

Smárásir:

# Saga og þróun tölvutækninnar

kafli 1 a

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

1. vika vor 2010

1

## Inngangur

- Hálfleiðandi töl eru undirstaða rafeindaiðnaðarins
- Rafeindaiðnaðurinn er stærsti iðnaður veraldar í dag með heildarsölu sem er meiri en 1000 milljarðar dollara á ári síðan 1998
- Upplýsingatæknin byggir á hálfleiðaratólum og er skilningur á þeim lykilatriði til framfara

2

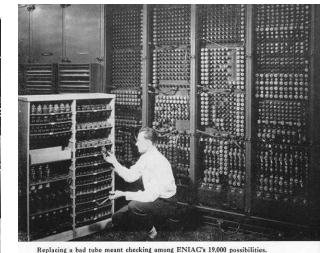
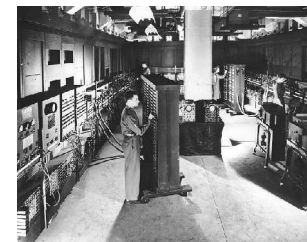
## Upphafid

- Upphaf rafeindatækninnar má rekja til uppgötvunnar rafeindarinnar af J. J. Thomson árið 1897
- Skilningur á eiginleikum rafeindarinnar gerði mögulega tækni og þjónustu sem ekki hafði verið hægt að sjá fyrir
- 50 árum síðar, árið 1947, voru lampar og liðar ráðandi tækni, lampatvistar, bakskauts- lampar og örbylgjuvakar voru framleiddir í miklu magni
- Það virtist sem þessi tækni næði að fullnægja öllum kröfum hins daglega lífs



3

## Lampar



- Fyrsta raftölvun, sem geymdi forrit, ENIAC (e. the Electronic Numerical Integrator and Computer) var byggð 1946
- Hún var mikið afrek í lampatækni og gat lagt saman 5000 tölur á einni sekúndu
- Hlutverk ENIAC var hernaðarlegir útreikningar

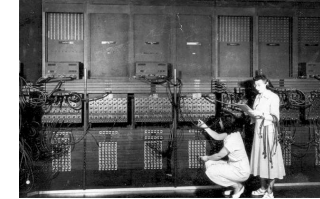
4

## Lampar

- Vélin var stór og dýr:
  - innihélt 17468 lampa
  - vóg 60.000 pund
  - fyllti 16200 rúmfet
  - notaði 174 kW (233 hestöfl)
- Í kjölfarið fylgdi UNIVAC I, sem var fyrsta markaðshæfa tölvan
- Þegar hætt var að nota ENIAC, að nýu árum liðnum, var hún enn öflugasta tölva heims
- Herinn gafst upp á að nota hana vegna kostnaðar við rekstur og viðhald
- Mennt gerðu sér ljóst að lengra yrði ekki farið með lampatækni

5

## Lampar



- Markaður fyrir lampa náði hámarki sínu 1955 í fjölda seldra lampa og 1957 í verðmæti seldra lampa
- Markaðurinn fyrir lampa fór ekki að dragast verulega saman fyrr en á síðari hluta sjöunda áratugarins

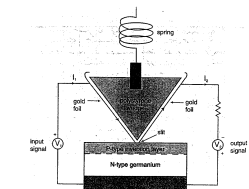
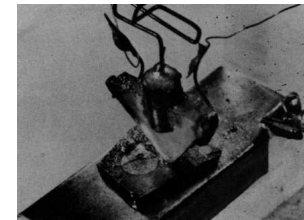
6

## Hálfleiðaratól

- Mervin Kelly, þá forseti Bell Laboratories, gerði sér grein fyrir takmörkunum þessarar tækni
- Hann taldi að skiptihraði liða, og ending og afnotkun lampa myndi takmarka framfarir í fjarskiptum og annarri rafeindatækni
- Sumarið 1945 setti hann saman rannsóknarhóp til að skoða og skilja hálfleiðara
- Hópurinn hafði það langtíma markmið að skapa hálfleiðaratól sem kæmi í stað lampa og liða

7

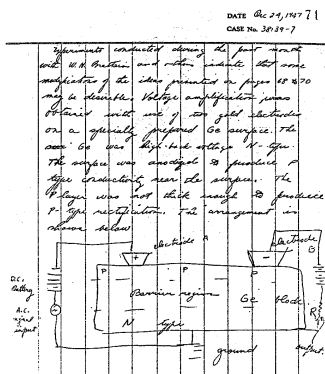
## Hálfleiðaratól



- Í desembermánuði 1947 settu þeir John Bardeen og Walter Brattain saman fyrsta smáran í Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey
- Með því hófst notkun hálfleiðara í rafeindatækni

8

## Hálfleiðaratól



- Fyrir uppgötvun sína fengu þeir Bardeen og Brattain Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði árið 1956 ásamt William Schockley

9

## Leiðni hálfleiðara



- Hugmyndin var byggð á því að stjórna mætti rafstraum í gegnum þéttfni eins og kísil með því að bæta í það óhreinindum með tiltekinn fjölda gildisrafeinda
- Breyta má rafleiðni hálfleiðandi efna um mörg stærðarþrep með örliðlu magni óhreininda

10

## Leiðni hálfleiðara

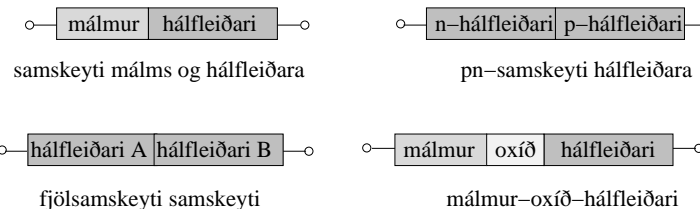
	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA
	B	C	N	O	
	Al	Si	P	S	
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Cd	In	Sn	Sb	Te
	Hg	Tl	Pb	Bi	Po

- 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**

11

## Hálfleiðaratól

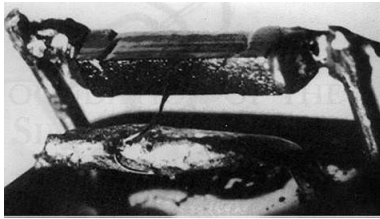
- Hálfleiðaratól eiga sér yfir 125 ára sögu
- Öll hálfleiðaratól má mynda úr nokkrum grunn byggingareiningum
- Grunn einingar hálfleiðaratóla:



12

## Hálfleiðaratól

- Fyrsti tvískeytiti smárinn var búinn til úr german í janúar 1948



- Á fimm árum frá því að rannsóknarhópurinn hafði verið settur saman var smárinn fundin upp og verkun hans skilin
- Næsta skrefið var frekari þróun og lausn verkfræðilegra vandamála þannig að hagnýta mætti þessa mikilvægu uppgötvun
- Þetta tók 8 ár

13

## Ný tól I

- 1874 Samskeyti málms og hálfleiðara (Braun)
- 1907 Ljósútgeislandi tvistur (Round)
- 1947 Tvískeyttur smári (Bardeen, Brattain og Shockley)
- 1949 p-n samskeyti (Shockley)
- 1952 Thyristor (Ebers)
- 1954 Sólarhlaða (Chapin, Fuller og Pearson)
- 1957 Fjölsamskeyta tvískeyttur smári (Kroemer)
- 1958 Smugtvistur (Esaki)
- 1960 MOSFET (Kahng og Atalla)
- 1962 Leysir (Hall og félagar)

14

## Ný tól II

- 1963 Fjölsamskeytaleysar (Kroemer, Alferov og Kazarinov)
- 1963 Gunntvistur (Gunn)
- 1965 IMPATT tvistur (Johnston, DeLoach og Cohen)
- 1966 MESFET (Mead)
- 1967 Nonvolatile hálfleiðaraminni (Kahng og Sze)
- 1970 Charge-coupled tól (CCD) (Boyle og Smith)
- 1974 Resonant tunneling diode (Chang, Esaki og Tsu)
- 1980 MODFET (Mimura og félagar)
- 1994 Einnar rafeindar minniseining við stofuhita (Yano og félagar)
- 2001 20 nm MOSFET (Chau)

15

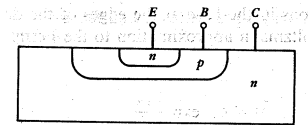
## Hálfleiðaratól

- Fyrir 1950 fékkst Geophysical Services, Inc. aðeins við olíuleit
- Í janúar 1953 var stofnuð þar rannsóknarstofa í rafeindatækni og í dag er fyrirtækið þekkt sem Texas Instruments, Inc.
- Þeir markaðssettu fyrsta smáraútvarpið í október 1954
- Þeir framleiddu fyrsta kísilsmárann í maí 1954
- Þeim tókst að framleiða hreinan kísil í miklu magni 1956

16

## Hálfleiðaratól

- Á sjötta áratugnum var áherslan ekki aðeins á hvernig búa eigi til betri tól, heldur ekki síður þróun einfaldari framleiðslutækni
- Leitast var við að finna ferli svo framleiða mætti tólin í miklu magni, þau væru áreiðanleg, endurtakanleg og ódýr

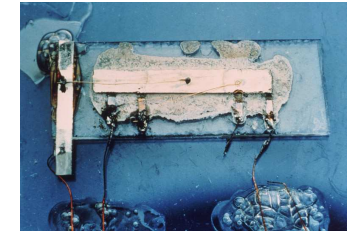


- Flati smárinn varð mögulegur með samspili sveims og gríma úr oxíði
- Iðnaðurinn hafði náð tókum á þessari tækni 1956

17

## Fyrstu smárásirnar

- Smárás er rás sem inniheldur nokkur tól sem vinna innan eins og sama hálfleiðarabúts
- Sótt var um einkaleyfið fyrir fyrstu smárásina af Jack Kilby hjá Texas Instruments í febrúar 1959



Birt með góðfúslegu leyfi Texas Instruments

18

## Fyrstu smárásirnar

- Smárás Kilby var í raun tvær rásir í einum og sama germanbútnum
- Hún innihélt einn tvískeyttan smára, þrjú viðnám og einn þétti
- Hann tengdi saman tólin, viðnám, tvista og smára, í höndunum (hybrid)



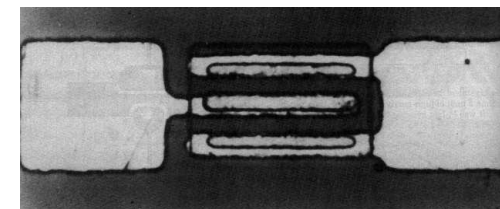
Birt með góðfúslegu leyfi Texas Instruments

- Kilby hlaut Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði árið 2000 fyrir framlag sitt til upplýsingatækninnar

19

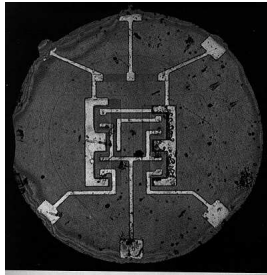
## Fyrstu smárásirnar

- Um svipað leyti (1959) höfðu Robert Noyce og Gordon Moore hjá Fairchild Semiconductor náð tókum á að tengja saman tólin á framleiðanlegan hátt
- Noyce framleiddi alla rásina í eitt hálfleiðandi undirlag og tengdi tól saman með málmhúðun (ál) (monolithic) og lithography
- Flatir smárar voru komnir í framleiðslu 1959 og smárásir 1962 hjá Fairchild Semiconductors



20

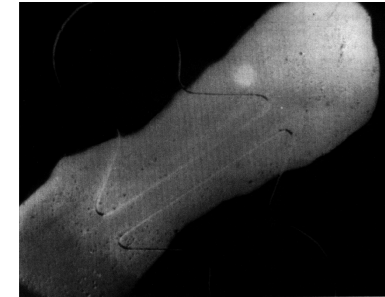
## Fyrstu smárásirnar



- Fyrstu smárásirnar, sem voru framleiddar af Fairchild Semiconductor og Texas Instruments, samanstóðu af nokkrum smárum og viðnámmum. Þannig voru búin til einföld hlið og magnarar.
- Þar með hófst þróun smárása fyrir alvöru

21

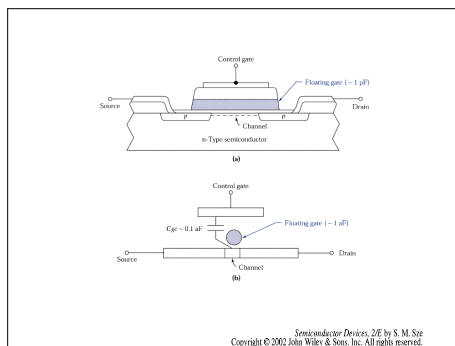
## MOSFET



- Hinn fyrsti MOSFET (1960)
- Hann var gerður úr kísli oxíði og álhúð
- Hann er mikilvægasta tólið í nútíma smárasum
- Rásalengd er 20  $\mu\text{m}$  og gáttaroxíðið er um 100 nm þykkt

22

## Nonvolatile minni



- Nonvolatile hálfleiðara minni geymir upplýsingar þó að afl sé tekið af (a)
- Með því að stytta lengd gáttar ( $< 10 \text{ nm}$ ) fæst einnar rafeindar minni (b)

23

## Tækniframfarir

- Mikið af þeirri tækni sem þróuð var fyrir hálfleiðaraiðnaðinn á rætur í aldagamalli verktækni

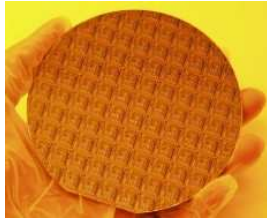
Lithography



- Sem dæmi þá var lithography fundin upp 1798 af Alois Senefelder og þá var mynstrið eða myndin flutt af steinplötu (litho)
- Sveim óhreinindaátóma í hálfleiðurum er mikilvæg fyrir framleiðslu tóla. Fræðin um sveim voru sett fram af Fick 1855 en innleidd í hálfleiðaraiðnaðinn í einkaleyfi til Pfann 1952

24

## Tækniframfarir



- Með flóknari smárásun hefur þóunin verið frá því að nota NMOS yfir í CMOS tækni (bæði NMOS og PMOS) til að mynda rökrásirnar (1963)
- Minniseiningin DRAM kom fram 1967. Hún samanstendur af hleðslugeymandi þétti og MOSFET. MOSFET gegnir því hlutverki að hlaða eða afhlaða þéttinn. DRAM er volatile og dregur tiltölulega mikið afl

25

## Tækniframfarir

- 1918 Czochralski ræktun kristalla (Czochralski)
- 1925 Bridgman ræktun kristalla (Bridgman)
- 1952 Samsettur III-V hálfleiðarar (Welker)
- 1952 Sveim (Pfann)
- 1957 Lithographic photoresist (Andrus)
- 1957 Oxide masking (Frosch og Derrick)
- 1957 Lagvöxtur með CVD (Sheftal, Kokorish og Krasilov)
- 1958 Jónaígræðsla (Shockley)
- 1959 Hybrid integrated circuit (Kilby)
- 1959 Monolithic integrated circuit (Noyce)

26

## Tækniframfarir

- 1960 Planar process (Hoerni)
- 1963 CMOS (Wanlass og Sah)
- 1967 DRAM (Dennard)
- 1969 Gátt úr fjölkristölluðum kísli (Kerwin, Klein og Sarace)
- 1969 MOCVD (Manasevit og Simpson)
- 1971 Þurr æting (Irving, Lemons og Bobos)
- 1971 Sameindaágræðsla (MBE) (Cho)
- 1971 Örgjörvi (Intel 4004) (Hoff og félagar)
- 1982 Trench isolation (Rung, Momose og Nagakubo)
- 1989 Chemical mechanical polishing (Davari og félagar)
- 1993 Millitengi úr kopar (Paraszczak og félagar)

27

## Tækniframfarir

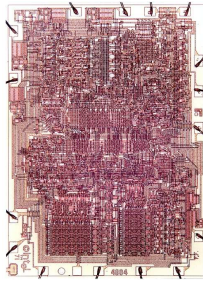


Birt með góðfúslegu leyfi Texas Instruments

- Fyrsti vasareiknirinn var hannaður af Jack Kilby, Jerry Merryman og James Van Tassel hjá Texas Instruments 1967. Víddir hans voru 4-1/4 x 6-1/8 x 1-3/4-inches

28

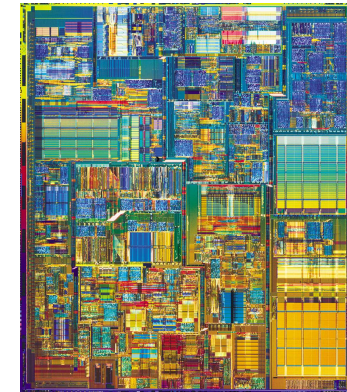
## Tækniframfarir



- Fyrsti örgjörvinn 1971
- Hinn 4-bitu 4004 örgjörvi hafði 108 kHz klukkutíðni og 2300 smára, hraðinn er um 0.06 MIPS
- Til samanburðar hefur Intel P6 133 MHz klukkutíðni, inniheldur 5.5 milljónir smára og er 300 MIPS

29

## Tækniframfarir



- Intel Pentium 4 örgjörvinn (2000) hefur 42 milljónir smára byggða á 0.18  $\mu\text{m}$  tækni og vinnur á 1.5 GHz klukkutíðni

30

## Tækniframfarir



- Intel Xeon örgjörvinn (2007) hefur 820 milljónir smára byggða á 45 nm tækni með high- $\kappa$  gáttarrafsvara og vinnur á  $> 3$  GHz klukkutíðni og er dual eða quad core

31

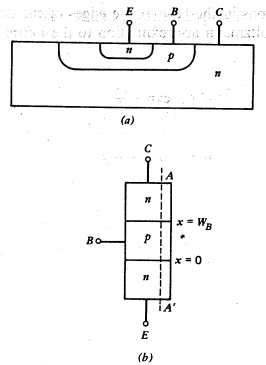
## Tækniframfarir

- 1947 Fyrsti smárinn
- 1956 Fyrsta hliðið
- 1958 Fyrsta smárásin
- 1960 Rökrása fjölskylda
- 1962 Transistor transistor logic (TTL)
- 1970s MOS hlið
- 1971 Fyrsti örgjörvinn (NMOS) Intel 4004
- 1974 Annar örgjörvinn (NMOS) Intel 8080
- 1980s CMOS

32



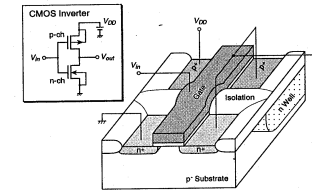
## Tvískeyttir smárar



- Í rúma tvo áratugi voru tvískeyttir smárar ráðandi í smárásun
- Tvískeyttir smárar draga meira afl en MOS sem takmarkar fjölda og þéttni smára í smárás.

33

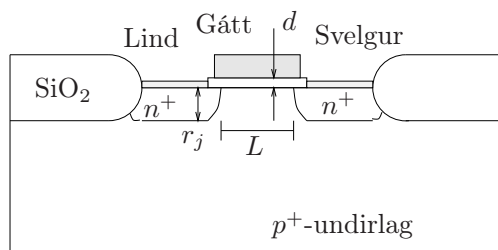
## MOS



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

34

## MOS

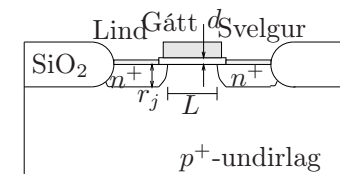


Helstu kennistærðir MOSFET eru

- rásalengdin,  $L$
- þykkt oxíðlagsins,  $d$
- dýpt samskeytanna,  $r_j$
- íbótarþéttleiki undirlags,  $N_A$

35

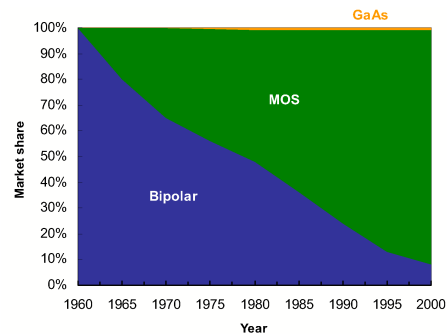
## MOS



- MOS smárinn samanstendur af **lind**, **svelg** og **gátt**
- 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
- Smárinn vinnur því sem stafrænn rofi þar sem gáttarspennan stýrir því hvort hann er opinn eða lokaður

36

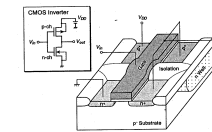
## MOS



- Frá því á síðari hluta níunda áratugarins hafa CMOS rásir verið notaðar í allar venjulegar rásir eins og örgjörva og minni
- Þetta er vegna þess að aflnotkun og tilsvarendi ofhitnun takmörkuðu þökkun n-MOS við  $10^6$  hlið/cm<sup>2</sup>.

37

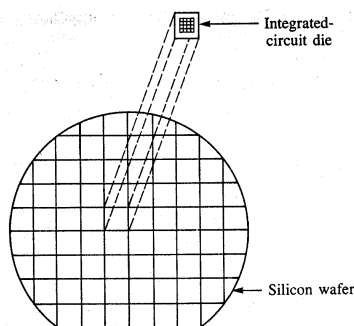
## MOS



- 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
- Meðalafnotkun er því lítil.

38

## Þróunin

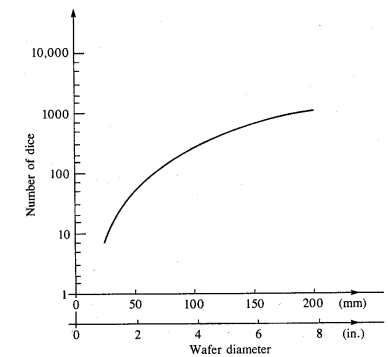
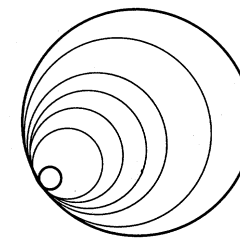


- Í upphafi var einn kísil smári á hverri flögu sem var 1 - 2 mm á kant.
- Í dag eru nokkrar milljónir tóla á hverri flögu sem getur verið 7 mm × 7 mm.

39

## Þróunin

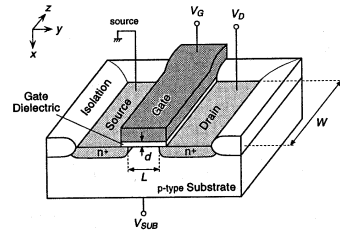
- Wafer size
- 1965 - 1"
- 1975 - 3"
- 1980 - 5"
- 1984 - 5"
- 1988 - 6"
- 1990 - 8"
- ??? - 12"



- Í árdaga voru skífurnar 1" - 2" í þvermál, nú eru 8" skífur notaðar í framleiðslunni

40

## Þróunin



	1970	1990	1994	X
• Time				
• Wafer	2"	6"	8"	
• Feature	7 $\mu$ m	1 $\mu$ m	.5 $\mu$ m	
• DRAM	1kb	1Mb	64Mb	
• Chip	0.1cm <sup>2</sup>	1cm <sup>2</sup>	2cm <sup>2</sup>	
• Wafer \$	\$50	\$500	\$1000	
• Yield %	20%	80%	80%	
• Chip \$	\$2	\$4	\$4	
• Cost/bit	0.2c	0.0004c	0.0003c	

- Auknum fjölda tóla í smáras hefur verið náð með því að minnka hvern smára
- Í dag er  $L = 45$  nm og gáttaroxíðið er úr  $\text{HfO}_2$  sem hafa hærri rafsvörunarstuðul en  $\text{SiO}_2$  og geta þess vegna verið þykkari

## Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2ed., John Wiley & Sons, 2002, kaflí 1
- [2] R. B. Schaller, Moore's law: past, present and future, *IEEE Spectrum*, **34**(6)(1997) 53 - 59
- [3] E. Braun and S. MacDonald, *Revolution in Miniature: The History and Impact of Semiconductor Electronics*, Cambridge University Press, 1978
- [4] F. Faggin, The Making of the First Microprocessor, *Solid State Circuits Magazine*, **1**(1)(2009) 8 - 21
- [5] I. M. Ross, The foundation of the silicon age, *Physics Today*, **50**(12)(1997) 34 - 39
- [6] B. Lojek, Early development of polysilicon-gate MOS technology at Fairchild Semiconductor, *Solid State Circuits Magazine*, **1**(4)(2009) 18 - 25
- [7] M. Riordan and L. Hoddeson, The Moses of Silicon Valley, *Physics Today*, **50**(12)(1997) 42 - 47
- [8] M. Riordan, L. Hoddeson and C. Herring, The invention of the transistor, *Reviews of Modern Physics*, **71** (1999) S336 - S345
- [9] J. M. Rabaey, *Digital integrated circuits: A design perspective*, Prentice - Hall, 1996
- [10] S. M. Sze, Introduction, in *VLSI Technology*, editor S. M. Sze, McGraw-Hill, 1988
- [11] P. A. Packan, Pushing the limits, *Science*, **285**, (1999) 207 - 208
- [12] J. Birnbaum and R. S. Williams, Physics and the Information Revolution *Physics Today*, **53**, (1)(2000) 38 - 42