

Framleiðsla smárása:

Saga og þróun tölvutækninnar

kafli 1 a

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

1. vika haust 2016

Inngangur

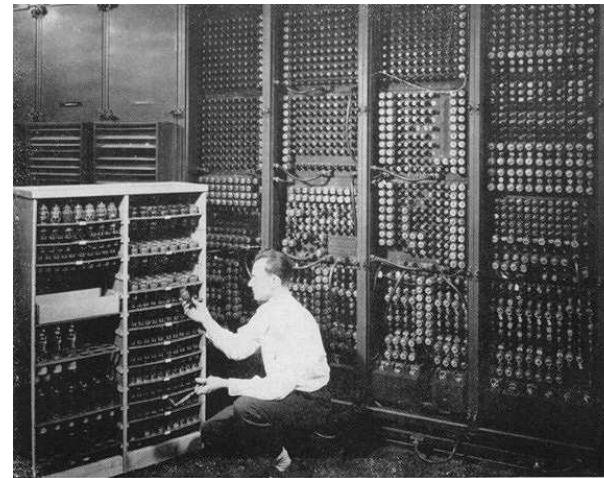
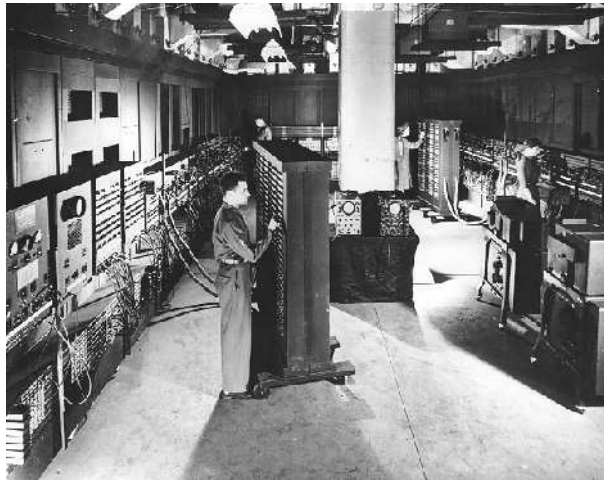
- Hálfleiðandi tól eru undirstaða rafeindaiðnaðarins
- Rafeindaiðnaðurinn er stærsti iðnaður veraldar í dag með heildarsölu sem er meiri en 1000 milljarðar dollara á ári síðan 1998
- Upplýsingatæknin byggir á hálfleiðaratólum og er skilningur á þeim lykilatriði til framfara
- Tekjur hálfleiðaraiðnaðarins verða 327.2 milljarðar dollara 2016, sem er gert ráð fyrir hækki í 333.7 milljarða dollara 2017 og 340.9 milljarða dollar 2018

Upphafið

- Upphaf rafeindatekninnar 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



Lampar



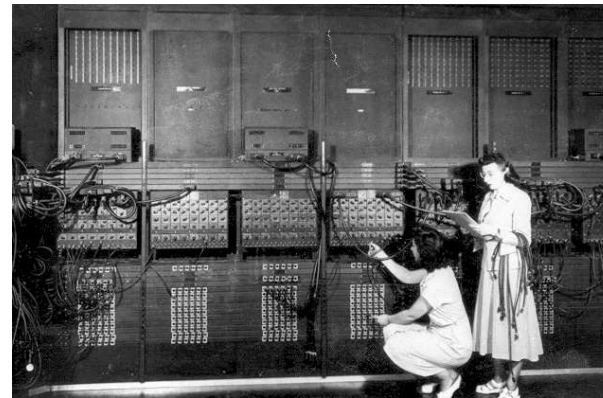
Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

- Fyrsta raftölvan, 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

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 níu árum liðnum, var hún enn öflugasta tölva heims
- Herinn gafst upp á að nota hana vegna kostnaðar við rekstur og viðhald
- Menn gerðu sér ljóst að lengra yrði ekki farið með lampatækni

Lampar

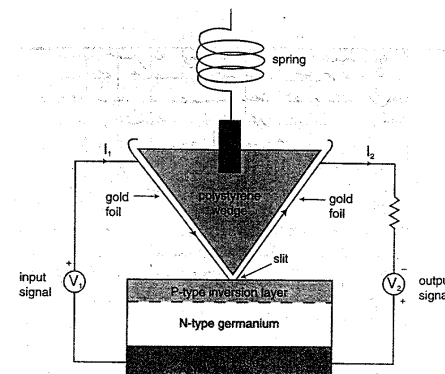
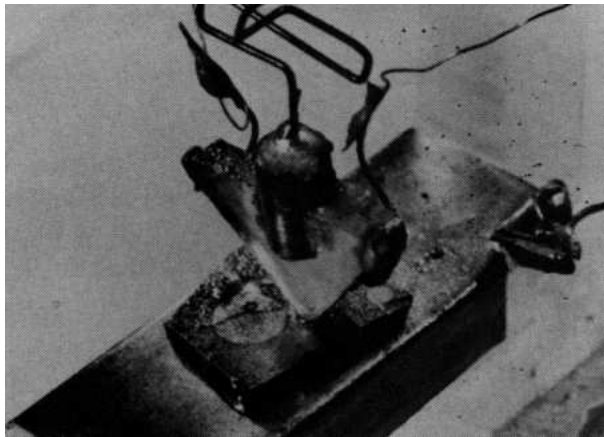


- Markaður fyrir lampa náði hámarki sínu 1955 í fjölda seldra lampa og 1957 í verðmæti seldra lampa
- Markaðurinn fyrir lampa fór ekki að dragast verulega saman fyrr en á síðari hluta sjöunda áratugarins

Hálfleiðaratól

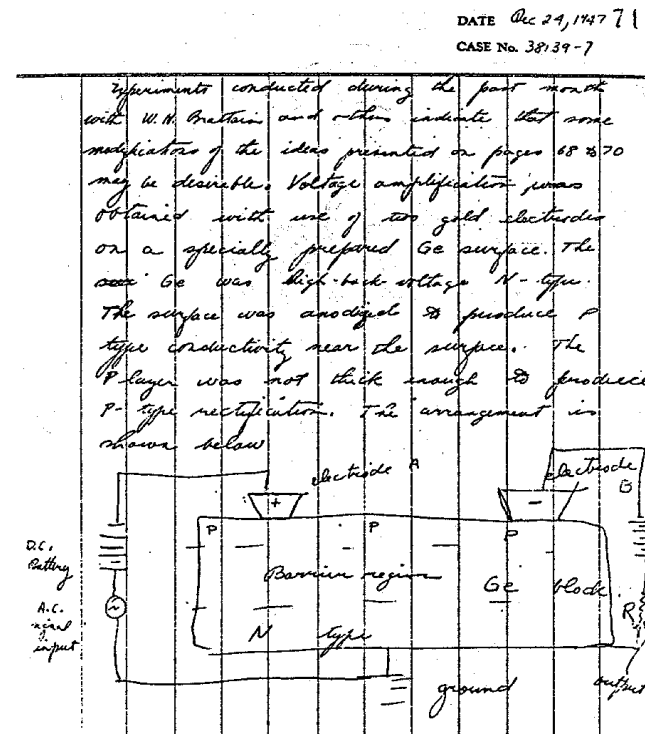
- Mervin Kelly, þá forseti Bell Laboratories, gerði sér grein fyrir takmörkunum þessarar tækni
- Hann taldi að skiptihraði liða, og ending og aflnotkun lampa myndi takmarka framfarir í fjarskiptum og annarri rafeindatækni
- Sumarið 1945 setti hann saman rannsóknarhóp til að skoða og skilja hálfleiðara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

Hálfleiðaratól



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

Hálfleiðaratól



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

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 örlitlu magni óhreininda

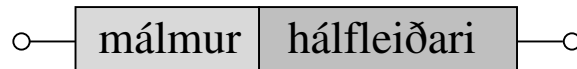
Leiðni hálfleiðara

IIIA		IVA		VA		VIA			
5	10.811	6	12.01115	7	14.0067	8	15.9994		
	B		C		N		O		
	Boron		Carbon		Nitrogen		Oxygen		
13	26.9815	14	28.086	15	30.9738	16	32.064		
	Al		Si		P		S		
	Aluminum		Silicon		Phosphorus		Sulfur		
IIB		IIIA		IIIA		IIIA			
30	65.37	31	69.72	32	72.59	33	74.922	34	78.96
	Zn		Ga		Ge		As		Se
	Zinc		Gallium		Germanium		Arsenic		Selenium
48	112.40	49	114.82	50	118.69	51	121.75	52	127.60
	Cd		In		Sn		Sb		Te
	Cadmium		Indium		Tin		Antimony		Tellurium
80	200.59	81	204.37	82	207.19	83	208.980	84	(210)
	Hg		Tl		Pb		Bi		Po
	Mercury		Thallium		Lead		Bismuth		Polonium

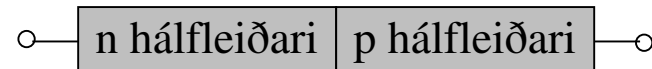
- Í kísilgrindinni er sérhvert kísilatóm tengt fjórum næstu grönnum samgildum tengjum
- Þegar íbætt er með atómi sem hefur fimm gildisrafeindir eykst þéttleiki hreyfanlegra hleðslubera með því að þau gefa frá sér **frjálsar rafeindir**
- Íbótaratóm með þrjár gildisrafeindir þarf að gleypa eina rafeind þegar það situr í sæti kísils, og myndar með því jákvætt hlaðinn hleðslubera sem nefndur er **hola**

Hálfleiðaratól

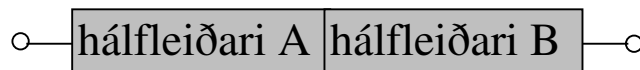
- Hálfleiðaratól eiga sér yfir 125 ára sögu
- Öll hálfleiðaratól má mynda úr nokkrum grunn byggingareiningum
- Grunn einingar hálfleiðaratóla:



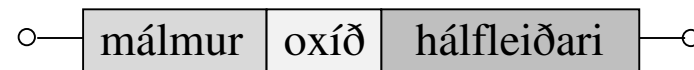
samskeyti málms og hálfleiðara



pn samskeyti hálfleiðara



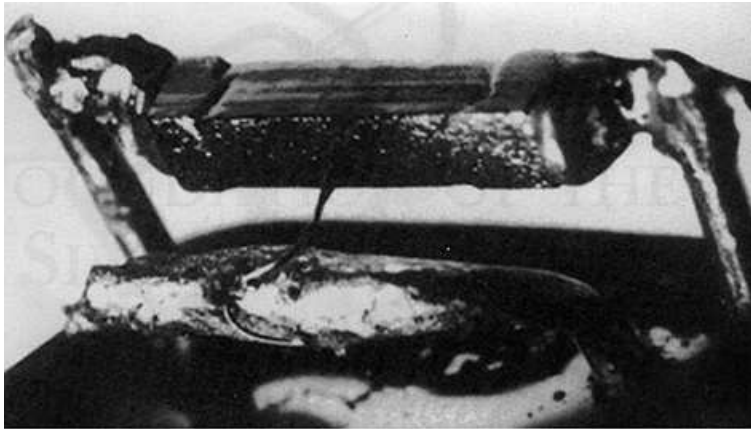
fjölsamskeyti samskeyti



málmur oxíð hálfleiðari

Hálfleiðaratól

- Fyrsti tvískeytti 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

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)

Ný tól II

- 1958 Smugtvistur (Esaki)
- 1960 MOSFET (Kahng og Atalla)
- 1962 Leysir (Hall og félagar)
- 1963 Fjölsamskeytaleyser (Kroemer, Alferov og Kazarinov)
- 1963 Gunntvistur (Gunn)
- 1965 IMPATT tvistur (Johnston, DeLoach og Cohen)
- 1966 MESFET (Mead)

Ný tól III

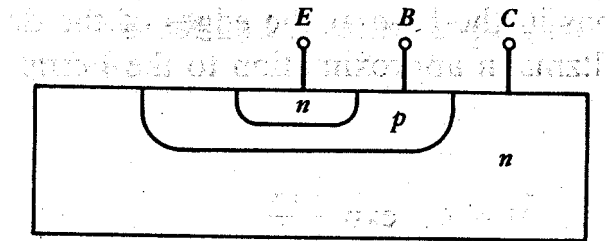
- 1967 Nonvolatile hálfleiðaraminni (Kahng og Sze)
- 1970 Charge-coupled tól (CCD) (Boyle og Smith)
- 1974 Resonant tunneling diode (Chang, Esaki og Tsu)
- 1980 MODFET (Mimura og félagar)
- 1994 Einnar rafeindar minniseining við stofuhita (Yano og félagar)
- 1999 finFET (Hu og félagar)
- 2001 20 nm MOSFET (Chau)

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

Hálfleiðaratól

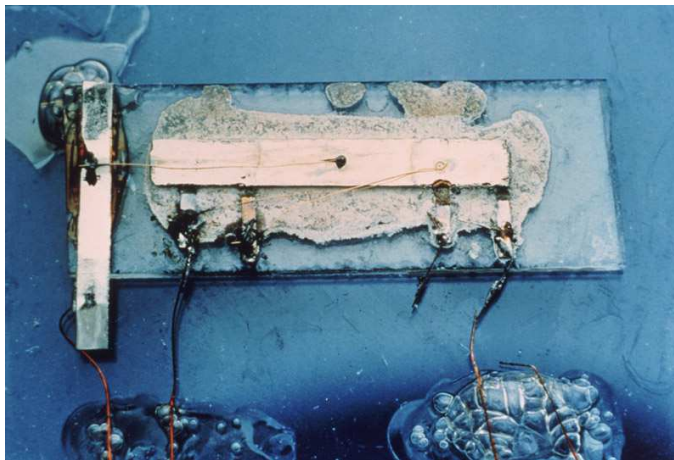
- Á sjötta áratugnum var áherslan ekki aðeins á hvernig búa eigi til betri tól, heldur ekki síður þróun einfaldari framleiðslutækni
- Leitast var við að finna ferli svo framleiða mætti tólin í miklu magni, þau væru áreiðanleg, endurtakanleg og ódýr



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

Fyrstu smárásirnar

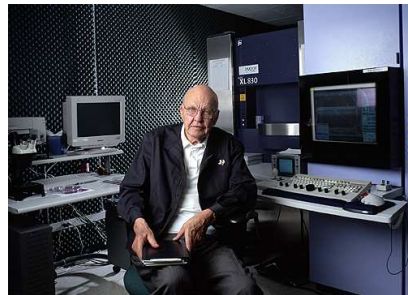
- Smárás er rás sem inniheldur nokkur tól sem vinna innan eins og sama hálfleiðarabúts
- Sótt var um einkaleyfið fyrir fyrstu smárásina af Jack Kilby hjá Texas Instruments í febrúar 1959



Birt með góðfúslegu leyfi Texas Instruments

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)



SPECTRAL LINES

Jack St. Clair Kilby (1923-2005): Engineering Monolith

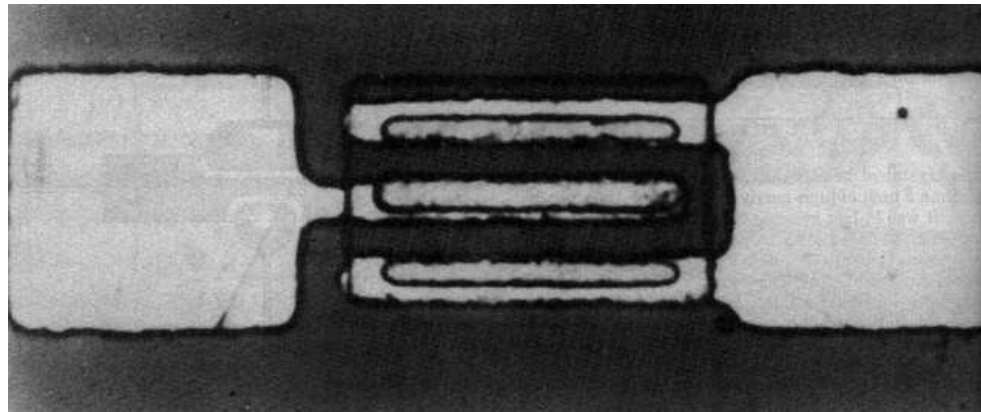
Jack St. Clair Kilby, the inventor of the integrated circuit, is shown in a portrait. The text discusses his life and work, including his role in the development of the integrated circuit and his contributions to the field of electronics. It mentions his work at Texas Instruments and his role in the development of the first microprocessor, the Intel 4004. The text also notes that he was awarded the Nobel Prize in Physics in 2000 for his work on the integrated circuit.

Birt með góðfúslegu leyfi Texas Instruments

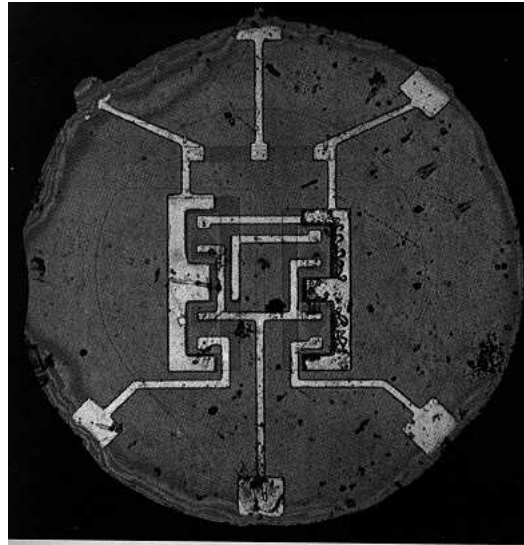
- Kilby hlaut Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði árið 2000 fyrir framlag sitt til upplýsingatækninnar

Fyrstu smárásirnar

- Um svipað leyti (1959) höfðu Robert Noyce og Gordon Moore hjá Fairchild Semiconductor náð tökum 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



Fyrstu smárásirnar



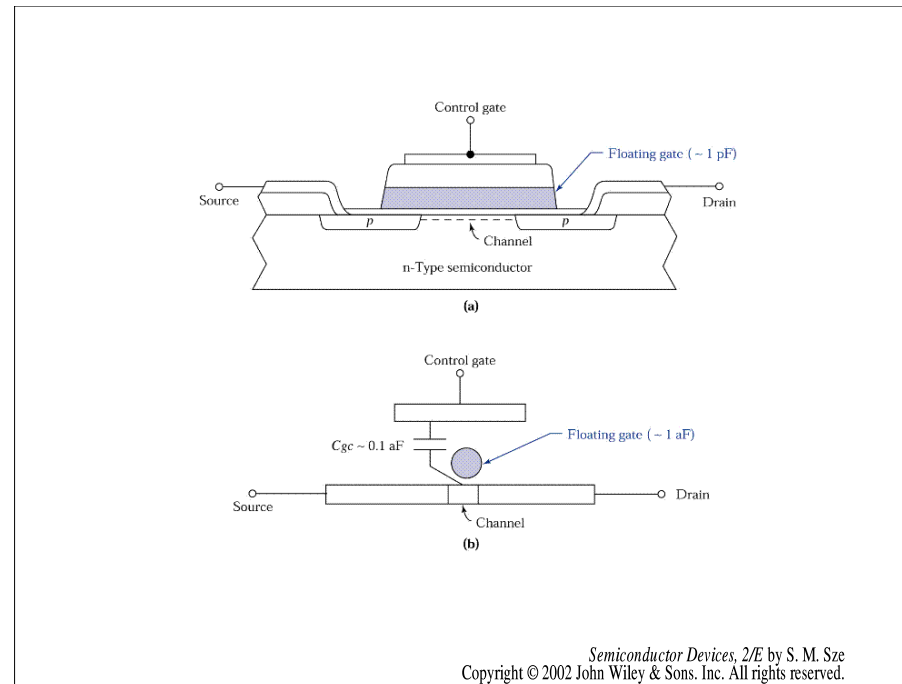
- Fyrstu smárásirnar, sem voru framleiddar af Fairchild Semiconductor og Texas Instruments, samanstóðu af nokkrum smárum og viðnámmum
- Þannig voru búnin til einföld hlið og magnarar
- Þar með hófst þróun smárása fyrir alvöru

MOSFET



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

Nonvolatile minni

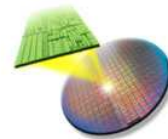


- Nonvolatile hálfleiðara minni geymir upplýsingar þó að afl sé tekið af
- Með því að stytta lengd gáttar (< 10 nm) fæst einnar rafeindar minni

Tækniframfarir

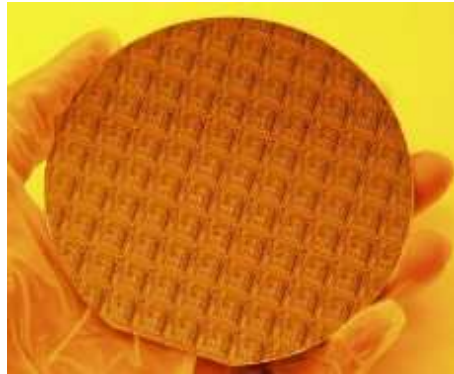
- Mikið af þeirri tækni sem þróuð var fyrir hálfleiðaraiðnaðinn á rætur í aldagamalli verktækni

Lithography



- Sem dæmi þá var lithography fundin upp 1798 af Alois Senefelder og þá var mynstrið eða myndin flutt af steinplötu (litho)
- Sveim óhreinindaatóma 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

Tækniframfarir



- Með flóknari smárásam 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

Tækniframfarir

- 1918 **Czochralski ræktun kristalla** (Czochralski)
- 1925 **Bridgman ræktun kristalla** (Bridgman)
- 1952 **Samsettir 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)

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 **Purr 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)

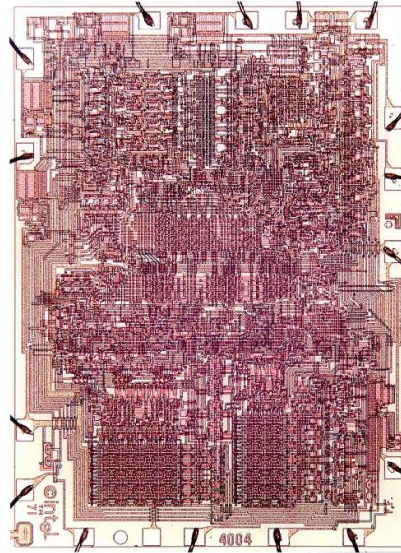
Tækniframfarir



Birt með góðfúslegu leyfi Texas Instruments

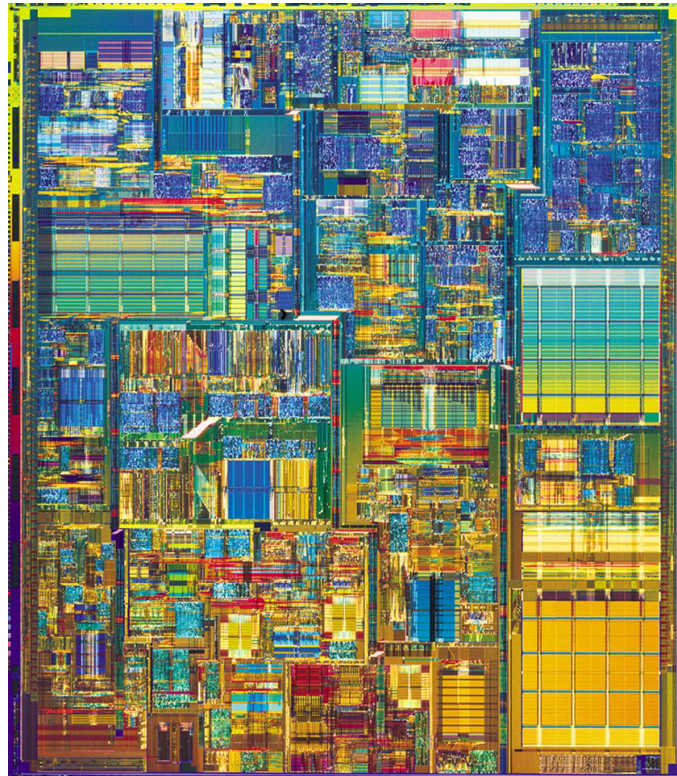
- Fyrsti vasareiknirinn var hannaður af Jack Kilby, Jerry Merryman og James Van Tassel hjá Texas Instruments 1967. Víddir hans voru 4-1/4 x 6-1/8 x 1-3/4-inches

Tækniframfarir



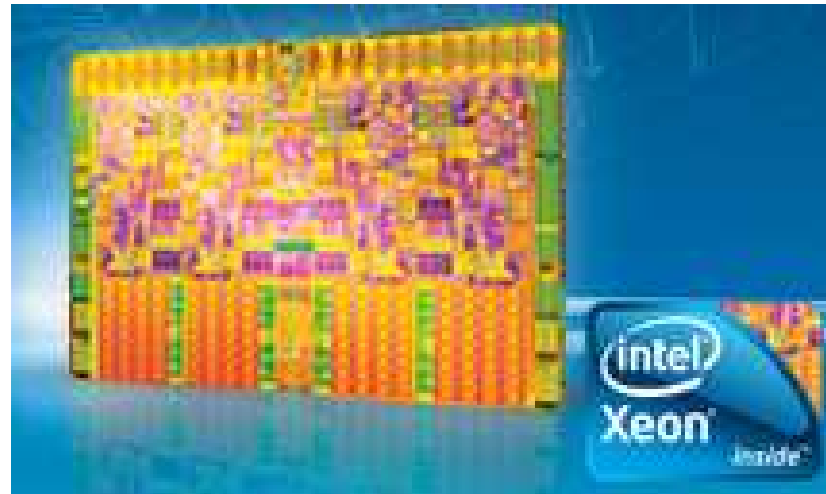
- Fyrsti örgjörvinn 1971
- Hinn 4-bitu 4004 örgjörvi hafði 108 kHz klukkuþíðni og 2300 smára, hraðinn er um 0.06 MIPS
- Til samanburðar hefur Intel P6 133 MHz klukkuþíðni, inniheldur 5.5 milljónir smára og er 300 MIPS

Tækniframfarir



- Intel Pentium 4 örgjörvinn (2000) hefur 42 milljónir smára byggða á 0.18 μm tækni og vinnur á 1.5 GHz klukkutíðni

Tækniframfarir



- Intel Xenon örgjörvinn (2007) hefur 820 milljónir smára byggða á 45 nm tækni með high- κ gáttarrafsvara (HfO_2) og vinnur á > 3 GHz klukktíðni og er dual eða quad core

Tækniframfarir

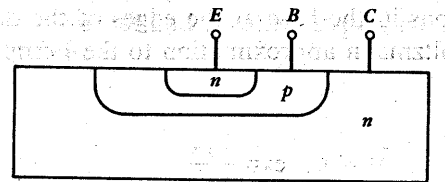


- Í dag (2016) er mesti fjöldi smára í örgjörva sem er hægt að kaupa, meira en 7.2 milljarðar smára, en það er Intel 22-core Xeon Broadwell-EP sem er byggður á 14 nm tækni (finFET) á 456 mm²

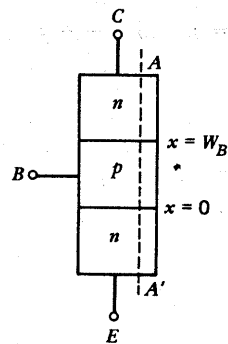
Tækniframfarir

- 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

Tvískeyttir smárar



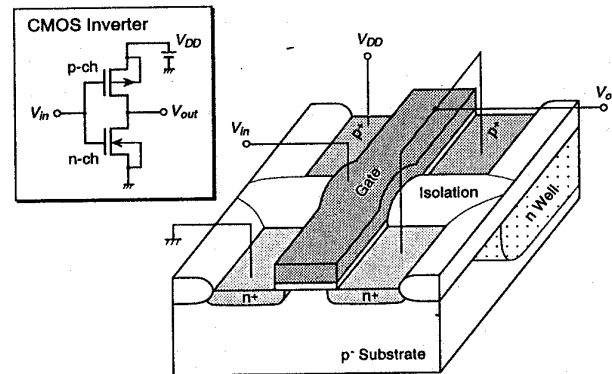
(a)



(b)

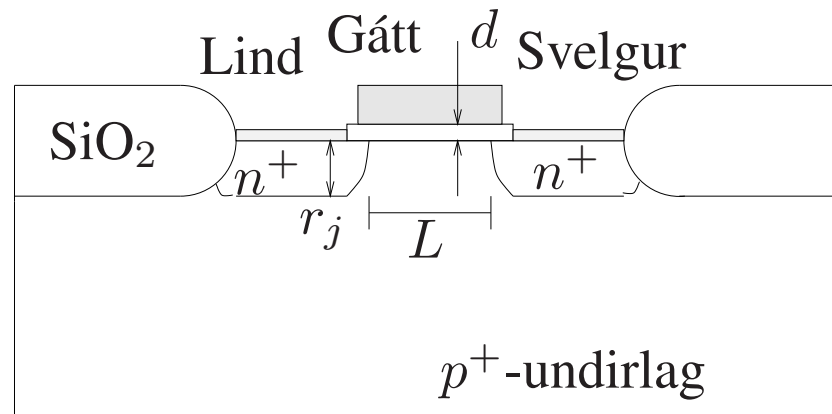
- Í rúma tvo áratugi voru tvískeyttir smárar ráðandi í smárásum
- Tvískeyttir smárar draga meira afl en MOS sem takmarkar fjölda og þéttni smára í smárás.

MOS



- Málmur-einangrari-hálfleiðari (MIS) smárar eru mikilvægustu tólin í nútíma ULSI rafeindatekni
- 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

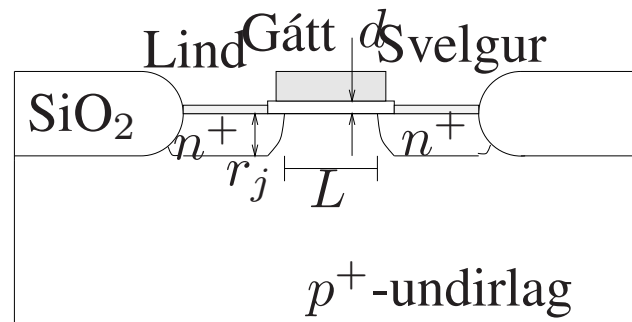
MOS



Helstu kennistærðir MOSFET eru

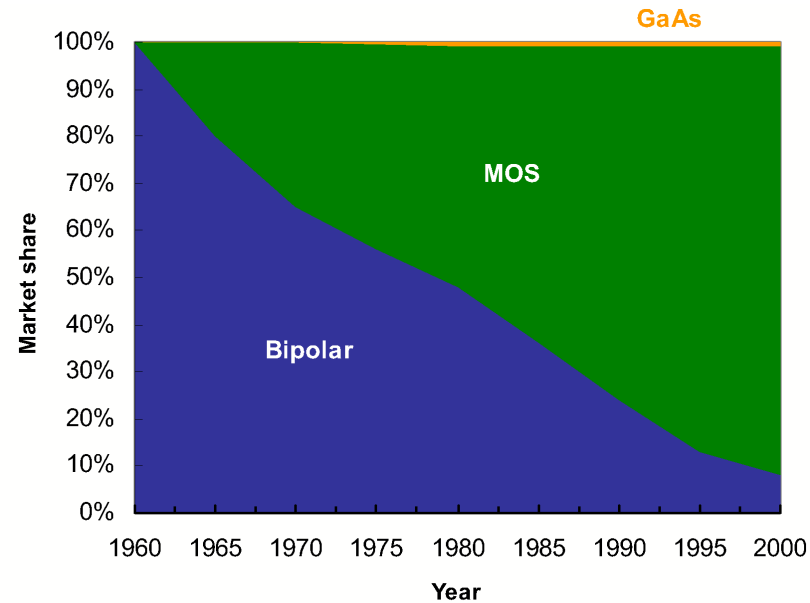
- rásalengdin, L
- þykkt oxíðlagsins, d
- dýpt samskeytanna, r_j
- íbótarþéttleiki undirlags, N_A

MOS



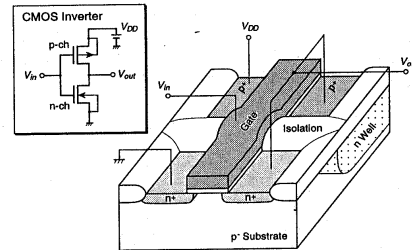
- MOS smárinn samanstendur af **lind**, **svelg** og **gátt**
- Lind og svelgur eru rafrænt einangruð frá hvort öðru með rásinni
- Gáttin er aðskilin frá rásinni með einangrandi kísiloxíði
- Með því að leggja spennu á gáttina yfir einangrandi oxíðið getur myndast leiðandi braut í rásinni milli lindar og svelgs
- Smárinn vinnur því sem stafrænn rofi þar sem gáttarspennan stýrir því hvort hann er opinn eða lokaður

MOS



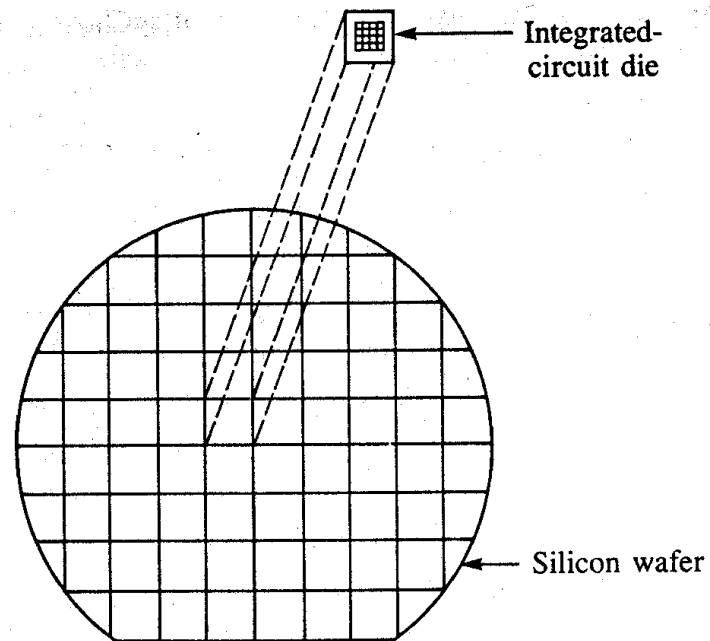
- Frá því á síðari hluta níunda áratugarins hafa CMOS rásir verið notaðar í allar venjulegar rásir eins og örgjörva og minni
- Þetta er vegna þess að aflnotkun og tilsvarendi ofhitnun takmörkuðu þökkun n-MOS við 10^6 hlið/cm².

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 smáarnir eru á, þannig að aðeins á meðan skipt er um stöðu fer einhver straumur um CMOSinn
- Meðalafnotkun er því lítil.

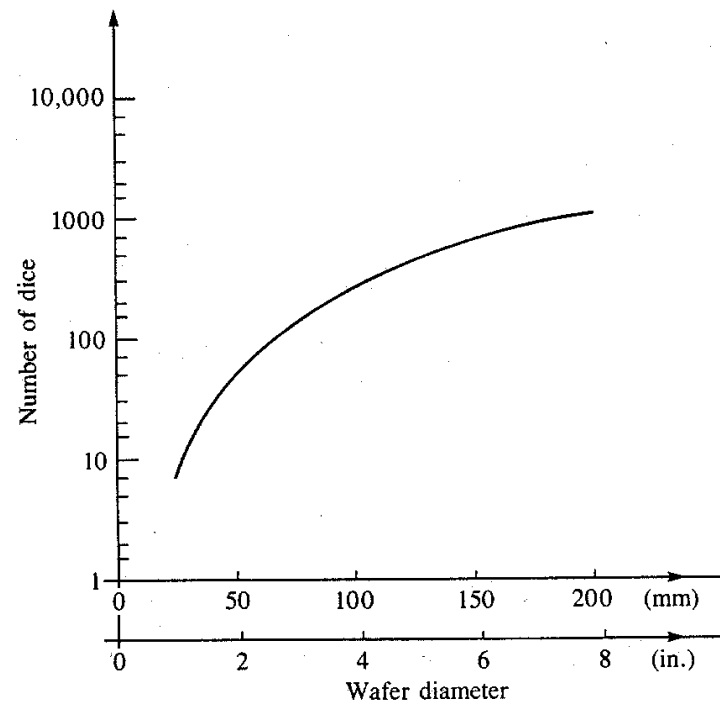
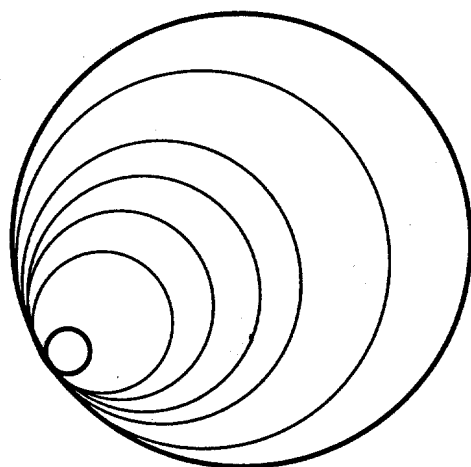
Þróunin



- 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.

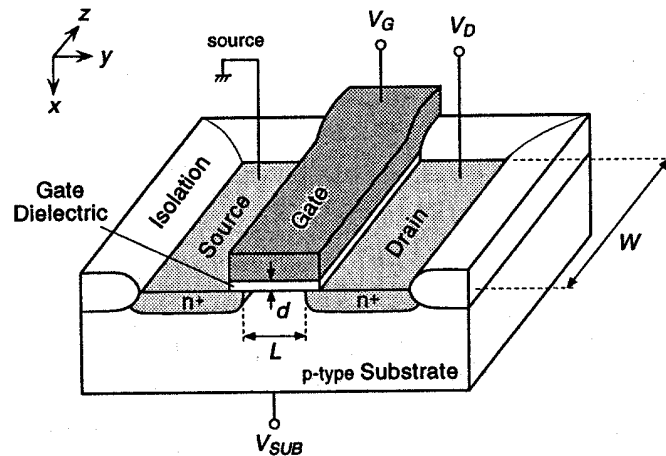
Þróunin

- 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 450 mm skífur notaðar í framleiðslunni

Þróunin



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

- Auknum fjölda tóla í smárás hefur verið náð með því að minnka hvern smára
- Í dag er $L = 22$ nm og gáttaroxíðið er úr HfO_2 sem hafa hærri rafsvörunarstuðul en SiO_2 og geta þess vegna verið þykkari

Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2ed., John Wiley & Sons, 2002, kaffli 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