Af smækkandi smárum

eftir

Jón Tómas Guðmundsson

RH-10-2000

Science Institute
University of Iceland

Af smækkandi smárum

Jón Tómas Guðmundsson,
Raunvísindastofnun Háskólans,
Dunhaga 3,
IS-107 Reykjavík

27. mars 2000

Útdráttur

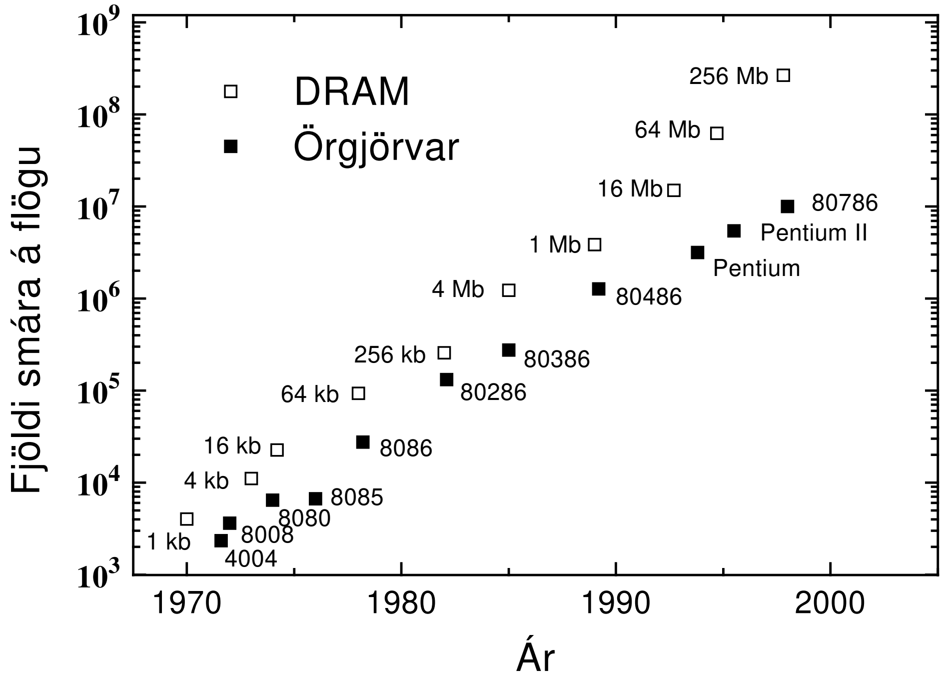
Lögmál Moore segir að afkastageta smárása og þéttleiki smára í smárás tvöfaldist á hverjum þremur árum. Það sem vegið hefur þyngst í þessari þróun er sífelld smækkun einstakra smára. Nú er svo komið að minnstu einingar smára nálgast víddir atómsins. Hér eru reifuð ýmis þau vandamál sem séð er fyrir að koma muni upp við frekari smækkun smára í framtíðinni.

1 Inngangur

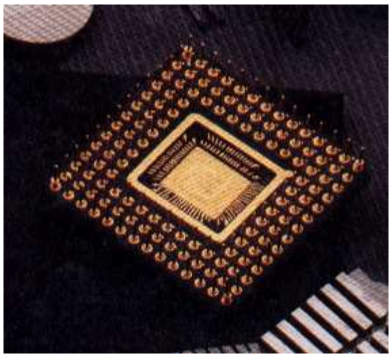
Án efa verður smárinn mikilvægasta uppgötvun tuttugustu aldarinnar. Snemma á sjötta áratugnum var farið að nota smára í stað lampa og liða og fljótlega var smárásin sett saman. Í smárás var með samspili smára og annarra rásaeininga hægt að framkvæma rökrænar aðgerðir. Aukin afköst smárása, vegna sífelldrar smækkunar hálfleiðaratóla, hefur í för með sér að gríðarleg reiknigeta, framfarir í fjarskiptatækni og aukin gagnageymsla eru að breyta í grundvallaratriðum okkar daglega lífi, starfsumhverfi og samskiptum manna á milli. Afkastageta smárása hefur aukist um 25 – 30 % ár hvert, en kostnaður við hverja aðgerð, sem rásin framkvæmir, hefur lækkað að sama skapi. Þessi framleiðniaukning smárása hefur fengist með nýrri hönnun, smækkun tóla, stækkun skífa, aukinni framlegð, og endurbótum í framleiðslutækni. Smækkun einstakra tóla hefur alltaf vegið þyngst þessara þátta. Með smækkun smáranna má fjölga smárum á flatarmálseiningu í smárás jafnframt því sem skiptihraði hvers smára eykst og þess vegna hraði rásarinnar allrar.

Á áttunda áratugnum voru færri en 10^5 smárar í smárás (e. Large Scale Integration (LSI)). Á níunda áratugnum fór fjöldi smára í 10^6 á flögu (e. Very Large Scale Integration (VLSI)) og nú er fjöldi smára í smárás kominn um og yfir 10^7 (e. Ultra Large Scale Integration (ULSI)). Sífelld smækkun tóla hefur verið megin drifkraftur vaxtar rafeinda- og tölvuiðnaðarins undanfarna þrjá áratugi. Því smærri sem tólin verða því þéttar má pakka þeim í smárás, hraði rásarinnar eykst og aflnotkun minnkar. Á þessum tíma hefur hálfleiðaraiðnaðurinn fylgt lögmáli Moore, sem segir að afkastageta smára og þéttleiki tvöfaldist á hverjum þremur árum [1]. Söguleg þróun smárastærðar í smárásum er sýnd í töflu 1. Ný kynslóð tóla hefur komið fram á hverjum þremur árum. Með hverri kynslóð hefur minnisþéttleiki á hverri flögu fjórfaldast og þéttleiki smára í rökrásum 2 – 3 faldast. Með hverjum tveimur kynslóðum (á sex árum) helmingast stærð smára, en straumur á lengdareiningu, hraði, flatarmál flögu, aflnotkun og fjöldi I/O pinna tvöfaldast [2]. Þessi þróun er sýnd með örgjörvum framleiddum af Intel á árabilinu fra 1972 til 1998 og tilsvarandi minniseiningum á mynd 1. Mynd 2 sýnir dæmigerðan örgjörva, á flögu sem er 3 cm^2 að flatarmáli er komið fyrir 10.000.000 smárum. Minniseiningin DRAM samnstendur nú þegar af yfir 1.000.000.000 smárum. Það er raunhæft að gera ráð fyrir að hægja muni á þessari þróun.

Samtök hálfleiðaraframleiðenda (e. Semiconductor Industrial Association (SIA))



Mynd 1: Undanfarna þrjá áratugi hefur þróun örgjörva og minniseininga fylgt lögmáli Moore, sem segir að þéttleiki smára í smárás tvöfaldist á hverjum þremur árum.



Mynd 2: Dæmigerður örgjörvi í dag smanstendur af um 10.000.000 smárum sem þekja svæði sem er um 3 cm^2 að flatarmáli.

Tafla 1: Söguleg þróun í skölun á MOSFET.

	1977	1980	1983	1986	1989	1992	1995	1997	1999
Minnsta eining [μm]	3	2	1.5	1	0.7	0.5	0.35	0.25	0.18
Gáttar oxíð [nm]	70	40	25	25	20	15	9	8.5	8
Skeytadýpt [nm]	600	400	300	250	200	150	150	50 – 100	36 – 72
V_{dd} [V]	5	5	5	5	5	5		2.5 – 1.8	1.8 –1.5
Gáttartöf [ps]	800	350	250	200	160	90		16 – 17	12 – 13

setja reglulega fram áætlun eða spá um þróun iðnaðarins á komandi árum [3]. 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. Tafla 2 er byggð á áætlun þeirra fram til ársins 2008, sem gefin var út 1997 og uppfærð 1998 [3].

2 Smárinn

Það tól sem er ráðandi í smárásum nútímans er smárinn; málmur-oxíð-hálfleiðari (e. metal oxide semiconductor (MOS)) sem byggður er á kísli. Hann samanstendur af lind, svelg og gátt. Lindin gefur frá sér hreyfanlega hleðslubera þannig að straumur geti runnið frá lind til svelgs þegar smárinn er “á”. 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 og straumur farið þar á milli. Smárinn vinnur því sem stafrænn rofi þar sem gáttarspennan stýrir því hvort hann er opinn eða lokaður. Helstu kennistærðir MOSFET eru sýndar á mynd 3. Þær eru rásalengdin, L, sem er fjarlægðin milli n^+-p-skeytanna tveggja, þykkt oxíðlagsins, d, dýpt samskeytanna, r_j og íbótarþéttleiki undirlags, N_A. Gáttin skarast örlítið við bæði lind og svelg.

Gerum nú ráð fyrir að undirlagið sé p-leiðandi (sjá mynd 3). Þegar engin spenna er lögð á gáttina þá samsvara lind og svelgur tveimur $p-n$-skeytum sem snúa bökum saman. Þá rennur þar aðeins lítill mettunarstraumur. Þegar spenna er lögð á gáttina fjarlægjast holurnar samskeyti oxíðs og kísils. Ef spennan er aukin frekar dragast rafeindir að svæðinu næst samskeytunum. Þegar nægilega há jákvæð spenna er lögð á gáttina, umhverfist svæðið neðan við oxíðlagið (rásin). Þar með eru lind og svelgur tengd með leiðandi braut. Leiðni rásarinnar stjórnast af spennunni sem lögð er á gátt-

Tafla 2: Spá um þróun skölunar á smárásum.

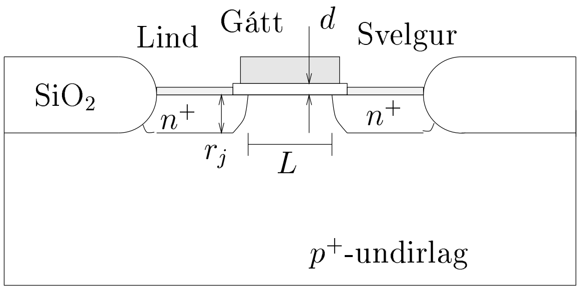
	1999	2001	2002	2005	2008
Minnsta eining [nm]	180	150	130	100	70
Gáttar oxíð [nm]	3 – 4	2 – 3	2 – 3	1.5 – 2	< 1.5
Skeytadýpt [nm]	36 – 72	30 – 60	26 – 52	20 – 40	15 – 30
V_{dd} [V]	1.8 – 1.5	1.5 – 1.2	1.5 – 1.2	1.2 – 0.9	0.9 – 0.6
Gáttartöf [ps]	12 – 13	10 – 12	9 – 10	7	4 – 5

ina. Við litla spennu á gátt þannig umhverfing á yfirborði hálfleiðarans. Gáttar spennugildið sem unhverfingin á sér stað við er skilgreind sem þröskuldsspenna V_{th}. Þröskuldsspenna skalast ekki í hlutfalli við drifspennuna V_{dd}. Neðan við þröskuldsspennuna fellur straumurinn ekki strax niður að núlli. Mikilvægt er að þessi straumur sé takmarkaður við nokkra tugi nanóampera. Þetta skilyrði hindrar að þröskuldspennuna sé hægt að skala niður fyrir 0.2 V [4]. Upphaflega var gáttarskautið úr áli en undanfarna þrjá áratugi hefur það verið gert úr fjölkristölluðum kísli.

Frá því á síðari hluta níunda áratugarins hafa CMOS rásir verið notaðar í allar venjulegar smárásir eins og örgjörva og minni. Þetta er vegna þess að aflnotkun og tilsvarandi ofhitnun takmörkuðu pökkun n-MOS við 10^6 hlið/cm^2. Í dag eru því nær allar smárásir byggðar á CMOS. Hver eining CMOS samanstendur af $n-$ og $p-$rása MOS smárum. Tólin tvö eru raðtengd frá V_{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 þess vegna lítil.

3 Skölun smára

Hraðaaukning smárásar, þ. e. hve margar aðgerðir eru framkvæmdar á hverri sekúndu, er drifkraftur framfara. Því meira sem smárásin er sköluð niður, eykst þéttleiki tóla í rásinni, hraði hennar eykst og aflnotkun hennar minnkar. Auknum skiptihraða hefur fyrst og fremst verið náð með því að minnka einstaka smára og auka þéttleika þeirra í smárás. 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. Hleðsla í lind, svelg og rás er framkölluð með því að íbæta staðbundið atómum í kísil-



Mynd 3: MOSFET. Helstu kennistærðir MOSFET eru rásalengdin, L, sem er fjarlægðin milli n$^+$-p-skeytanna tveggja, þykkt oxíðlagsins, d, dýpt samskeytanna, r_j og íbótarþéttleiki undirlags, N_A.

grindina. 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. Skölun smára kallar á aukningu þéttleika þessara 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. 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 þess vegna ekki þéttleika hreyfanlegra hleðslubera. Sú íbót sem nú er notuð hefur nú þegar náð leysnimörkunum [5]. Hér þarf því að koma til ný tækni ef frekari skölun smáranna á ekki að leiða til aukins viðnáms og minnkaðrar afkastagetu.

Gáttaroxíðið er einnig að nálgast minnstu fræðilega þykkt sína. Samspili gáttar, oxíðs og kísils má líkja við plötuþétti. Með því að leggja spennu á þéttinn 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 [6].

Aflgjafaspennnan V_{dd} hefur einnig verið sköluð niður og jafnframt hefur þykkt oxíðsins verið minnkuð til að viðhalda rafsviðsstyrknum. Nú er oxíðlagið orðið það þunnt að skammtafræðilegt smug rafeindanna frá kísilundirlaginu til gáttarskautsins er mögulegt [6]. 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. Smug rafeindanna virðist ekki skemma oxíðið en lekastraumurinn sem slíkur getur valdið bilun í rásunum sem eru hannaðar fyrir óverulegan gáttarstraum. Þó svo að hanna megi rásirnar til að taka þennan straum, verður aflnotkunin vegna hans ávallt óásættanleg. Skölun gáttaroxíðsins er einnig mikilvæg hvað varðar lengd smárans. Fyrir gáttarrafsvara verður því að koma til nýtt efni með hærri rafsvörunarstuðul en núverandi kísiloxíð.

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.

Mettunarstraumur smárans $I_{\rm dsat}$ er mikilvæg kennistærð þar sem straumurinn um smárann ákvarðar tíman sem það tekur að hlaða og afhlaða sníkjurýmdir á flögu. Hann ræður því meira um hraða rásarinnar en nokkur önnur kennistærð. Þekkt er að gáttartöfina má nálga með [2]

$$t_{\rm pd} \approx \frac{CV_{\rm dd}}{4}\left[\frac{1}{I_{\rm dsat,n}} + \frac{1}{I_{\rm dsat,p}}\right] \qquad (1)$$

svo að hún fellur með lækkandi spennu frá aflgjafa $V_{\rm dd}$ og auknum mettunarstraum, en fellur eitthvað hægar með minnkandi rásalengd L. Nauðsynlegt mun reynast að lækka álagða spennu $V_{\rm dd}$ vegna lekastrauma og áreiðanleika. Skerðing á $V_{\rm dd}$ lækkar mettunnarstrauminn $I_{\rm dsat}$ þrátt fyrir að þykkt oxíðlagsins minnki. Í gegnum tíðina hefur rýmd rásar á einingarflatarmál verið fasti en ef halda á í að tvöfalda hraðann með hverjum tveimur kynslóðum verður að helminga rýmdina á hverjum fjórum kynslóðum. Með skerðingu á $V_{\rm dd}$ fellur einnig aflnotkunin, sem er í réttu hlutfalli við klukkutíðnina, sníkjurýmd og kvaðrat álagðrar spennu

$$P_{\rm diss} = fV_{\rm dd}^2 C \qquad (2)$$

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 nota málma með hærri leiðni en ál og efni með lægri rafsvörunarstuðul en kísiloxíð sem einangrara á milli laga og leiðara. Til að leysa þessi tæknilegu vandamál verða að koma til ný efni til framleiðslu smárása. Til dæmis sveimar kopar hratt inn í kísil og sveimþröskuldar verða að koma til svo að koparinn nái ekki að snerta kísilyfirborð. Með smækkandi tólum verður dýpt skeytanna grynnri og gáttar oxíð þynnra. Til að mynda ofur-grunn skeyti þarf lágorku jónaígræðslu.

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. Sökum þessa 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.

Þróa verður ný efni í gáttarrafsvara, og gáttarskaut í stað kísiloxíðs og fjölkristallaðs kísils. Þá þarf ný efni í millitengi og tilsvarandi endurbætur í framleiðslutækni til að leggja niður málma, rafsvara og snertur. Fleiri eru vandamálin, tengi á þessar flögur verða sífellt fleiri og flækjustig þeirra eykst svo það er sífellt erfiðara að prófa hvort allt virkar eins og til er ætlast.

4 Samantekt

Hér hefur verið farið yfir sögulega þróun tölvutækninnar og reifuð ýmis þau vandamál sem séð er að hafa muni áhrif á þessa þróun í framtíðinni. Fram til þessa hefur verið hægt að líta að miklu leyti fram hjá óæskilegum þáttum eins og lekastraum þegar tólið er ekki virkt, og gáttarstraum. Þessir straumþættir munu vaxa hratt við smækkun þegar grundvallarlögmál varma- og skammtafræði sauma að tæknilausnunum. Þá er ónefnd sú staðreynd að kostnaður við að reisa verksmiðju til framleiðslu smárása eykst með smækkun tóla, hefur tífaldast á undanförnum 20 árum og er áætlaður um 2 milljarðar dala fyrir núverandi kynslóð smárása.

Þakkir

Verkefnið var styrkt af Rannsóknarsjóði Háskóla Íslands.

Heimildir

[1] R. R. Schaller, "Moore's law: Past, present, and future," *IEEE Spectrum*, vol. 34, no. 6, pp. 53–59, 1997.

[2] C. Hu, "MOSFET scaling in the next decade and beyond," *Semiconductor Ineternational*, vol. 17, no. 6, pp. 105 – 114, 1994.

[3] *The National Technology Roadmap for Semiconductors*, and *The National Technology Roadmap for Semiconductors: 1998 Update.* San Jose, CA: Semiconductor Industry Association, 1997 and 1998.

[4] Y. Taur, "The incredible shrinking transistor," *IEEE Spectrum*, vol. 36, no. 7, pp. 25 – 29, 1999.

[5] P. A. Packan, "Pushing the limits," *Science*, vol. 285, pp. 207 – 208, 1999.

[6] C. Hu, "Gate oxide scaling limits and projection," in *Proceedings of the 1996 International Electron Devices Meeting (IEDM)*, (Piscataway, NJ), IEEE, 1996.