

Framleiðsla smárása:

Saga og þróun tölvutækninnar

kafli 1 a

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

1. vika haust 2018

Inngangur

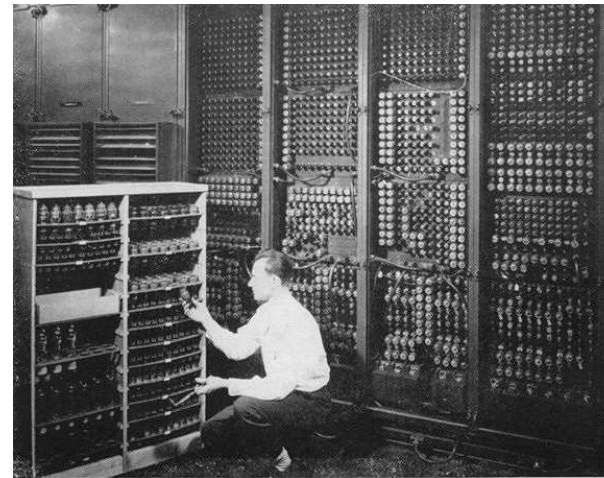
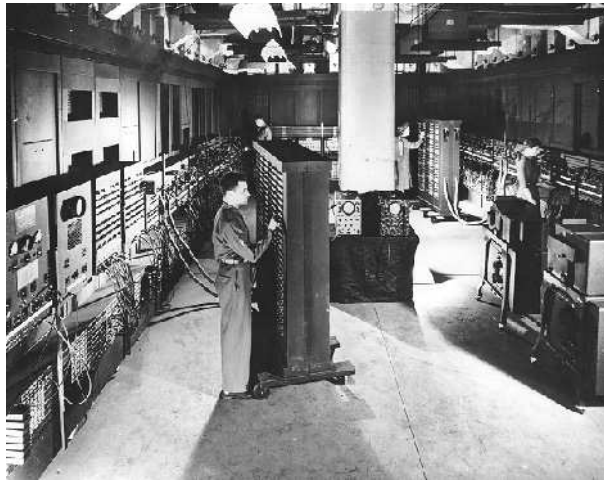
- Hálfleiðandi tól eru undirstaða rafeindaiðnaðarins
- Rafeindaiðnaðurinn er stærsti iðnaður veraldar í dag með heildarsölu sem er meiri en 1000 milljarðar dollara á ári síðan 1998
- Upplýsingatæknin byggir á hálfleiðaratólum og er skilningur á þeim lykilatriði til framfara
- Tekjur hálfleiðaraiðnaðarins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



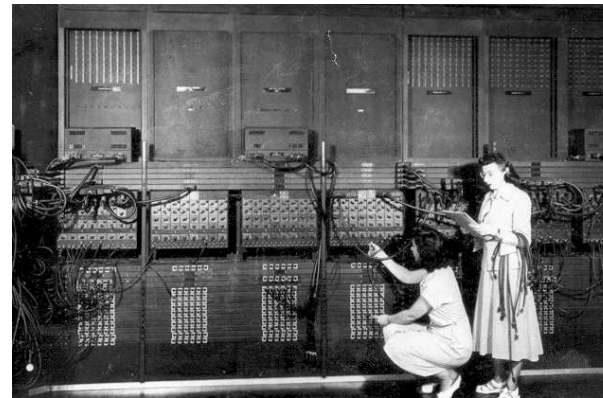
Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

- 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

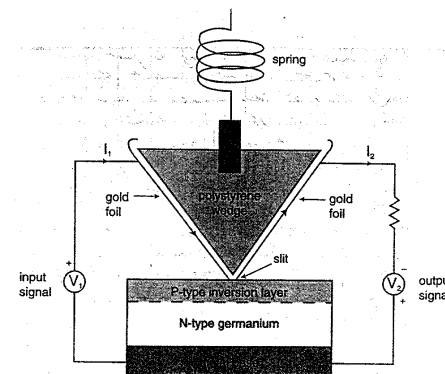
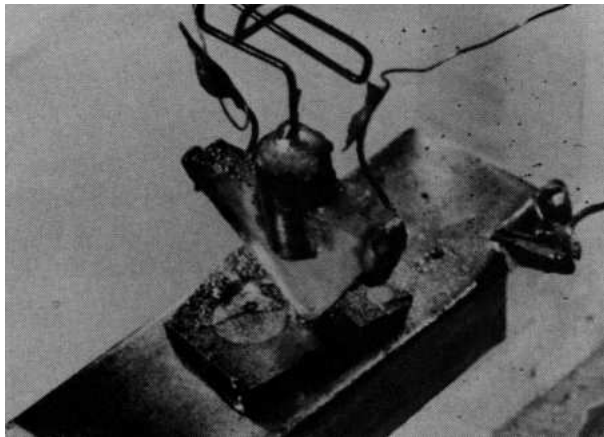


- Markaður fyrir lampa náði hámarki sínu 1955 í fjölda seldra lampa og 1957 í verðmæti seldra lampa
- Markaðurinn fyrir lampa fór ekki að dragast verulega saman fyrr en á síðari hluta sjöunda áratugarins

Hálfleiðaratól

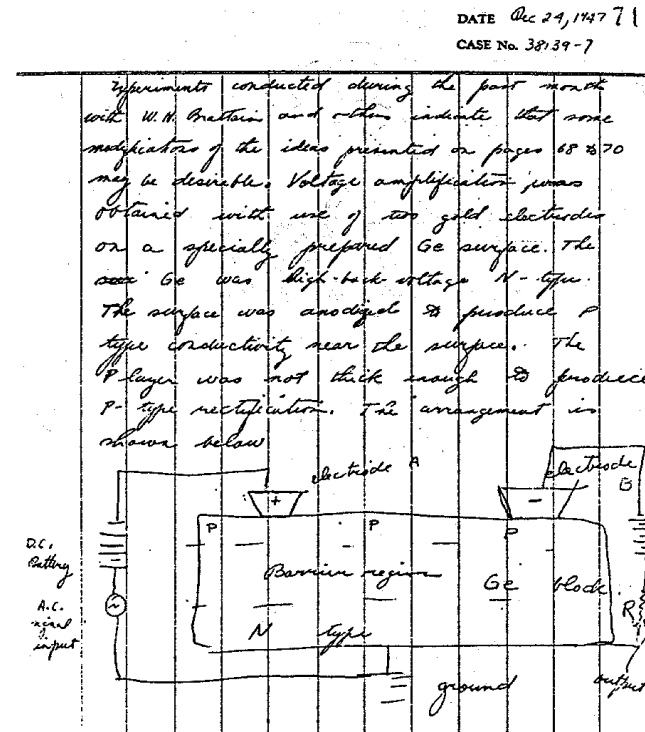
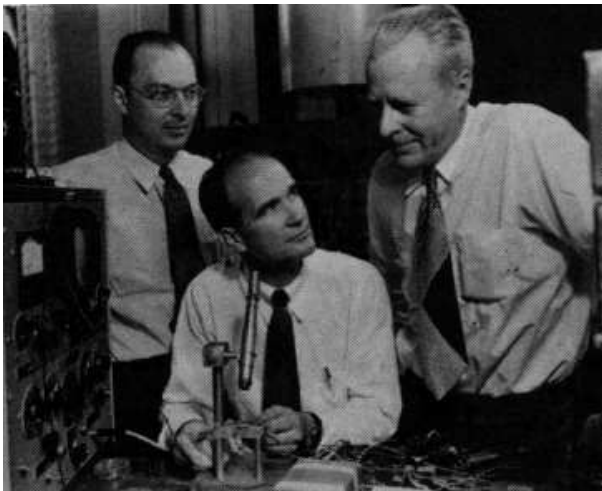
- Mervin Kelly, þá forseti Bell Laboratories, gerði sér grein fyrir takmörkunum þessarar tækni
- Hann taldi að skiptihraði liða, og ending og aflnotkun lampa myndi takmarka framfarir í fjarskiptum og annarri rafeindatækni
- Sumarið 1945 setti hann saman rannsóknarhóp til að skoða og skilja hálfleiðara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

Hálfleíðaratól

230

LETTERS TO THE EDITOR

to have a positive dn/dT and is considered to have large homopolar bonding, similar reasoning predicts that $dn/d\rho$ is positive, i.e., $\lambda_p > 1$. In crystals containing radicals and in many glasses, positive dn/dT values are frequently obtained although their $dn/d\rho$ values are negative. In these materials there are effects within the radical which contribute mainly to dn/dT and only slightly to $dn/d\rho$. A more complete treatment of these subjects will be presented in a forthcoming paper.

H. Mottler, *Phys. Rev.* **47**, 912 (1943).
 R. S. Stein, *J. Appl. Phys.* **23**, 1143 (1948).
 P. N. Kramida, *Phys. Lett. Acad. Sci. USSR*, **26** (1947).
 A. E. Robertson and E. Ferryman, *Proc. Inst. Acad. Sci.*, **426**, 97 (1948).
 J. West and J. Maki, *Chem. Phys.* **10**, 427 (1945) reported a value of 0.7 for two diam diamond samples in agreement with our results. Their data also gives $n/\rho = 0.01$ and $dn/d\rho = -0.1$ for AGC in regular diamond. Mottler's prediction for AGC in diamonds with small ratio of emitter to collector is questionable. We do not agree with West and Maki's contention that the order of the diamond's resistance and active area to be correct as given by Ramachandran.²

The Transistor, A Semi-Conductor Triode

J. BARDEEN AND W. H. BRATTAIN,
 Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
 June 25, 1948

A THREE-ELEMENT electronic device which utilizes a newly discovered principle involving a semi-conductor as the basic element is described. It may be employed as an amplifier, oscillator, and for other purposes for which vacuum tubes are ordinarily used. The device consists of three electrodes placed on a block of germanium¹ as shown schematically in Fig. 1. Two, called the emitter and collector, are of the point-contact type and are placed in close proximity (separation = 0.05 to 0.25 cm) on the upper surface. The third is a large area low resistance contact on the base.

The germanium is prepared in the same way as that used for high back-voltage rectifiers.² In this form it is an N-type or excess semi-conductor with a resistivity of the order of 10 ohm cm. In the original studies, the upper surface was subjected to an additional anodic oxidation in a glycol borate solution³ after it had been ground and etched in the usual way. The oxide is washed off and plays no direct role. It has since been found that other surface treatments are equally effective. Both tungsten and phosphor bronze points have been used. The collector point may be electrically formed by passing large currents in the reverse direction.

Each point, when connected separately with the base electrode, has characteristics similar to those of the high

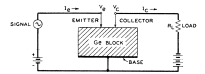


FIG. 1. Schematic of semi-conductor triode.

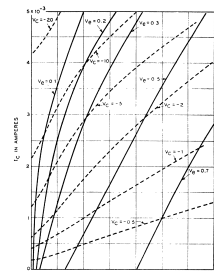


FIG. 2. I_c characteristics of an experimental semi-conductor triode. The currents and voltages are as indicated in Fig. 1.

back-voltage rectifier. Of critical importance for the operation of the device is the nature of the current in the forward direction. We believe, for reasons discussed in detail in the accompanying letter,⁴ that there is a thin layer next to the surface of P-type (defect) conductivity. As a result, the current in the forward direction with respect to the block is composed in large part of holes, i.e., of carriers of sign opposite to those normally in excess in the body of the block.

When the two point contacts are placed close together on the surface and d.c. bias potentials are applied, there is a mutual influence which makes it possible to use the device to amplify a.c. signals. A circuit by which this may be accomplished is shown in Fig. 1. There is a small forward (positive) bias on the emitter, which causes a current of a few milliamperes to flow into the surface. A reverse (negative) bias is applied to the collector, large enough to make the collector current of the same order or greater than the emitter current. The sign of the collector bias is such as to attract the holes which flow from the emitter so that a large part of the emitter current flows to and enters the collector. While the collector has a high impedance for flow of electrons into the semi-conductor, there is little impediment to the flow of holes into the point. If now the emitter current is varied by a signal voltage, there will be a corresponding variation in collector current. It has been found that the flow of holes from the emitter into the collector may alter the normal current flow from the base to the collector in such a way that the change in collector

current is larger than the change in emitter current. Furthermore, the collector, being operated in the reverse direction as a rectifier, has a high impedance (10 to 100 ohms) and may be matched to a high impedance load. A large ratio of output to input voltage, of the same order as the ratio of the reverse to the forward impedance of the point, is obtained. There is a corresponding power amplification of the input signal.

The d.c. characteristics of a typical experimental unit are shown in Fig. 2. There are four variables, two currents and two voltages, with a functional relation between them. If two are specified the other two are determined. In the plot of Fig. 2 the emitter and collector currents I_e and I_c are taken as the independent variables and the corresponding voltages, V_e and V_c , measured relative to the base electrode, as the dependent variables. The conventional directions for the currents are as shown in Fig. 1. In normal operation, I_e , I_c , and V_e are positive, and V_c is negative. The emitter current, I_e , is simply related to V_e and I_c . To a close approximation:

$$I_c = f(V_e + R_e I_e), \quad (1)$$

where R_e is a constant independent of bias. The interpretation is that the collector current lowers the potential of the surface in the vicinity of the emitter by $R_e I_e$, and thus increases the effective bias voltage on the emitter by an equivalent amount. The term $R_e I_e$ represents a positive feedback, which under some operating conditions is sufficient to cause instability.

The current amplification factor α is defined as

$$\alpha = (dI_c/dI_e)_{V_e=0}$$

This factor depends on the operating biases. For the unit shown in Fig. 2, α lies between one and two if $V_e < -2$. Using the circuit of Fig. 1, power gains of over 20 db have been obtained. Units have been operated as amplifiers at frequencies up to 10 megacycles.

We wish to acknowledge our debt to W. Shockley for initiating and directing the research program that led to the discovery on which this development is based. We are also indebted to many other of our colleagues at these Laboratories for material assistance and valuable suggestions.

¹ While the effect has been found with both silicon and germanium, we mention only the latter.

² The germanium was furnished by J. H. Scoff and H. C. Flanagan for the kind of preparation and control furnished by the Bell Telephone Laboratories. For further details see G. L. Fisher, *Proc. IRE*, **36**, 1005 (1948).

³ This method was developed by J. H. Scoff and H. C. Flanagan. For further details see G. L. Fisher, *Proc. IRE*, **36**, 1005 (1948).

⁴ W. H. Brattain and J. Bardeen, *Phys. Rev.*, this issue.

Nature of the Forward Current in Germanium Point Contacts

W. H. BRATTAIN AND J. BARDEEN,
 Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
 June 25, 1948

THE forward current in germanium high back-voltage rectifiers¹ is much larger than that estimated from the formula for the spreading resistance, R_s , in a medium

of uniform resistivity, ρ . For a contact of diameter d ,

$$R_s = \rho/2d.$$

Taking as typical values $\rho = 10$ ohm cm and $d = 0.025$ cm, the formula gives $R_s = 2000$ ohms. Actually the forward current at one volt may be as large as 5 to 10 ma, and the differential resistance is not more than a few hundred ohms. Bray² has attempted to account for this discrepancy by assuming that the resistivity decreases with increasing field, and has made tests to observe such an effect.

In connection with the development of the semi-conductor triode discussed in the preceding letter³ the nature of the excess conductivity has been investigated by means of probe measurements of the potential in the vicinity of the point. Measurements were made on the plane surface of a thick block. Various surface treatments, such as anodizing, oxidizing, and sand blasting were used in different tests, in addition to the etch customarily employed in the preparation of rectifiers.

The potential, $V(r)$, at a distance r from a point carrying a current, I , is measured relative to a large area low resistance contact at the base. In Fig. 1 we have plotted some typical data for a surface prepared by grinding and etching, and then oxidizing in air at 500°C for one hour. The ordinate is $2\pi\rho rV/I$ which for a body of uniform resistivity, ρ , should be a constant equal in magnitude to ρ . Actually it is found that the ratio is much less than ρ at small distances from the point, and increases with r , approaching the value ρ asymptotically at large distances. The departure from the constant value indicates an excess conductivity in the neighborhood of the point.

The manner in which the excess conductivity varies with current indicates that two components are involved. One is ohmic and is represented by the upper curve of Fig. 1 which applies for reverse (negative) currents and for small forward currents. This component is attributed to a thin conducting layer on the surface which is believed to be P-type (i.e., of opposite type to that of the block). A layer with a surface conductivity of .002 mho is sufficient to account for the departure of the upper curve from a constant value. The second component of the excess conductivity increases with increasing forward current, and

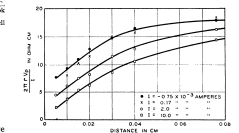


FIG. 3. Measurements of potential, V_c , at a distance r from a point contact through which a current I is flowing into a germanium surface.

J. Bardeen and W. H. Brattain, The Transistor, A Semi-Conductor Triode, *Physical Review*, **74**(2) (1948) 230 – 231

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

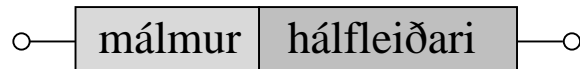
Leiðni hálfleiðara

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

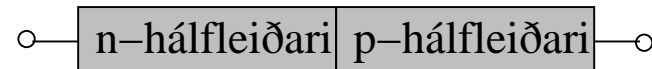
- Í kísilgrindinni er sérhvert kísilatóm tengt fjórum næstu grönnum samgildum tengjum
- Þegar íbætt er með atómi sem hefur fimm gildisrafeindir eykst þéttleiki hreyfanlegra hleðslubera með því að þau gefa frá sér **frjálsar rafeindir**
- Íbótaratóm með þrjár gildisrafeindir þarf að gleypa eina rafeind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

Hálfleiðaratól

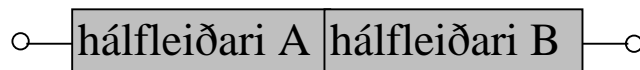
- Hálfleiðaratól eiga sér yfir 125 ára sögu
- Öll hálfleiðaratól má mynda úr nokkrum grunn byggingareiningum
- Grunn einingar hálfleiðaratóla:



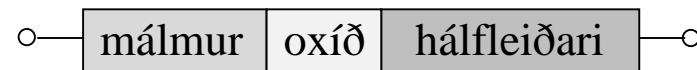
samskeyti málms og hálfleiðara



pn-samskeyti hálfleiðara



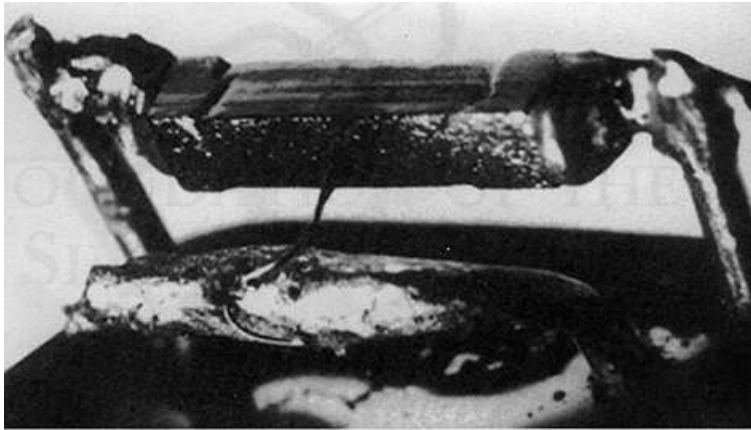
fjölsamskeyti samskeyti



málmur-oxíð-hálfleiðari

Hálfleiðaratól

- Fyrsti tvískeytli 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 Fjölsamskeytaleysar (Kroemer, Alferov og Kazarinov)
- 1963 Gunntvistur (Gunn)
- 1965 IMPATT tvistur (Johnston, DeLoach og Cohen)
- 1966 MESFET (Mead)

Ný tól III

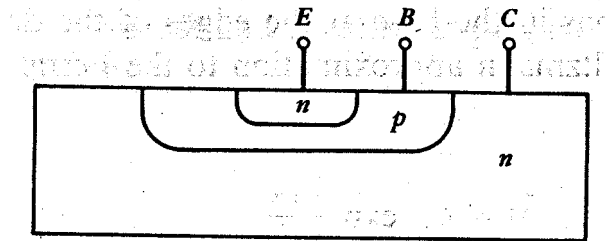
- 1967 Nonvolatile hálfleiðaraminni (Kahng og Sze)
- 1970 Charge-coupled tól (CCD) (Boyle og Smith)
- 1974 Resonant tunneling diode (Chang, Esaki og Tsu)
- 1980 MODFET (Mimura og félagar)
- 1994 Einnar rafeindar minniseining við stofuhita (Yano og félagar)
- 1999 finFET (Hu og félagar)
- 2001 20 nm MOSFET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

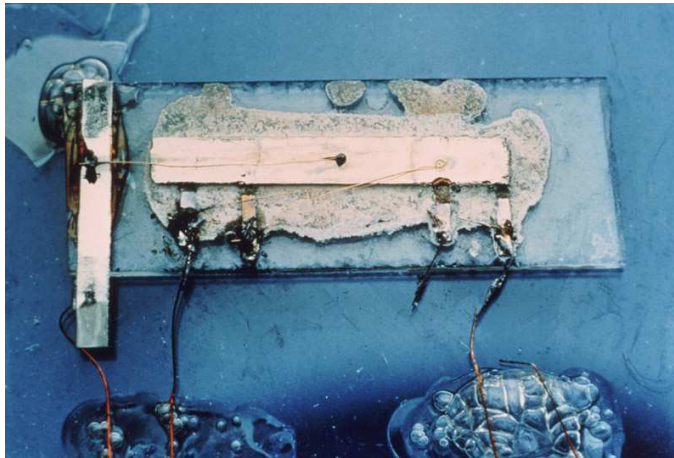
- Á sjötta áratugnum var áherslan ekki aðeins á hvernig búa eigi til betri tól, heldur ekki síður þróun einfaldari framleiðslutækni
- Leitast var við að finna ferli svo framleiða mætti tólin í miklu magni, þau væru áreiðanleg, endurtakanleg og ódýr



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

Fyrstu smárásirnar

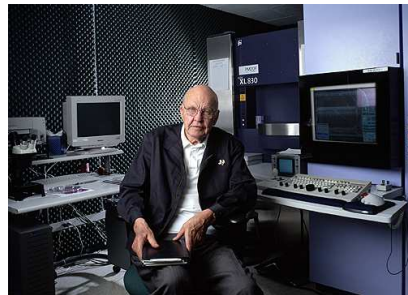
- Smárás er rás sem inniheldur nokkur tól sem vinna innan eins og sama hálfleiðarabúts
- Sótt var um einkaleyfið fyrir fyrstu smárásina af Jack Kilby hjá Texas Instruments í febrúar 1959



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

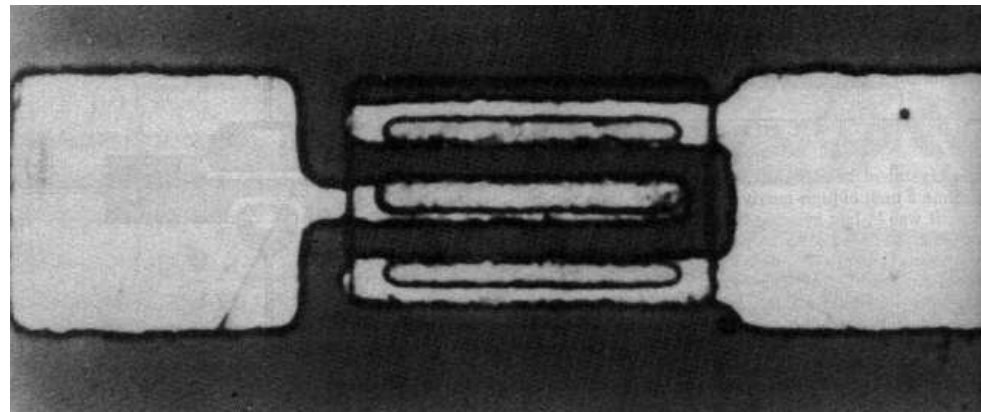
Jack St. Clair Kilby, the inventor of the integrated circuit, is shown in a portrait. The text below the portrait discusses his life and work, including his role in the development of the integrated circuit and his contributions to the field of electronics. The text is a biographical article from Spectral Lines magazine.

Birt með góðfúslegu leyfi Texas Instruments

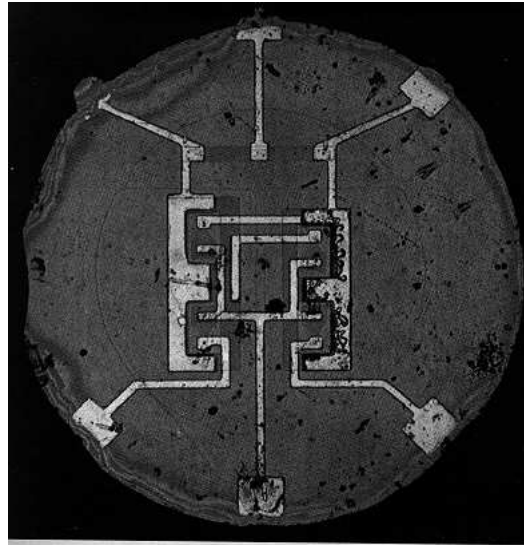
- Kilby hlaut Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði árið 2000 fyrir framlag sitt til upplýsingatækninnar

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



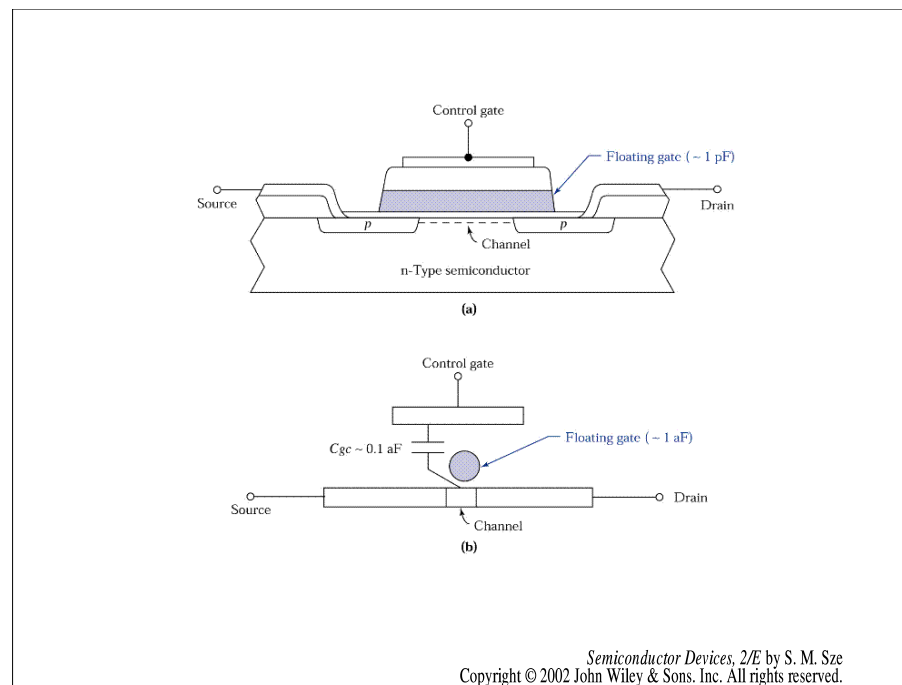
- Fyrstu smárásirnar, sem voru framleiddar af Fairchild Semiconductor og Texas Instruments, samanstóðu af nokkrum smárum og viðnámmum
- Þannig voru búin til einföld hlið og magnarar
- Þar með hófst þróun smárása fyrir alvöru

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

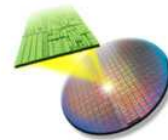


- Nonvolatile hálfleiðara minni geymir upplýsingar þó að afl sé tekið af
- Með því að stytta lengd gáttar (< 10 nm) fæst einnar rafeindar minni

Tækniframfarir

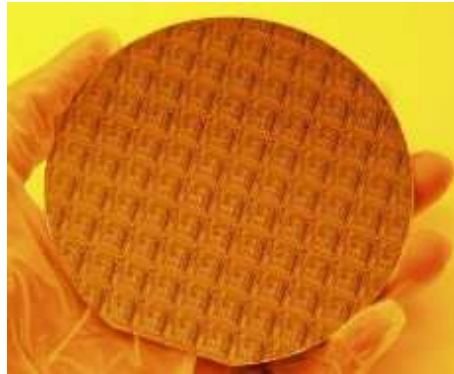
- Mikið af þeirri tækni sem þróuð var fyrir hálfleiðaraiðnaðinn á rætur í aldagamalli verktækni

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)

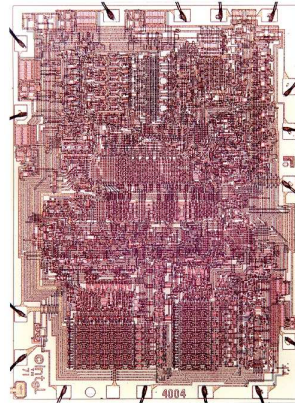
Tækniframfarir



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

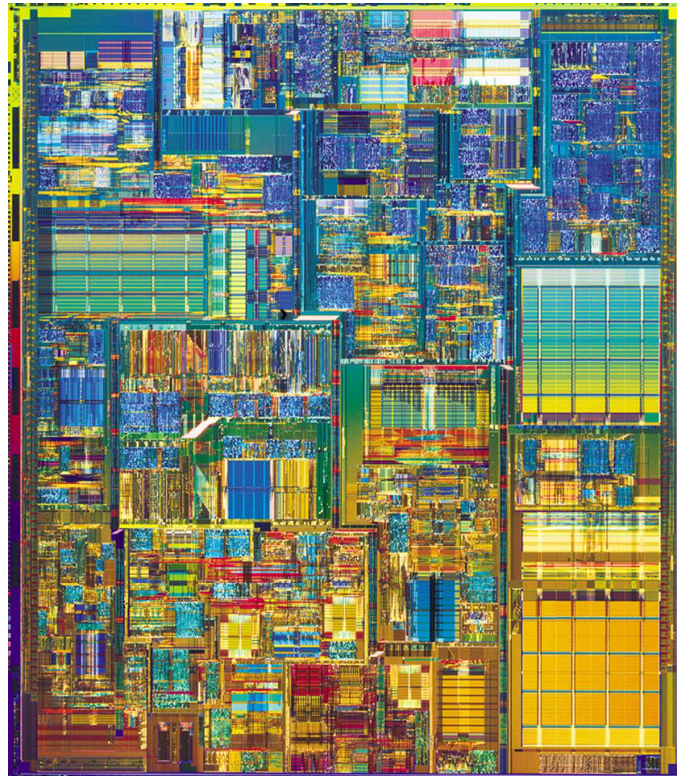
Tækniframfarir



Sjá nánar Faggin (2009, 2018)

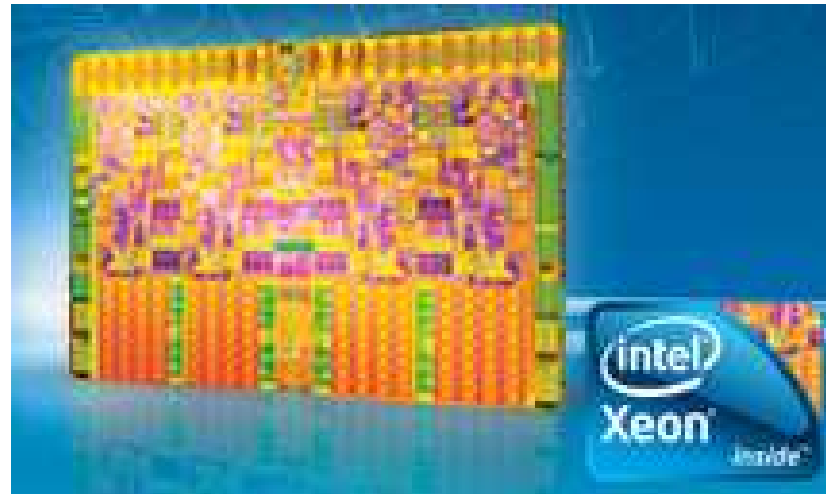
- Fyrsti örgjörvinn 1971
- Hinn 4-bitu 4004 örgjörvi hafði 108 kHz klukkuþíðni og 2300 smára, hraðinn er um 0.06 MIPS
- Til samanburðar hefur Intel P6 133 MHz klukkuþíðni, inniheldur 5.5 milljónir smára og er 300 MIPS

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

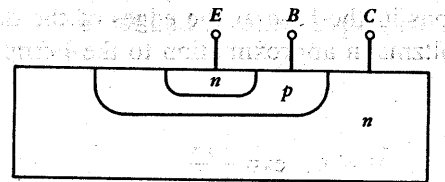


- Í dag (2016) er mesti fjöldi smára í örgjörva sem er hægt að kaupa, meira en 7.2 milljarðar smára, en það er Intel 22-core Xeon Broadwell-EP sem er byggður á 14 nm tækni (finFET) á 456 mm²

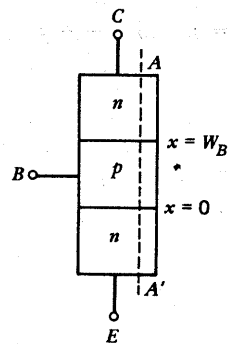
Tækniframfarir

- 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



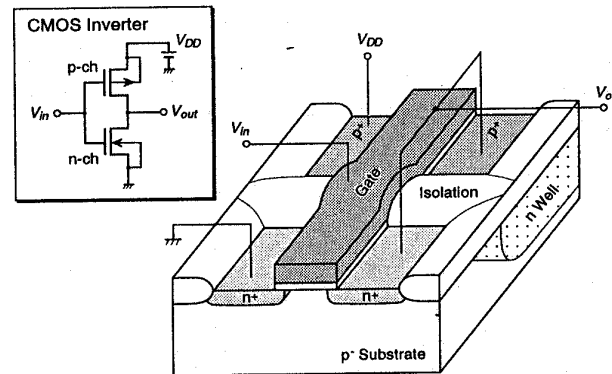
(a)



(b)

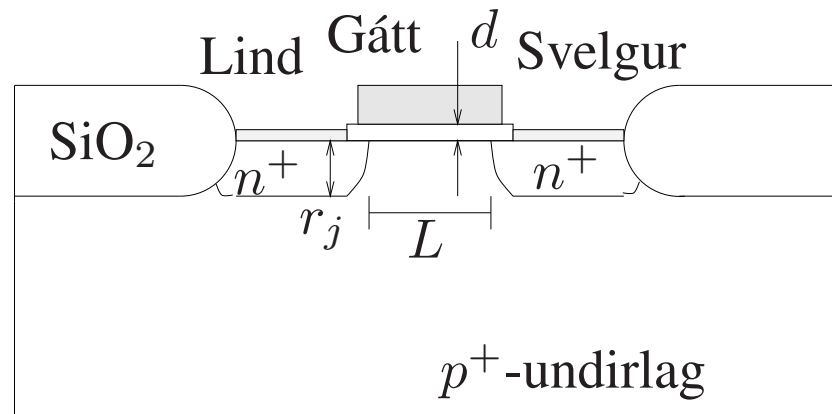
- Í rúma tvo áratugi voru tvískeyttir smárar ráðandi í smárásum
- Tvískeyttir smárar draga meira afl en MOS sem takmarkar fjölda og þéttni smára í smárás.

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

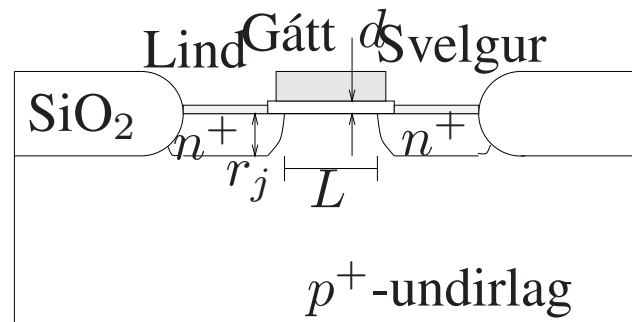
MOS



Helstu kennistærðir MOSFET eru

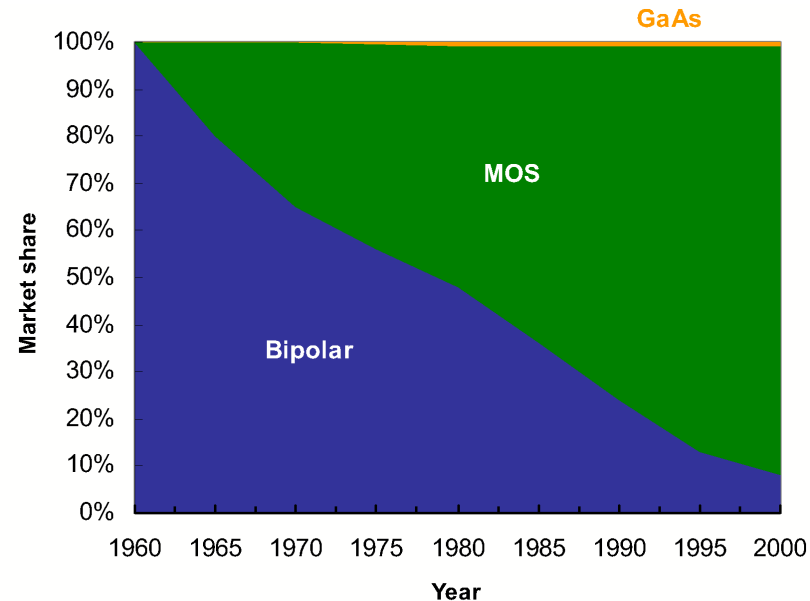
- rásalengdin, L
- þykkt oxíðlagsins, d
- dýpt samskeytanna, r_j
- íbótarþéttleiki undirlags, N_A

MOS



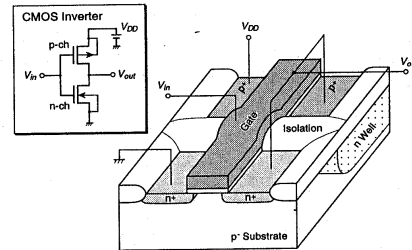
- MOS smárinn samanstendur af **lind**, **svelg** og **gátt**
- Lind og svelgur eru rafrænt einangruð frá hvort öðru með rásinni
- Gáttin er aðskilin frá rásinni með einangrandi kísiloxíði
- Með því að leggja spennu á gáttina yfir einangrandi oxíðið getur myndast leiðandi braut í rásinni milli lindar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

MOS



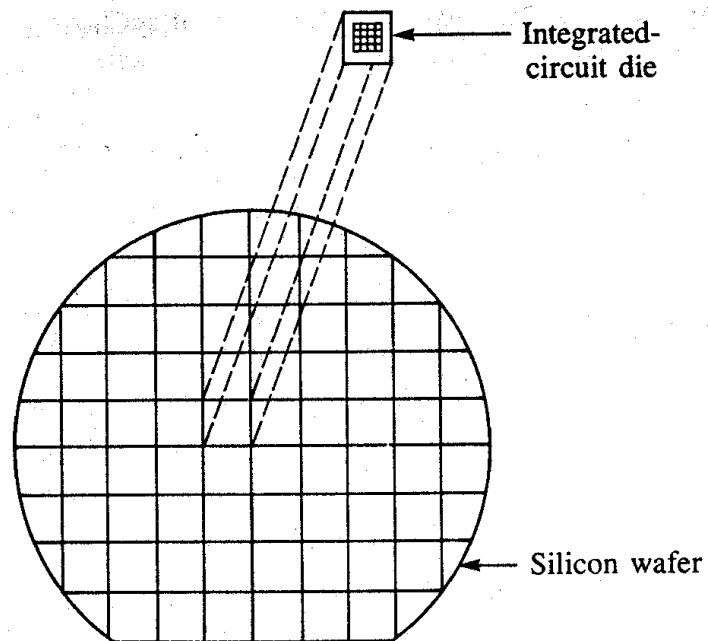
- Frá því á síðari hluta níunda áratugarins hafa CMOS rásir verið notaðar í allar venjulegar rásir eins og örgjörva og minni
- Þetta er vegna þess að aflnotkun og tilsvarendi ofhitnun takmörkuðu þökkun n-MOS við 10^6 hlið/cm².

MOS



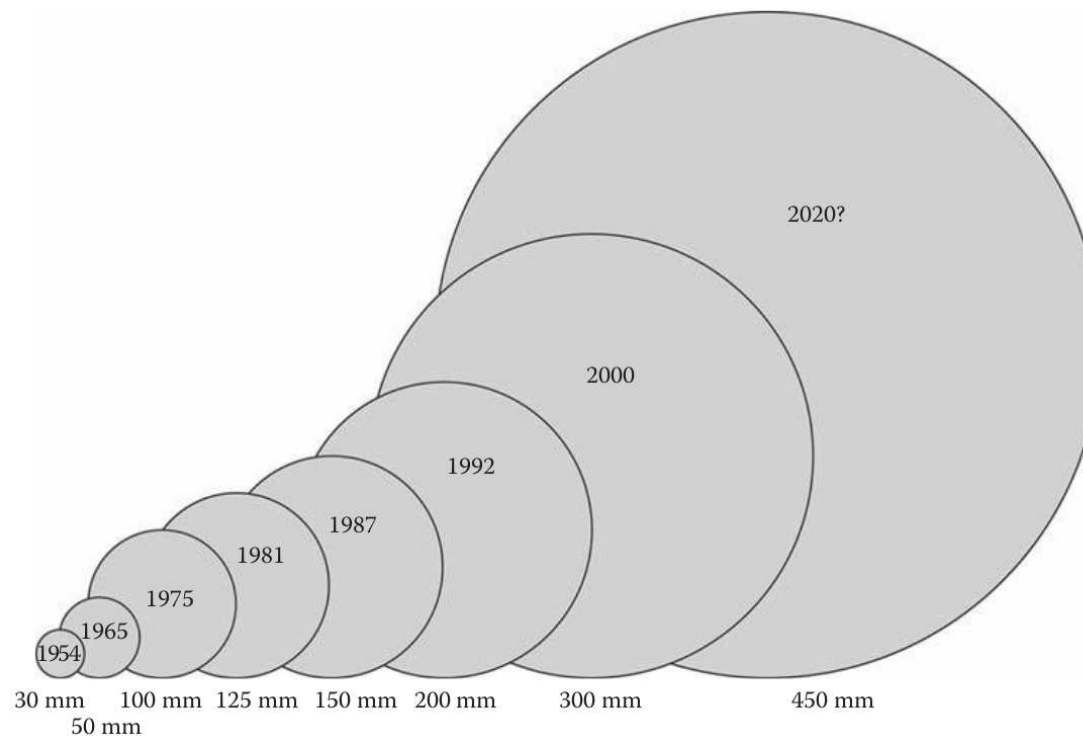
- Hver eining CMOS samanstendur af n - og p -rása MOS smárum.
- Tólin tvö eru raðtengd frá V_{dd} til jarðar og annað þeirra leiðir þá ekki í hvorri stöðunni sem rásin er
- Aðeins lítill lekastraumur fer þá um rásina nema rétt á meðan báðir smárarnir eru á, þannig að aðeins á meðan skipt er um stöðu 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.

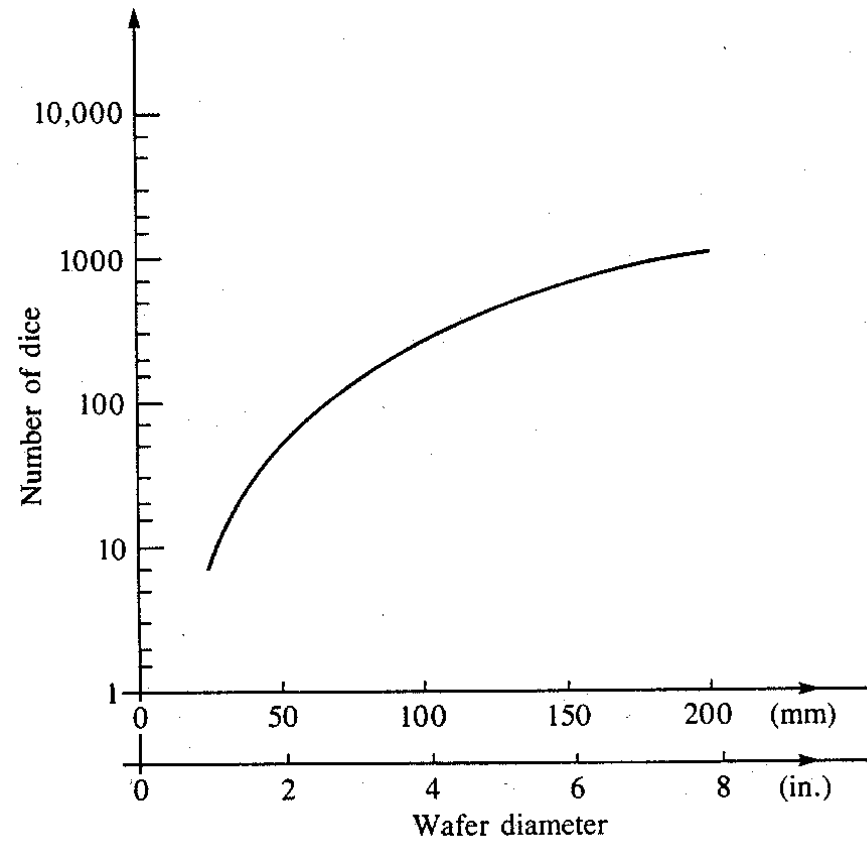
Þróunin



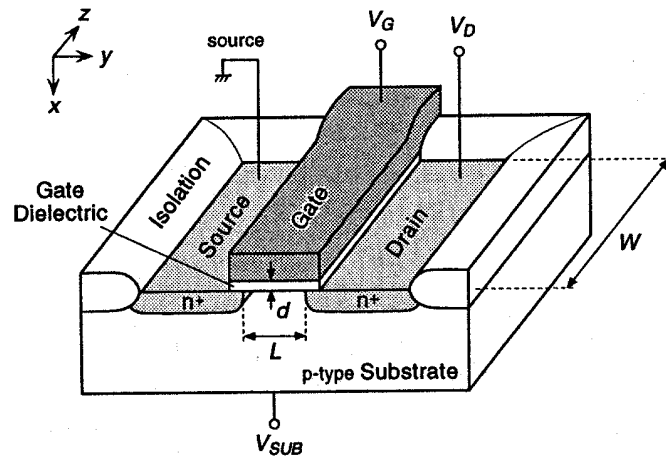
Frá Cressler, 2016

- Í árdaga voru skífurnar 1" - 2" í þvermál, nú eru 450 mm skífur notaðar í framleiðslunni

Próuinin



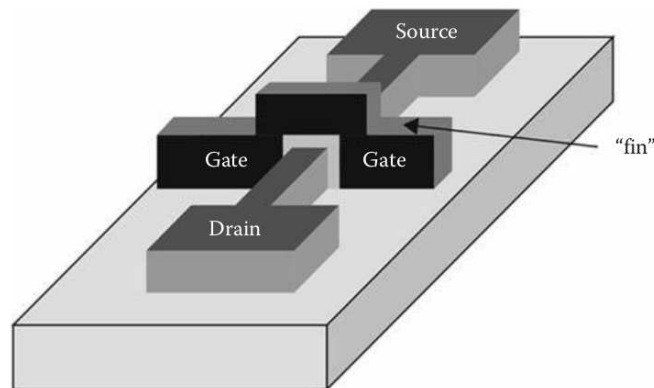
Þróunin



• 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
- Rásarlengd $L = 32$ nm hafði gáttaroxíðið úr HfO_2 sem hefur hærri rafsvörunarstuðul en SiO_2 og geta þess vegna verið þykkari

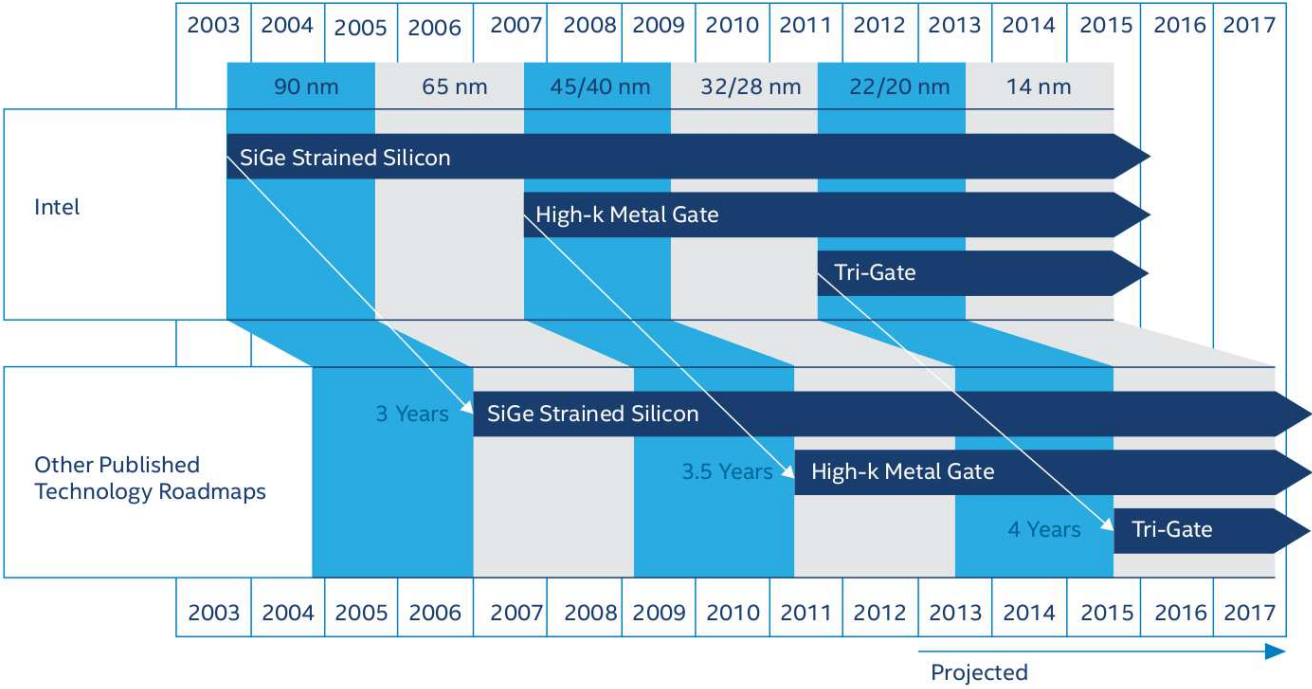
Þróunin



Frá Cressler, 2016

- FinFET kom fram 1998 sem 3D strúktur í stað flatra MOSFET og gerir frekari smækkun mögulega
- $L = 14$ nm 3D FinFET smárar voru komnir í framleiðslu hjá Intel í ágúst 2014 og framleiðsla á $L = 10$ nm FinFET field-programmable gate array (FGPA) hefur verið boðuð

Próuin



Intel Corporation, White paper, 2016

Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2002, kafi 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] F. Faggin, How we made the microprocessor, *Nature Electronics*, **1**(1)(2018) 88
- [6] J. Bardeen and W. H. Brattain, The Transistor, A Semi-Conductor Triode, *Physical Review*, **74**(2) (1948) 230 – 231
- [7] I. M. Ross, The foundation of the silicon age, *Physics Today*, **50**(12)(1997) 34 – 39
- [8] B. Lojek, Early development of polysilicon-gate MOS technology at Fairchild Semiconductor, *Solid State Circuits Magazine*, **1**(4)(2009) 18 – 25
- [9] M. Riordan and L. Hoddeson, The Moses of Silicon Valley, *Physics Today*, **50**(12)(1997) 42 - 47
- [10] M. Riordan, L. Hoddeson and C. Herring, The invention of the transistor, *Reviews of Modern Physics*, **71** (1999) S336 - S345
- [11] J. M. Rabaey, *Digital integrated circuits: A design perspective*, Prentice - Hall, 1996
- [12] S. M. Sze, Introduction, in *VLSI Technology*, editor S. M. Sze, McGraw-Hill, 1988
- [13] P. A. Packan, Pushing the limits, *Science*, **285**, (1999) 207 – 208
- [14] J. Birnbaum and R. S. Williams, Physics and the Information Revolution *Physics Today*, **53**, (1)(2000) 38 – 42
- [15] John D. Cressler, *Silicon Earth: Introduction to the microelectronics and nanotechnology revolution*, 2nd ed., CRC Press, 2016