

Lögmál Moore um alla eilífdö: Upphaf nanórafeindatækni

Jón Tómas Guðmundsson
Verkfræðideild Háskóla Íslands
og Raunvísindastofnun Háskólans

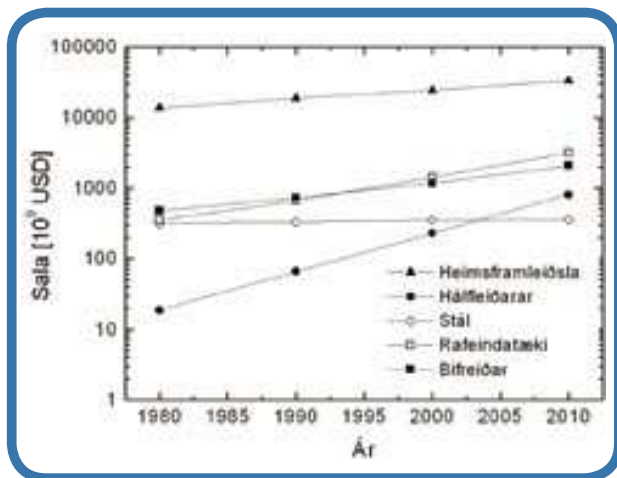


Útdráttur

Hálfleiðaraiðnaðurinn hefur vaxið gríðarlega síðan smárásin var innleidd fyrir bráðum fimm áratugum. Megin drifkraftur þessa vaxtar hefur verið sífelld smækkun tóla (smára) samafara fjölgun þeirra í hverri smárás. Smæri tól vinna á meiri hraða og nota minna afl. Þetta hefur leitt til veldisvaxtar í afköstum smárása sem lýst er með lögmáli Moore. Minnstu einingar smárans samanstanda nú aðeins af nokkrum atómum, og hvert einstakt atóm hefur mikilvægu hlutverki að gegna. Til að þessi vöxtur geti haldið áfram þarf nú að grípa til nýrrar hönnunar á smárum, sem og til nýrra byggingarefna. Hér verður fjallað um MOSFET smárann, lögmál Moore, framtíðarþróun rafeindatækninnar og hin tæknilegu vandamál og takmarkanir sem iðnaðurinn stendur frammi fyrir. Reifaðar verða nýjar aðferðir og lausnir í hönnun smárása, þegar rafeindaiðnaðurinn þróast niður á nanóskala, svo sem smára sem ekki er flatur, kolröasmára og rafeindatækni sameinda.

1. Inngangur

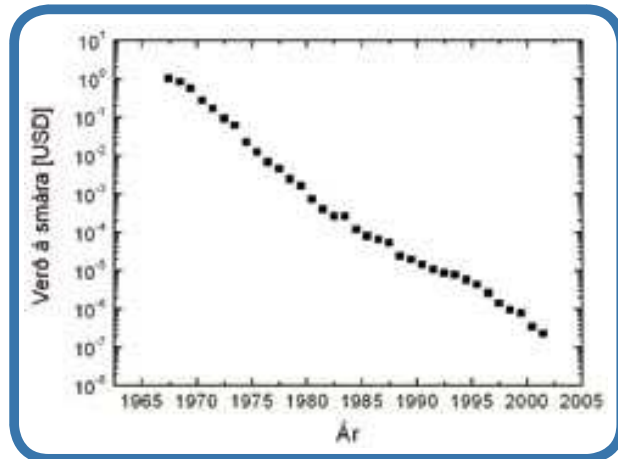
Hálfleiðaraiðnaðurinn hefur vaxið frá árdögum sínum, þá er smárásin var innleidd fyrir tæpum fimmtíu árum, í það að verða ein stærsta grein iðnaðar í veröldinni. Mynd 1 sýnir heimsframleiðsluna (GWP) og tekjur bifreiða-, rafeinda-



Mynd 1

Heimsframleiðslan (GWP) og sölutekjur bifreiða-, rafeinda-, stál- og hálfleiðaraiðnaðarins frá 1980 og framreiknað til 2010. Byggt á Sze (2002).

stál- og hálfleiðaraiðnaðarins frá 1980 áætlað til ársins 2010 (Sze, 2002). Rafeindaiðnaðurinn er nú stærsta grein iðnaðar í veröldinni. Með sama áframhaldi er líklegt að rafeindaiðnaðurinn verði um 10 % af heimsframleiðslunni um 2010. Hálfleiðaraiðnaðurinn, sem er hluti af rafeindaiðnaðinum, vex með enn meiri hraða. Hálfleiðaratól eru grunn byggingareiningar rafeindaiðnaðarins. Megin drifkraftur þessa vaxtar hefur verið sífelld smækkun tóla (smára) sem hefur leitt til veldisvaxtar í fjölda þeirra í hverri smárás. Áætlað er að fjöldi smára, sem framleiddir eru ár hvert, hafi aukist um nálega átta stærðarþrep á síðastliðnum þremur áratugum (Moore, 2003). Meðal söluverð hvers smára hefur fallið um sex stærðarþrep á þessum þrjátíu árum eins og sjá má á mynd 2. Lækkun kostnaðar við hverja framleidda einingu ásamt með sífelld aukinni neyslu drífa vöxt iðnaðarins



Mynd 2

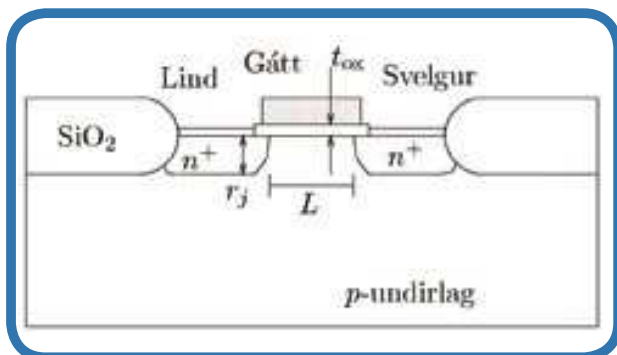
Meðal verð smára á ári. Meðal verð smára hefur fallið sex stærðarþrep síðustu þrjátíu áratugina. Byggt á Moore (2003).

Smækkun smára hefur í för með sér að fleiri smárum má koma fyrir á hverri kísilflögu, og sérhver þessara smærra smára vinnur á meiri hraða. Ef þessi þróun á að halda áfram verður að koma til ný hönnun á smárum. Nú er smæð einstakra eininga smára orðin slík að ekki er hægt að forðast skammtahrif eins og smug. Þó er líklegt að hálfleiðaraiðnaðurinn muni áfram byggja á núverandi framleiðslutækni og framleiðslugetu. Það verður erfitt (eða kannske ómögulegt) að smækka hefðbundna bol-MOSFET niður fyrir 100 nm. Þörf er á nýjum tólum, byggingareiningum og nýjum efnum til að yfirvinna þau tæknilegu vandamál sem blasa við. Tæknin er nú þegar kominn niður að víddum atómsins. Smæstu smárar í

framleiðslu nú um stundir hafa 50 nm gáttarlengd og þykkt gáttaroxíðsins er 1.2 nm eða innan við fimm atóm þvermál á þykkt. Hér verður rædd þróun hálfleiðaraiðnaðarins, þær tæknilegu takmarkanir sem hann nálgast óðum og nýjar hugmyndir og aðferðir sem munu leiða okkur inn í nýja tíma með nanórafeindatækni.

2. MOSFET

Grunntólið í rafrásam er sviðssmárin (e. metal-oxide field effect transistor (MOSFET)), sem er byggður úr kísli. Mynd 3 er skýringarmynd sem sýnir n -rásar MOSFET. MOSFET er fjögurra skauta töl sem samanstendur af p -leiðandi hálfleiðara, sem undirlagi. Í undirlagið eru síðan gerð tvö n^+ -leiðandi svæði, lind og svelgur. Á milli lindar og svelgs er rásin. Lindin veitir hreyfanlegum hleðsluberum sem streyma um rásina til svelgsins þegar smárin er á. Stýriskautið, gáttin, er einangruð frá rásinni með einangrandi oxíði, gáttaroxíðinu. Skaut þetta var upphaflega gert úr málm en á síðari árum er það oftast úr mikið íbættum fjölkristölluðum kísli. Fjórða skautið eru ohmsk skeyti við undirlagið. Þegar spenna er lögð á gáttina myndast leiðandi rás á milli lindar og svelgs. Smárin er þannig stafrænn rofi sem stýrt er með gáttarspennunni. Kennistærðir smárans eru rásalengdin, L , sem er fjarlægðin á milli n^+ - p samskeytanna tveggja, dýpt W , þykkt oxíðsins



Mynd 3

Skýringarmynd af hefðbundnum MOSFET. Kennistærðir smárans eru rásalengdin L , sem er fjarlægðin á milli n^+ - p samskeytanna tveggja, dýpt rásarinnar W , þykkt oxíðsins t_{ox} , dýpt samskeytanna r_j og íbótarpéttleiki undirlagsins N_A .

t_{ox} , dýpt samskeytanna r_j og íbótarpéttleiki undirlagsins N_A . Fyrsti MOSFET smárin sem framleiddur var 1960 hafði 25 μ m rás lengd og 100 nm þykkt gáttar oxíð (Kahng, 1961).

Minnstu einingar smárása hafa smækkað veldislega frá því að fyrsta smárásin leit dagsins ljós. Þykkt gáttaroxíðsins hefur einnig þynnst veldislega með tíma og nú er tæknin að nálgast víddir atómsins. Smárar af hefðbundinni hönnun með 30 nm langri rás hafa verið byggðir og sýnt hefur verið fram á að þeir vinni ágætlega (Doyle, 2002) og tilkynnt hefur verið um MOSFET með rásarlengd 15 nm og gáttaroxíð 0.8 nm þykkt (Chau, 2003).

3. Lögmál Moore

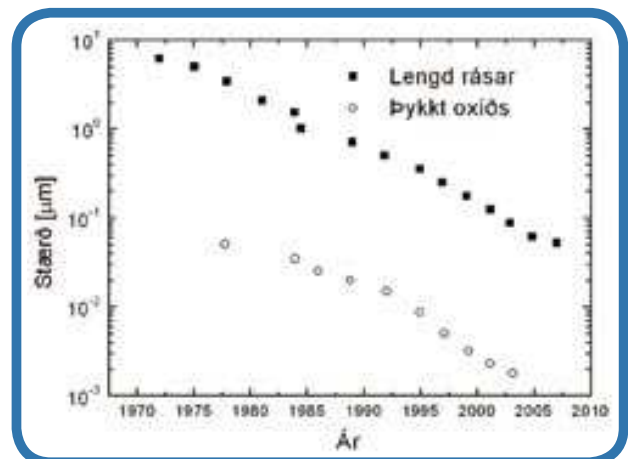
Árið 1965 spáði Gordon Moore um þróun iðnaðarins á komandi árum. Hann sagði flækjustig rása tvöfaldast á hverju ári (Moore, 1965). Árið 1975 endurnýjaði hann

spá sína og hvað þá fjölda tóla í smárás muni tvöfaldast á hverjum 18 mánuðum. Þessi spá hefur síðan verið nefnd lögmál Moore. Þessi framtíðarsýn hans hefur verið æ síðan verið hálfleiðaraiðnaðinum til leiðsagnar. Samtök hálfleiðaraiðnaðarins (Semiconductor Industrial Association (SIA)) gefa út áætlun (National Technology Roadmap for the Semiconductors) sem er framreikningur á kröfum til eiginleika og kennistærða smárása á komandi 15 árum, ef viðhalda á sama hraða í endurbótum og kostnaðarlækkunum. Jafnframt eru skilgreindar rannsóknarþarfir, sem uppfylla verður til að tæknin fái framgang. Tafla 1 sýnir kröfur sem gerðar eru til smára á komandi árum. Nú er að hefjast tími 100 nm smára

	2001	2002	2005	2008	2011
Hönnun [nm]	150	130	100	70	50
Þykkt gáttar oxíðs [nm]	2-3	2-3	1.5-2	<1.5	<1.0
Dýpt samskeyta [nm]	30-60	26-52	20-40	15-30	10-20
V_{dd} [V]	1.5-1.2	1.5-1.2	1.2-0.9	0.9-0.6	0.6-0.5
Gáttartöf [ps]	10-12	9-10	7	4-5	3-4

Table 1: Spá eða kröfur til smárása tækni.

með gáttaroxíð sem er 1.5 – 2 nm að þykkt. Á árinu 2011 ríkir 50 nm kynslóðin með gáttaroxíð sem er þynnra en 1.0 nm og vinnuspennu 0.5 - 0.6 V. Mynd 4 sýnir hvernig minnstu einingar smára í framleiðslu hefur minnkað veldislega frá því



Mynd 4

Stærð minnstu eininga og þykkt gáttaroxíðs í framleiðslu smárása á hverjum tíma. Byggt á Moore (2003).

að fyrsta smárásin leit dagsins ljós. Í dag er lögmál Moore spádómur sem uppfyllir sig sjálfur.

4. Hinir takmarkandi þættir

Smækkun vídda MOSFET hefur verið samfelld frá því að þeir voru innleiddir. Allar lóðréttar og láréttar víddir hafa



verið skalaðar niður samtímis. Á sama tíma verður að viðhalda heildar hleðslunni í lindar-, svelg- og rásarsvæðum. Þessi hleðsla er fengin með því að bæta íbótaratómum í kísilgrindina. Leysnimörk eru varmafræðilegur eiginleiki. Ofan við leysnimörk veldur frekari íbót klasamyndun í stað þess að auka þéttleika hreyfanlegra hleðslubera. Hleðsluþéttleikinn hefur þegar náð leysnimörkum (Packan, 1999). Enn fremur veldur frekari íbótarþéttleiki lækkun í hreyfanleika hleðslubera og þar með lækkuðum drifstraum frá smáranum (Chang, 2003).

Við getum litið á samlokuna, sem gátt-oxíð-kísill myndar (sjá mynd 3), sem plötubétti. Þegar spenna er lögð á gáttarskautið er hleðsla annað hvort dregin að eða henni hrint frá samskeytum oxíðs og kísils. Þegar oxíðið er þynnt eykst rafsviðsstyrkurinn, sem aftur eykur hleðsluþéttleikann við samskeyti oxíðs og kísils, sem þýðir lægra viðnám í rásinni og bættrir eiginleikar tólsins. Hins vegar getur aukin rafsvið leitt til niðurbrots oxíðsins og eyðileggingar tólsins. Þykkt gáttaroxíðsins hefur minnkað veldislega með árunum og er að nálgast víddir atómsins eins og sjá má á mynd 4. Frekari þynning oxíðsins er takmörkuð af lekaströum sem kemur til vegna smugs rafeindanna um oxíðið. Ein bráðabirgðalausn er að nota efni sem hefur hærri rafsvörunarstuðul þannig að rafsviðsstyrkurinn sé hinn sami með þykkari einangrara (Moore, 2003; Doyle, 2002).

Nú eru víddir smárans orðar það litlar að fjöldi íbótaratóma sem stýrir rafeiginleikum er af stærðargráðunni hundrað. Vegna tölfræðilegs flökks í dreifingu íbótaratóma getur reynst erfitt að skala smára niður í þær stærðir þar sem tugur atóma ræður eiginleikum tólsins (Packan, 1999).

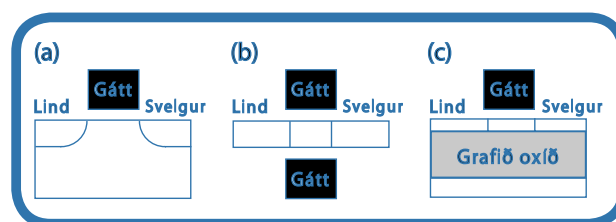
Lithography er sú tækni sem notuð er til að prenta myndir sem skilgreina smárásina á kísilskífurnar. Með smækkandi einingum hefur bylgjulengd ljóssins sem notað er í lithography kerfinu fallið frá 365 nm á níunada áratug tuttugustu aldar niður í 193 nm í fullkornustu kerfunum í dag. Styttri bylgjulengdir en 193 nm fara ekki í gegnum kvars linsur. Til er tækni sem eykur upplausn og leyfir að myndstærð með smærri einingum en bylgjulengdin sé flutt niður á kísilinn (Schellenberg, 2003). Tilraunir eru í gangi með 157 nm ljós (Bates, 2001), mjúka röntgengeisla eða ofur útfjólublátt ljós (EUV), með bylgjulengd 13 nm. En þessi nálgun krefst þess að notaðar séu speglandi linsur sem í dag eru ekki til (Schellenberg, 2003).

5. Ný hönnun á smárum

Vera má að ekki reynist fýsilegt að framleiða hefðbundna MOSFET smára sem hafa styttri rásalengd en sem nemur 70 nm, eða sem svarar til ársins 2008. Ef rásin er styttri verður bjögun á mættinu yfir rásina vegna svelgspennunnar, nefnt áhrif stuttrar rásar. Stýring á þessum hrifum er eitt megin vandamálið þegar smári er skalaður niður. Nokkrar hugmyndir að nýrri hönnun smára hefa komið fram til að leysa þessi vandamál svo að skala megi smárann niður fyrir 50 nm. Tól þessi eru byggð á tvöfaldrri gátt, þrefaldri gátt, pi-gátt eða gátt-umhverfis (Chang, 2001; Wong 2002). Líklegt er talið að bilið milli hefðbundinna MOSFET smára og nanótækninnar verði brúað með nýrri hönnun, smárum sem ekki eru flatar (Chau et al., 2003). Aðrar hugmyndir eru MOSFET með ofurþunnum bol (e. ultra-thin body (UTB)). Sá er munurinn á

þeim og hefðbundunum MOSFET að engin leiðandi braut er á milli lindar og svelgs og að svelgur er fjarri gáttarskautinu (Chang et al., 2003). Þannig stýrir gáttarspennan rafmættinu í rásinni og dýpt lindar og svelgs ræðst eingöngu af þunnum bolnum.

MOSFET með tvöfaldrri gátt er afar áhugaverður kostur þar sem þá má skala niður í smæstu rásarlengd fyrir gefna þykkt oxíðs. Þegar tvær gáttir stýra rásinni er áhrifum stuttrar rásar mikið til eytt. FinFET er dæmi um tví-gáttar smára þar sem rásin er gerð í lóðrétta kísilugga sem stýrt er af tvöfaldrri gátt (Huang et al., 2001). Ugginn er það þunnur að gáttirnar tvær stýra rásinni, sem getur verið fullkomlega sneydd hleðslubera. Mynd 5 er skýringamynd sem sýnir hefðbundin MOSFET, MOSFET með tvöfaldrri gátt og MOSFET með ofurþunnum bol.



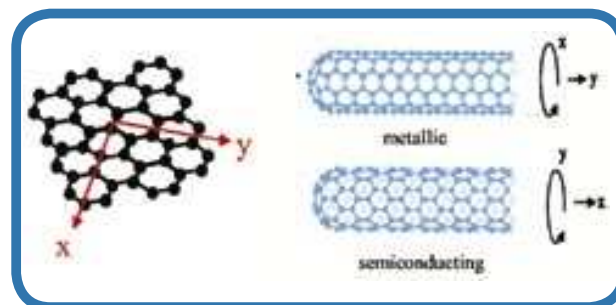
Mynd 5

(a) Hefðbundin MOSFET, (b) MOSFET með tvöfaldrri gátt og (c) MOSFET með ofurþunnum bol. Byggt á Chang (2001).

6. Kolrör

Eitt atómlag af grafíti raðar sér upp í tvívíða grind með sexhyrndum hólfum eins og sjá má á mynd 6. Lita má á kolrör sem slíkar þynnur, sem rúllað er upp í sívalninga (sjá mynd 6). Það ræðst síðan af hendni þeirra hvort þau eru málmleiðandi eða hálfleiðandi. Orkugeil hálfleiðandi kolröra ákvarðast af þvermáli rörsins. Kolrör með þvermál 1-2 nm hafa orkugeil sem er minni en 1 eV (McEuen, 2000).

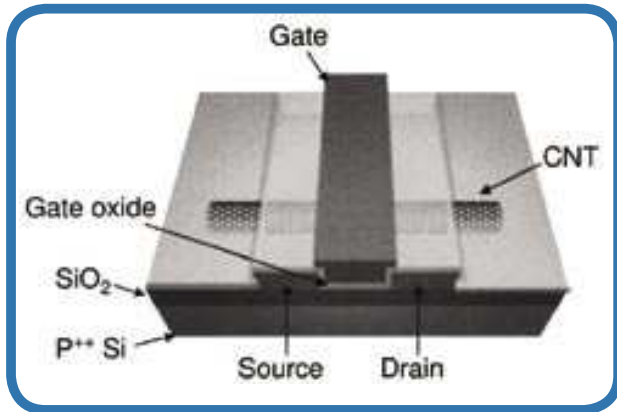
Hálfleiðandi kolrör má nota sem virku eininguna í sviðsmárum (Martel et al., 1998). Þannig að nota má kolrör í gáttartengingu sem svipar til MOSFET. Gera má kolrörið



Mynd 6

Kolrör með einföldum vegg. Vinstra myndin sýnir eitt atómlag af kolefni sem raðast upp í tvívíða grind úr sexhyrndum hólfum. Þegar þynnunni er rúllað upp í stefnu y-áss er kolrörið málmleiðandi, eins og sjá má á efri myndinni hægra megin, en ef þynnunni er rúllað upp eftir x-ásnum er kolrörið hálfleiðandi. Byggt á McEuen (2000).

leiðandi með því að leggja neikvæða spennu og síðan má slökkva á leiðninni með því að leggja á jákvæða spennu. Nýlega hefur verið tilkynnt um byggingu á sviðssmára úr kolröri (mynd 7) (Wind et al., 2002). Notaður var venjulegur



Mynd 7

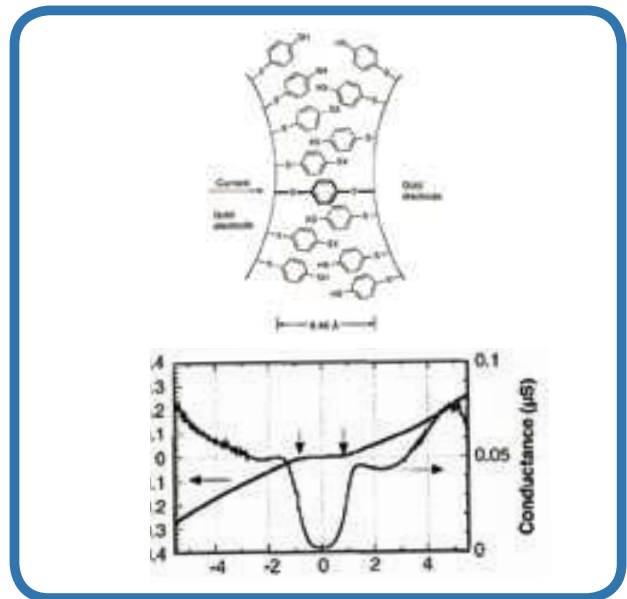
Skýringarmynd af kolrörs-sviðssmára. Virka einingin er kolrör og leiðni þess er stýrt af spennunni sem lögð er á gáttina. Frá Wind et al. (2002).

MOSFET þar sem gáttarskautið var einangrað frá rásinni með þunnum rafsvara. Með slíkum tólum, sem gefa mögnun og geta unnið sem rofar, má mynda einfaldar rásir. Jafnframt má nota kolrör í millitengi. Í málmeiðandi kolrörum er rafeindapéttleikinn afar hár og ekkert sem hindrar ferð rafeindanna, sem þýðir að straumpéttleiki getur orðið miklu meiri en í málum (Appenzeller et al., 2003). Til að kolrör verði nothæf í rafeindatækni verður að ná betri tókum á efnasmíðinni, stýringu á þvermáli kolröra og hendni þeirra, þeim þáttum sem ákvarða rafeiginleikana.

7. Rafeindatækni sameinda

Í rafeindatækni sameinda eru eðliseiginleikar einstakra sameinda nýttir til að mynda tól á nanóskala. Sameindir eru augljóslega hin endanlega ofursmáa eining í nanórafeindatækni. Hin endanlega smækkun rökrása felst í notkun sameinda, sem myndu þá vinna sem rofar og orkugeymandi rásaeiningar (Mayor et al., 2003). Þær sameindir sem hingað til hafa verið til skoðunar eru smáar lífrænar sameindir. Sameindir þessar eru nokkrum stærðarþrepum smærri en minnstu einingar í hálfleiðandi tólum í dag. Þau má tilsníða með efnasmíði og eðliseiginleika þeirra má ákvarða með byggingu þeirra.

Mælingar á flutningi hleðslu um eina einstaka sameind og ákvörðun á leiðni hennar var mikilvægt skref inn í hagnýtingu sameinda í rafeindatækni (Reed et al., 1997). Þeir mældu straum-spennu kennilínu eins bensen hring sem tengdur hafði verið á milli gullskauta. Skýringarmynd sem sýnir bensenhringinn á milli gullskautanna og straum-spennu kennilínuna er sýnd á mynd 8. Rafeindatækni smeinda er að taka sín fyrstu skref. Áskorunin sem menn standa frammi fyrir við frekari þróun rafeindatækni sameinda eru endurtakanleiki og stöðugleiki. Stærsta vandamálið eru málmskautin og samskeyti þeirra við sameindirnar.



Mynd 8

Hér má sjá bensen hring sem komið er fyrir á milli tveggja gullskauta. Neðri myndin sýnir mældu straum-spennu kennilínu. Frá Reed et al. (1997).

8. Samantekt

Með núverandi smárásatækni, sem byggð er á kísli, hefur náðst gríðarlega góður árangur í að framleiða smárásir, smára og millitengi, með sífellt smækkandi tólum. Þessi sífellda smækkun tóla mun óhjákvæmilega leiða til þessa að einingar smára verða af viddum sameinda og atóma.

Kolrör getur haft leiðnieiginleika málms eða hálfleiðara eftir því hvernig rörinu er rúllað upp. Þau eru þess vegna kjörin sem byggingareiningar í ný tól og sýnt hefur verið fram á að þau eru nothæf sem virka einingin í sviðssmárum. Notkun sameinda í virkar rásaeiningar er fyrirsjáanleg í framtíðinni. Sameindir má hanna og smíða fyrir hvert tiltekið verkefni. Ennþá eru þó mörg vandmál sem þarf að yfirstíga til að þetta verði að veruleika. Megin áskorunin sem menn standa frammi fyrir, ef framleiða á tól á nanóskala sem nýta kolrör eða einstakar sameindir, er myndun skeyta á þessum smásæja skala.

Heimildir

Appenzeller, J., Joselovich, E., and Hönlein, W. (2003). Carbon nanotubes for data processing. In Waser, R., editor, *Nanoelectronics and Information Technology*, pages 473-499. Wiley-VCH, Weinheim.

Bates, A. K., Rothschild, M., Bloomstein, T. M., Fedynyshyn, T. H., Kunz, R. R., and Switkes, V. L. M. (2001). Review of technology for 157-nm lithography. *IBM Journal of Research and Development*, 45:605-614.

Chang, L., Choi, Y.-K., Kedzierski, J., Lindert, N., Xuan, P., Bokor, J., Hu, C., and King, T.-J. (January 2003). Moore's law lives on. *Circuits and Devices Magazine*, 19:35-42.

Chang, L., Yang, K., Yeo, Y.-C., Choi, Y.-K., King, T.-J., and Hu, C. (2001). Reduction of direct-tunneling gate leakage current in double-gate and ultra-thin body MOSFETs. In *Proceedings of the 2001 International Electron Devices Meeting (IEDM)*, pages 5.2.1 - 5.2.4, Washington DC, USA. IEEE.

Chau, R., Boyanov, B., Doyle, B., Doczy, M., Datta, S., Hareland, S., Jin, B., Kavalieros, J., and Metz, M. (2003). Silicon nanotransistor for logic applications. *Physica E*, 19:1--5.

Doyle, B., Arghavani, R., Barlage, D., Datta, S., Doczy, M., Kavalieros, J., Murthy, A., and Chau, R. (2002). Transistor elements for 30 nm physical gate lengths and beyond. *Intel Technology Journal*, 6:42-54.

Huang, X., Lee, W.-C., Kuo, C., Hisamoto, D., Chang, L., Kedzierski, J., Anderson, E., Takeuchi, H., Choi, Y.-K., Asano, K., Subramanian, V., King, T.-J., Bokor, J., and Hu, C. (2001). Sub 50-nm P-Channel FinFET. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48:880-886.

Kahng, D. (January 16., 1961). Silicon-silicon dioxide surface devices. Technical Memorandum, Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey.

Martel, R., Schmidt, T., Shea, H. R., Hertel, T., and Avouris, P. (1998). Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors. *Applied Physics Letters*, 73:2447-2449.

Mayor, M., Weber, H. B., and Waser, R. (2003). Molecular electronics. In Waser, R., editor, *Nanoelectronics and Information Technology*, pages 501-525. Wiley-VCH, Weinheim.

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

Moore, G. E. (2003). No exponential is forever: but "forever" can be delayed ! In 2003 *International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical paper*, pages 20-23, vol. 1, San Francisco. IEEE.

Moore, G. E. (April 19., 1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38:114-117.

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

Reed, M. A., Zhou, C., Muller, C. J., Burgin, T. P., and Tour, J. M. (1997). Conductance of a molecular junction. *Science*, 278: 252-254.

Schellenberg, F. (September 2003). A little light magic. *IEEE Spectrum*, 40(9):34-39.

Sze, S. M. (2002). *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York.

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.

Wong, H.-S. P. (2002). Beyond the conventional transistor. *IBM Journal of Research and Development*, 46:133-168.

Um Höfundinn:

Jón Tómas Guðmundsson útskrifaðist með C.S. próf í rafmagnsverkfræði frá Háskóla Íslands árið 1989. Hann lauk M.S. prófi þaðan árið 1991 og Ph.D. frá Kaliforníuháskóla í Berkeley árið 1996. Hann starfaði sem sérfræðingur við eðlisfræðistofu Raunvísindastofnunar Háskólans frá september 1997, sem fræðimaður frá maí 2000 og sem lektor í rafmagnsverkfræði við verkfræðideild Háskóla Íslands frá janúar 2001. Jón Tómas starfar í dag sem dósent við rafmagns- og tölvuverkfræðiskor í Háskóla Íslands.



RAFTEIKNING HF
RÁÐGJAFARVERKFRÆÐINGAR
CONSULTING ENGINEERS

Góð ráð í 40 ár

Ráðgjöf
Hönnun
Áætlanagerð

Suðurlandsbraut 4 - 108 Rvík.
S: 520 1700 - Fax: 520 1701
www.rafteikning.is
rt@rafteikning.is