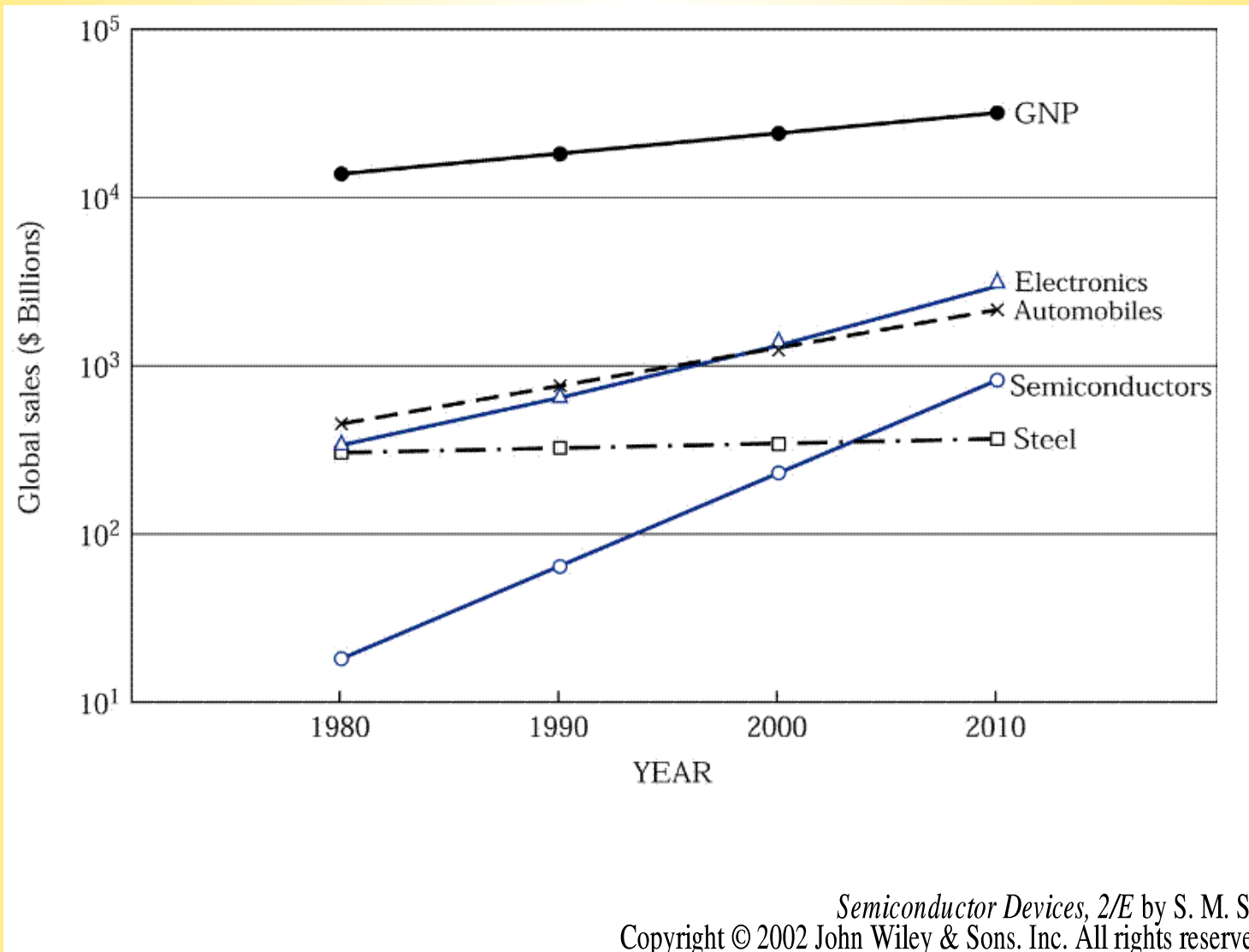
Lögmál Moore's



[Moore, 2003]

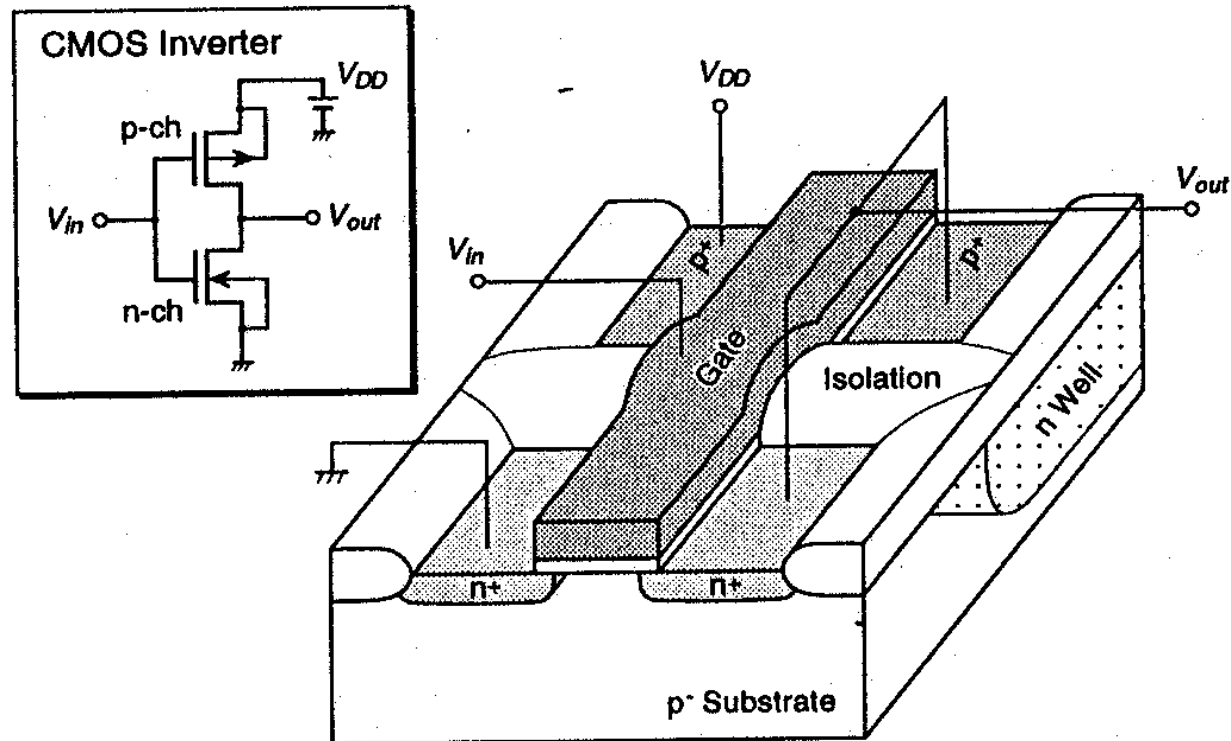
- Fjöldi seldra smára hefur vaxið um átta stærðargráður á 30 árum ~ **78 % á ári**
- “... for every ant in the world today, there are 100 transistors ...” Gordon Moore, ISSCC 2003

Lögmál Moore's



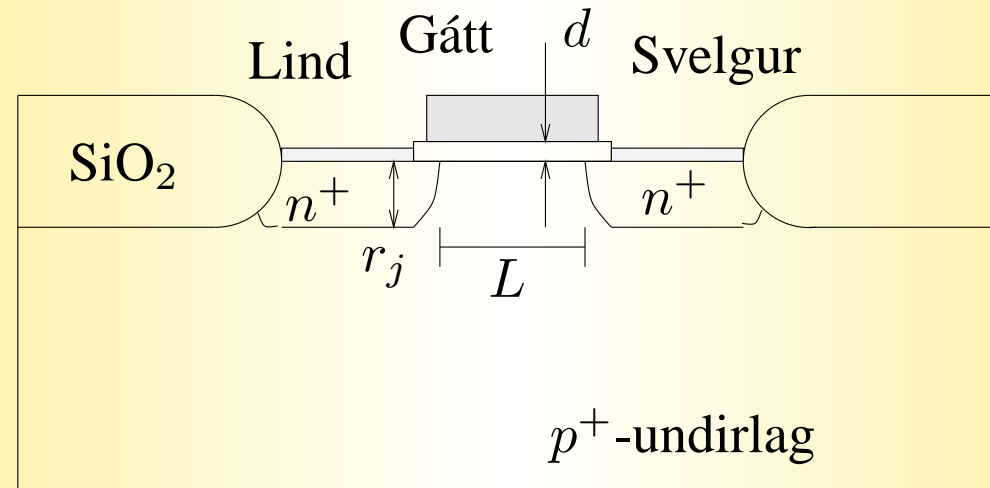
- **Heimsframleiðsla (GWP) og sala rafeinda-, bifreiða-, hálfleiðara og stáliðnaðarins á árunum 1980 – 2000 og spá til ársins 2010**

MOS



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

MOS



- Rásalengd L , þykkt oxíðlagsins d , dýpt samskeyta r_j , íbót undirlags N_A
- Lind og svelgur eru rafrænt einangruð frá hvort öðru með rásinni
- Gáttin er aðskilin frá rásinni með einangrandi kísiloxíði
- Með spennu á gáttinni yfir einangrandi oxíðið er mynduð leiðandi braut í rásinni milli lindar og svelgs
- Smárinn er **stafrænn rofi** þar sem **gáttarspennan** stýrir því hvort hann er opinn eða lokaður

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...”

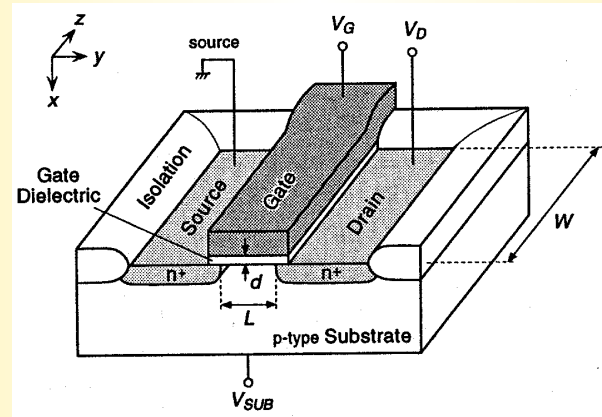
- *Það sem vegið hefur þyngst í þessari þróun er sífelld smækkun einstakra smára*
- *Nú er svo komið að minnstu einingar smára nálgast víddir atómsins*
- *Það er raunhæft að gera ráð fyrir að hægja muni á þessari þróun*

Lögmál Moore's - 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
- Intel hefur þegar framleitt smára sem eru 20 nm að stærð (júní 2001)

	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

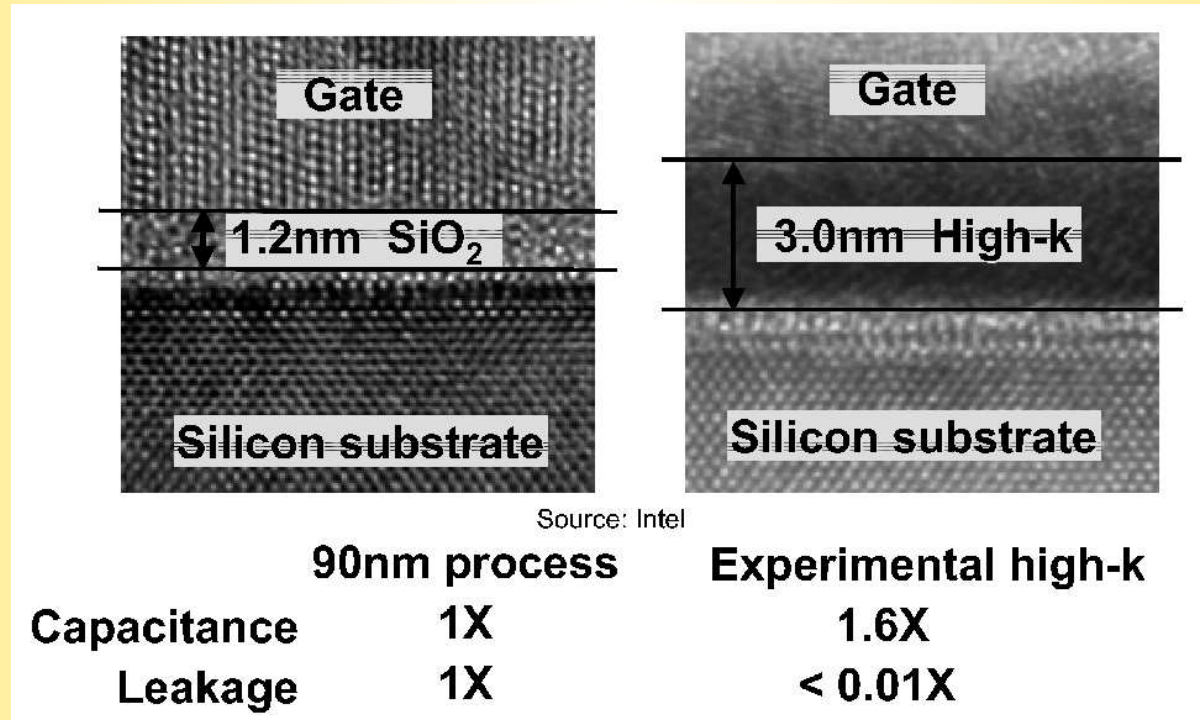


- **Við skölun smára verður að skala allar víddir samtímis.**
- Jafnframt verður að viðhalda sömu hleðslu á lind-, svelg- og rásasvæðum til að viðhalda lágu viðnámi tólsins
- Skölun smára kallar á aukningu þéttleika íbótar til að viðhaldið sé heildarhleðslu á lindar- og svelgsvæðunum
- Íbótarþéttleiki 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

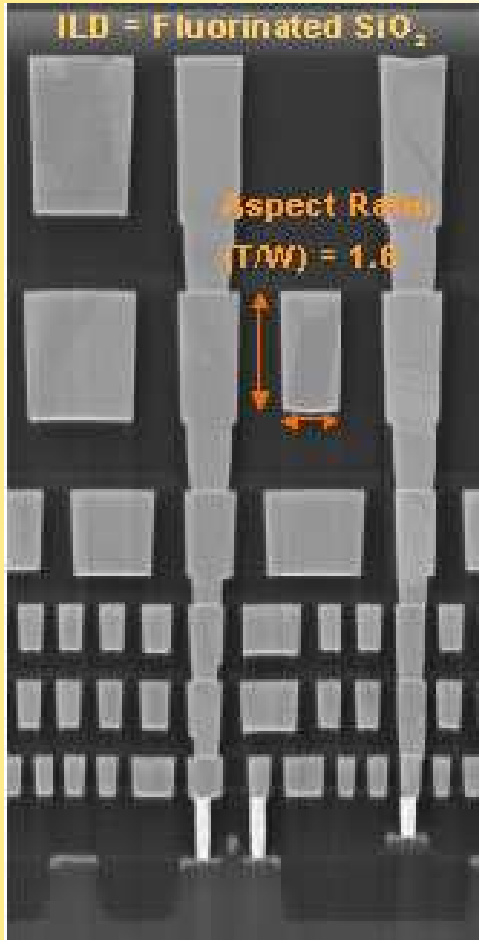
Lekastrumur



Moore, 2003

- Ef kísíloxíð er notað sem rafsvari verður einangrarinn bara **nokkur atómlög á þykkt**
- Hér má nota efni með hærri rafsvörunarstuðul sem gæfi sama rafsviðsstyrk með þykkari einangrara og þannig frestað þessu vandamáli

Millitengi-rafsvorarar



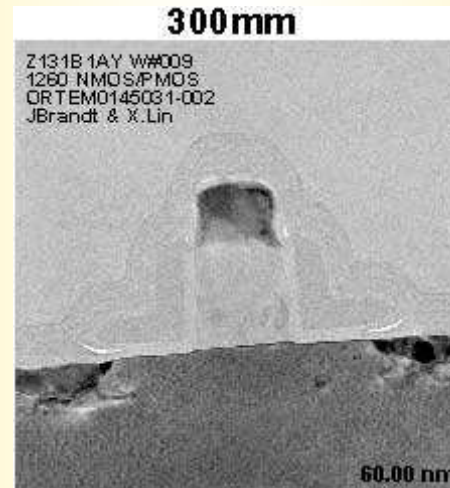
[Thompson et al., 2002]

- 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

- Frá því að fyrsta smárásin var byggð hefur **mynstrið verið flutt yfir á rásina með sýnilegu ljósi**
- Með stöðugri smækkun minnstu eininga gefa ljósgjafarnir sífelld styttri bylgjulengdir, og í dag er notað útfjólublátt ljós (193 nm)
- Þrátt fyrir að hægt sé að framleiða smárásir sem eru minni en bylgjulengd 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 er verið er að skoða þá möguleika að skrifa rásina á flöguna með rafeindageisla

Íbót

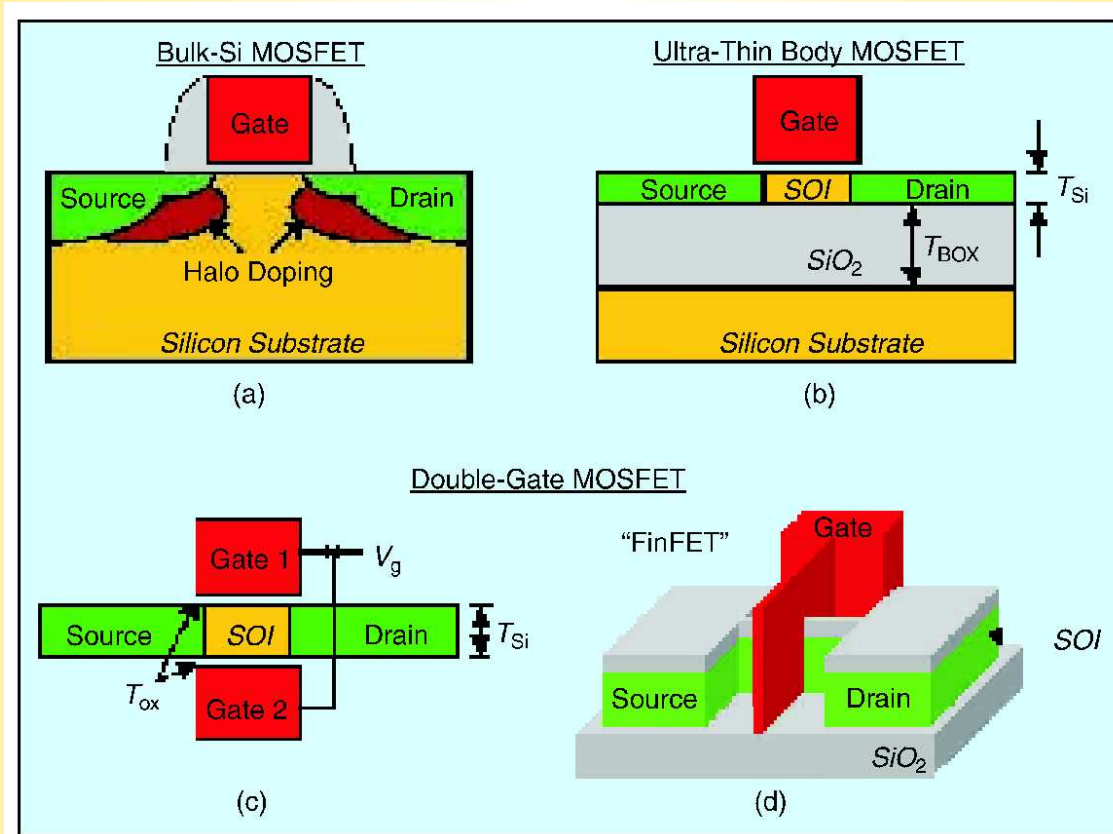


[Natarajan et al., 2002]

- 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

[Packan, 1999]

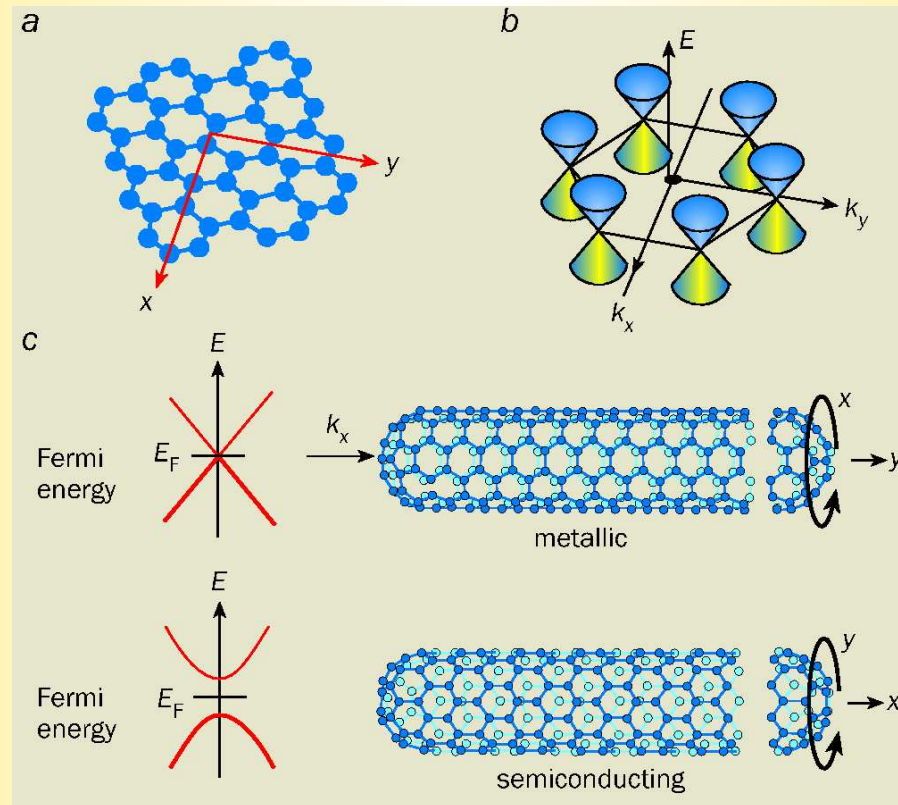
Aðrir FETar



(Chang 2003)

- Vegna takmarkanna í minnstu þykkt gáttaroxíðs og dýpt lindar- og svelgsvæða mun reynast ómögulegt að minnka smára niður fyrir 100 nm
- Til að yfirvinna þau tæknilegu vandamál verður að koma til **ný hönnun, nýjar byggingaraðferðir og ný efni**

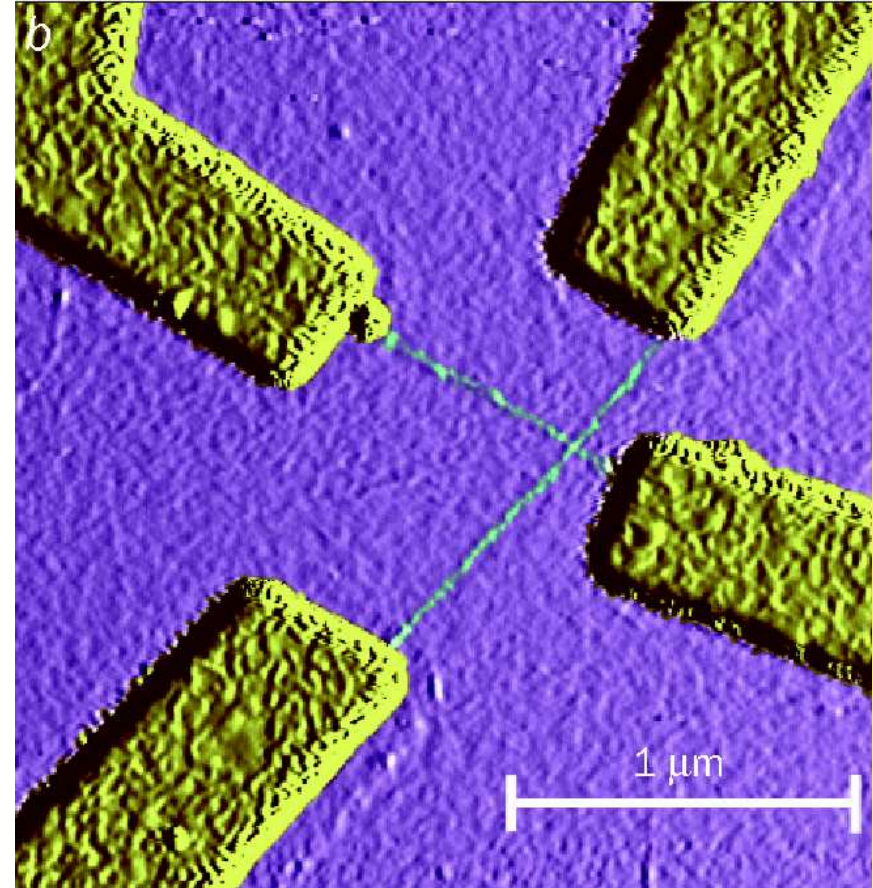
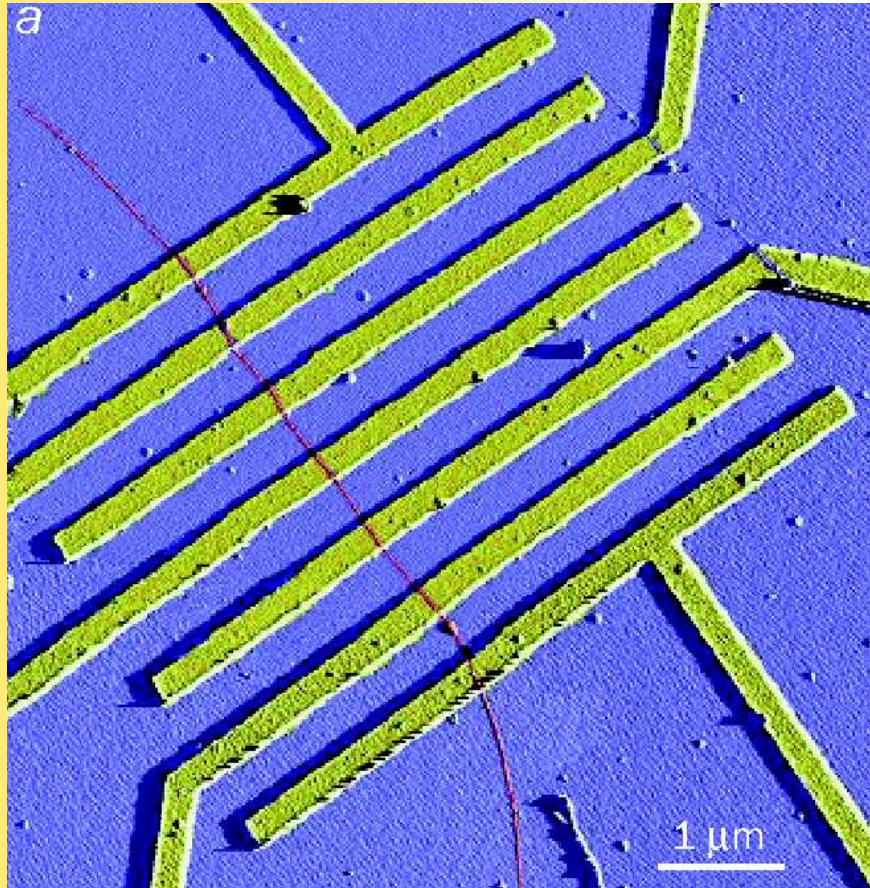
Kolrör



[McEuen, 2000]

- Kolrör eru grafítþynnur sem er rúllað upp í sívalninga
- Það ræðst af **hendninni** (e. chirality) hvort sívalningarnir eru **málm- eða hálfleiðandi**
- Orkugeil hálfleiðandi kolröra ræðst af þvermáli sívalningsins
Kolrör af þvermáli 1 – 2 nm hafa orkugeil sem er minni en 1 eV

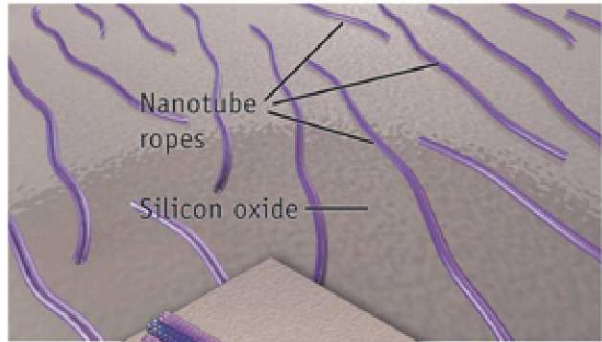
Kolrör



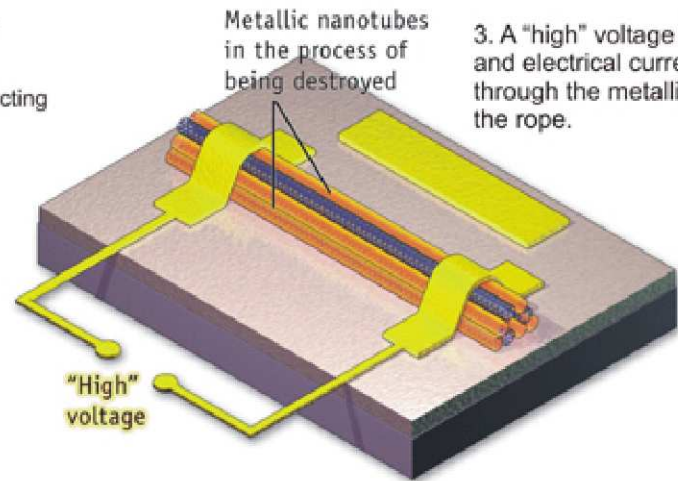
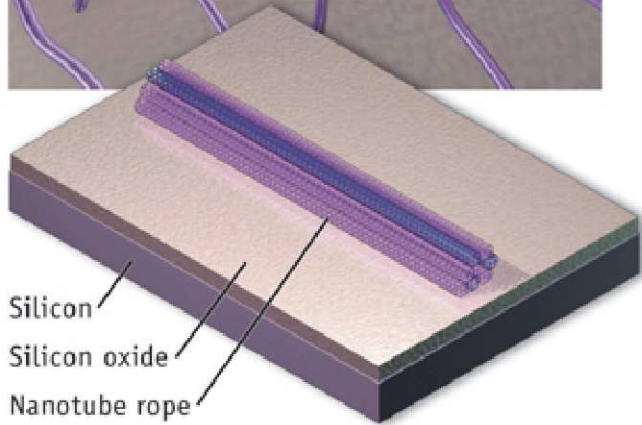
[McEuen, 2000]

- Kolrör má nota sem **virka einingu** (rásina) í FET

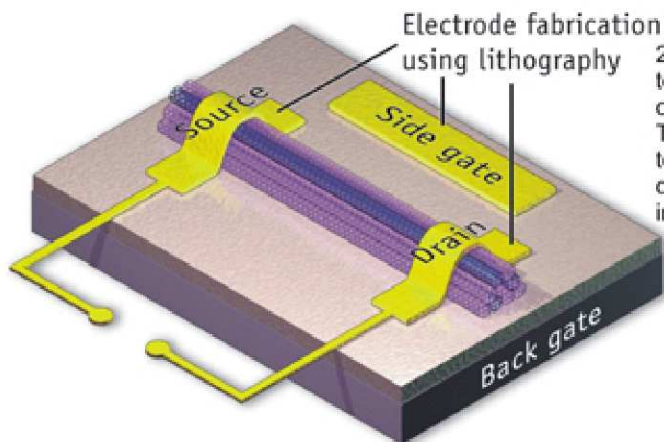
kolrörFET



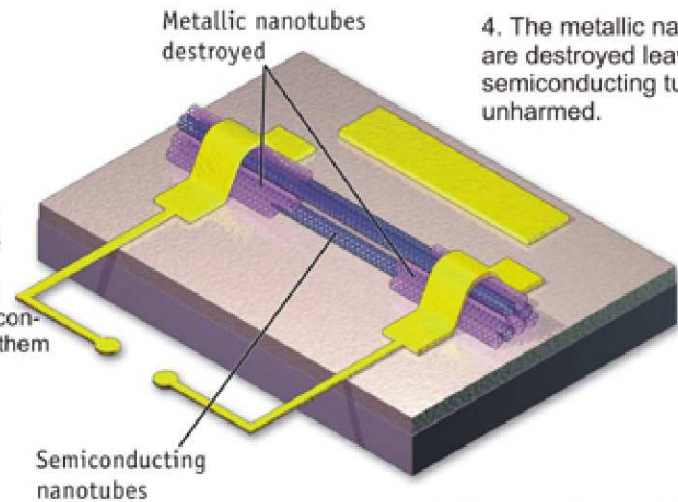
1. Ropes of nanotubes:
The scientists deposit ropes containing both metallic and semiconducting nanotubes



3. A "high" voltage is applied and electrical current flows through the metallic tubes in the rope.



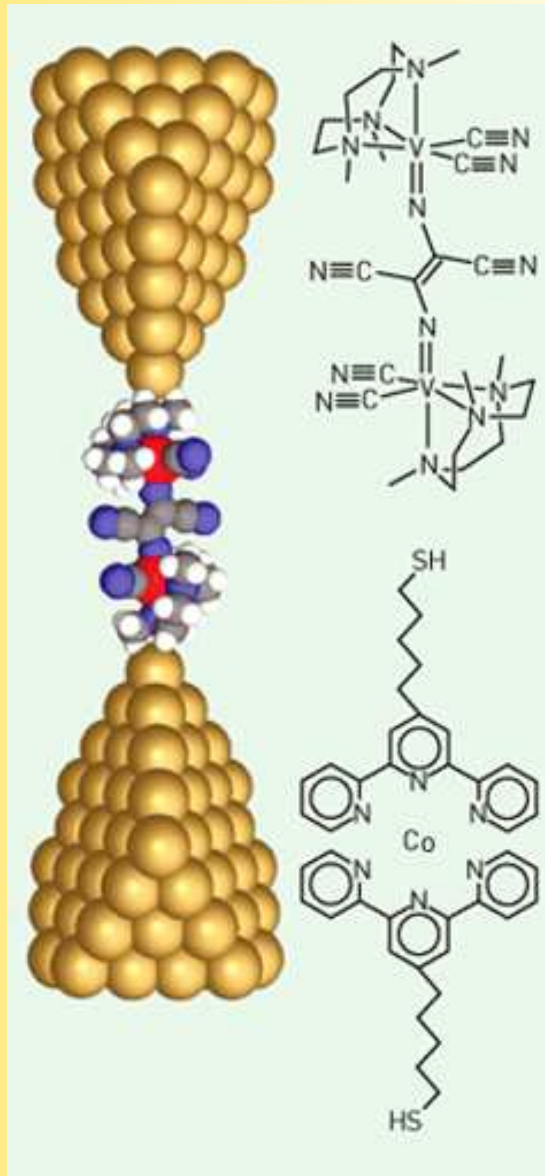
2. Lithography is used to fabricate electrodes on top of the ropes. The back gate is used to switch off the semiconducting tubes making them insulating.



4. The metallic nanotubes are destroyed leaving the semiconducting tubes unharmed.

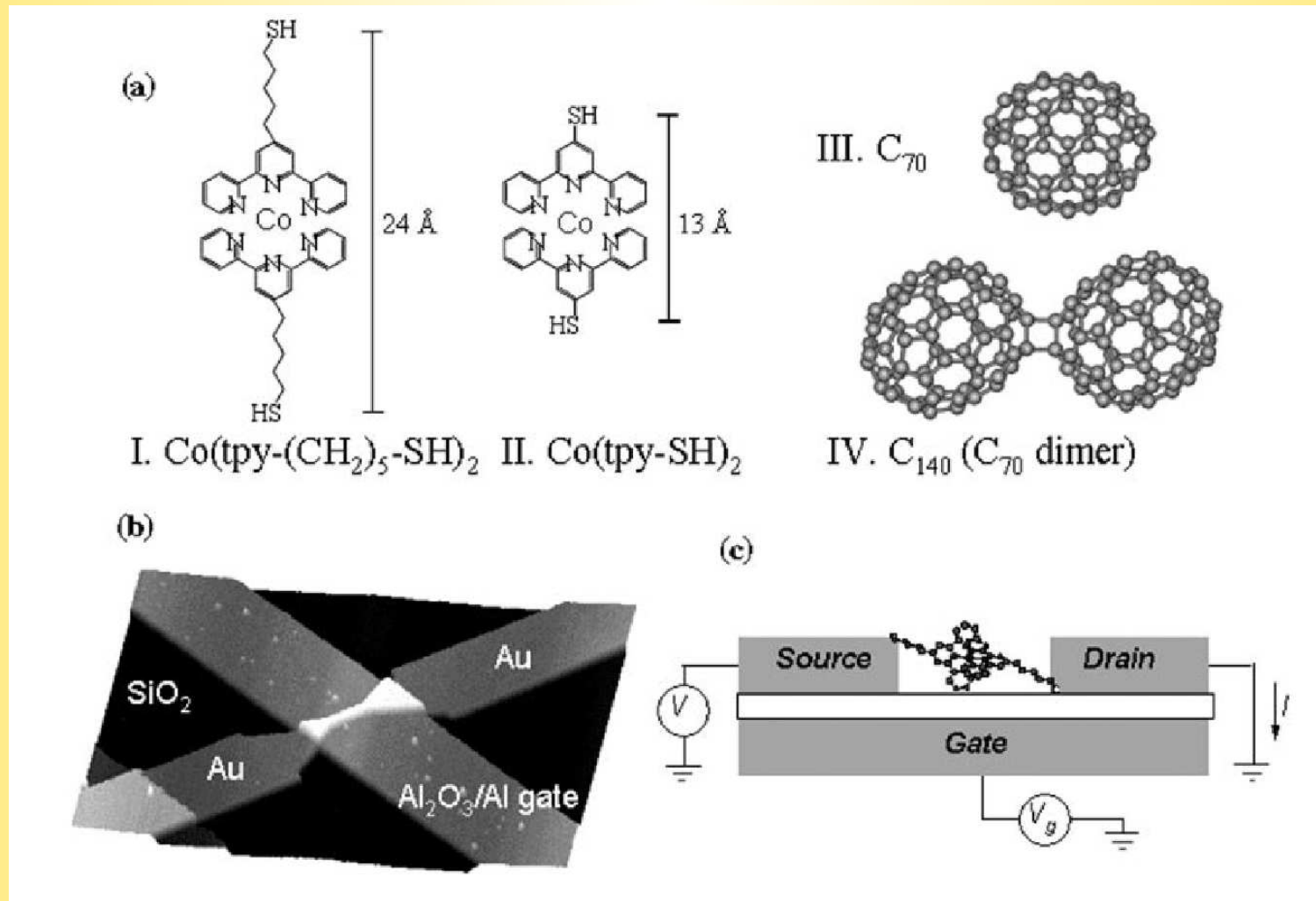
5. The remaining semiconducting nanotubes form working transistors

Rafeindatækni sameinda

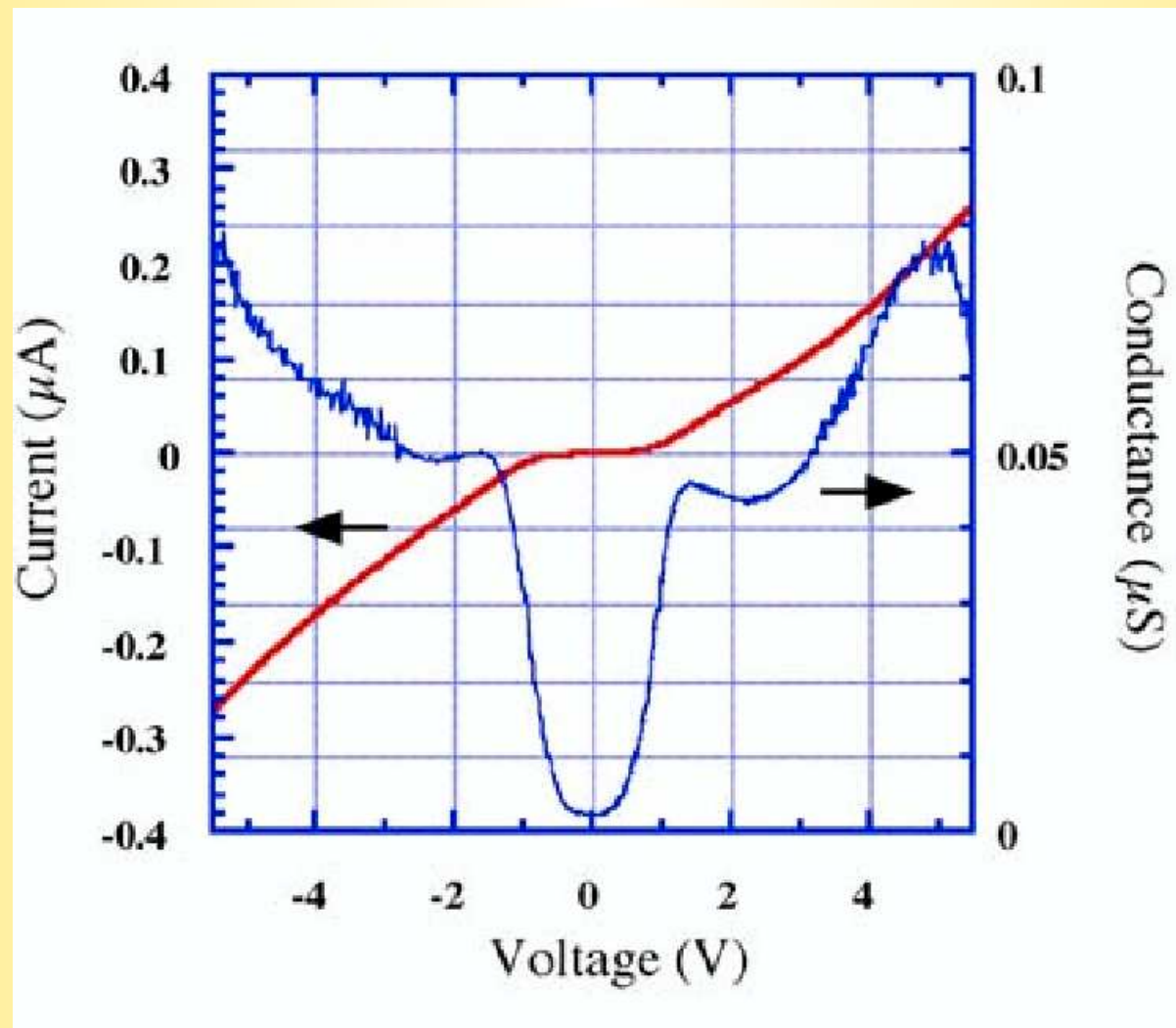


- Ein leið til að mynda rafeindatól á nanóskala er að nota **einstakar sameindir**

Rafeindataækni sameinda

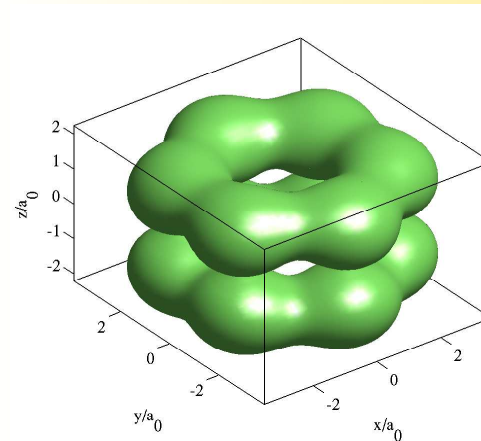
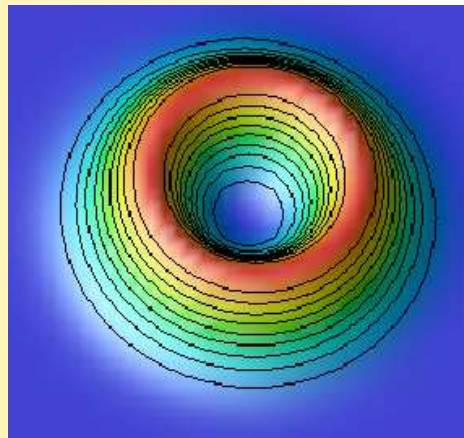
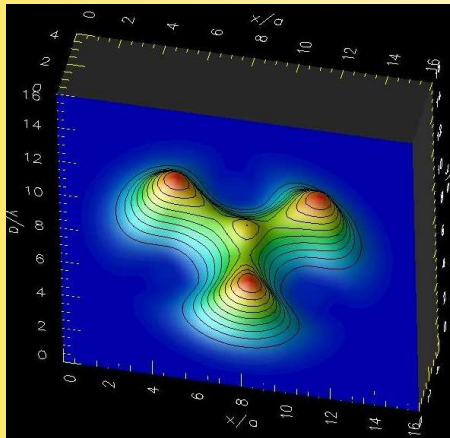


Rafeindataækni sameinda



Straum-spennu kennilína benzen-sameindar

Rannsóknir á Raunvísindastofnun



**Nanókerfi í
hálfleiðurum
og
sameindum
Líkanagerð
Tilraunir
Framhaldsnemar
Örtæknikjarni
Iðnaður?**

Heimildir

[McEuen, 2000] McEuen, P. L. (June 2000). Single-walled carbon nanotubes. *Physics World*, 13:31–36.

[Moore, 2003] Moore, G. E. (2003). No exponential is forever: but "forever" can be delayed ! In *Digest of technical papers / International Solid-State Circuits Conference*, pages 20–23, New York. IEEE.

[Moore, 1965] Moore, G. E. (April 19 1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38:–.

[Natarajan et al., 2002] Natarajan, S., Bost, M., Fisher, D., Kenyon, C., Kardas, C., Parker, C., and Robert Gasser, J. (2002). Process development and manufacturing of high-performance microprocessors on 300mm wafers. *Intel Technology Journal*, 6:14–22.

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

[Park et al., 2003] Park, J., Pasupathy, A. N., Goldsmith, J. I., Soldatov, A. V., Chang, C., Yaish, Y., Sethna, J. P., Abruña, H. D., Ralph, D. C., and McEuen, P. L. (2003). Wiring up single molecules. *Thin Solid Films*, 438-439:457–461.

[Thompson et al., 2002] Thompson, S., Alavi, M., Hussein, M., Jacob, P., Kenyon, C., Moon, P., Prince, M., Sivakumar, S., Sunit Tyagi, J., and Bohr, M. (2002). 130nm logic technology featuring 60nm transistors, low-k dielectrics, and Cu interconnects. *Intel Technology Journal*, 6:5–13.

[Wind et al., 2003] Wind, S. J., Appenzeller, J., and Avouris, P. (2003). Lateral scaling in carbon-nanotube field-effect transistors. *Physical Review Letters*, 91:58301.

[Wind et al., 2002] Wind, S. J., Appenzeller, J., Martel, R., Derycke, V., and Avouris, P. (2002). Fabrication and electrical characterization of top gate single-wall carbon nanotube field-effect transistors. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 20:2798–2801.

[Reed et al., 1999] Reed, M. A., Zou, C., Muller, C. J., Burgin, T. P., and Tour, J. M. (1999). Conduction of a Molecular Junction. *Science* 278:252–254.