



Deze presentatie is opgesteld ter gelegenheid van de uitvinding van de bipolaire puntcontacttransistor, die 75 jaar geleden (kerst 1947) het levenslicht zag. Het is gericht op een lekenpubliek en beschrijft de ontwikkeling die de micro-elektronica in deze periode heeft doorgemaakt. De transistor die tegenwoordig centraal staat, is de MOST (Metal Oxide Semiconductor Transistor). Het principe achter deze transistor werd al in 1928 in een patent vastgelegd (Lilienfeld, J. E. "Device for controlling electric current," *U. S. Patent No. 1,900,018* (Aangemaakt op 28 maart 1928, uitgegeven op 7 maart 1933)), zie bijvoorbeeld: <https://www.computerhistory.org/siliconengine/field-effect-semiconductor-device-concepts-patented/>. Destijds kon dit principe nog niet worden gedemonstreerd vanwege een gebrek aan kennis en ervaring met halfgeleider materialen. Pas na de ontwikkeling van materiaalkennis voor de productie van de Bipolaire Junctie Transistor, slaagden Kahng en Atalla erin om in 1956 een functionerende MOST te presenteren. Hierna volgde een snelle vooruitgang, vooral na de doorbraak van de digitale elektronica rond 1990. Deze vooruitgang werd in 1965 voorspeld door Gordon Moore, die opmerkte dat het aantal transistoren op een chip elke twee jaar verdubbelde. Deze min of meer zelfvervullende wet van Moore bleef, tot zijn eigen verbazing, standhouden tot in de jaren twintig van deze eeuw. In 2024 zal Nvidia chips produceren met 200 miljard transistoren per chip. Deze presentatie is niet bedoeld voor publicatie en er kunnen auteursrechten rusten op de inhoud.

75 jaar transistor

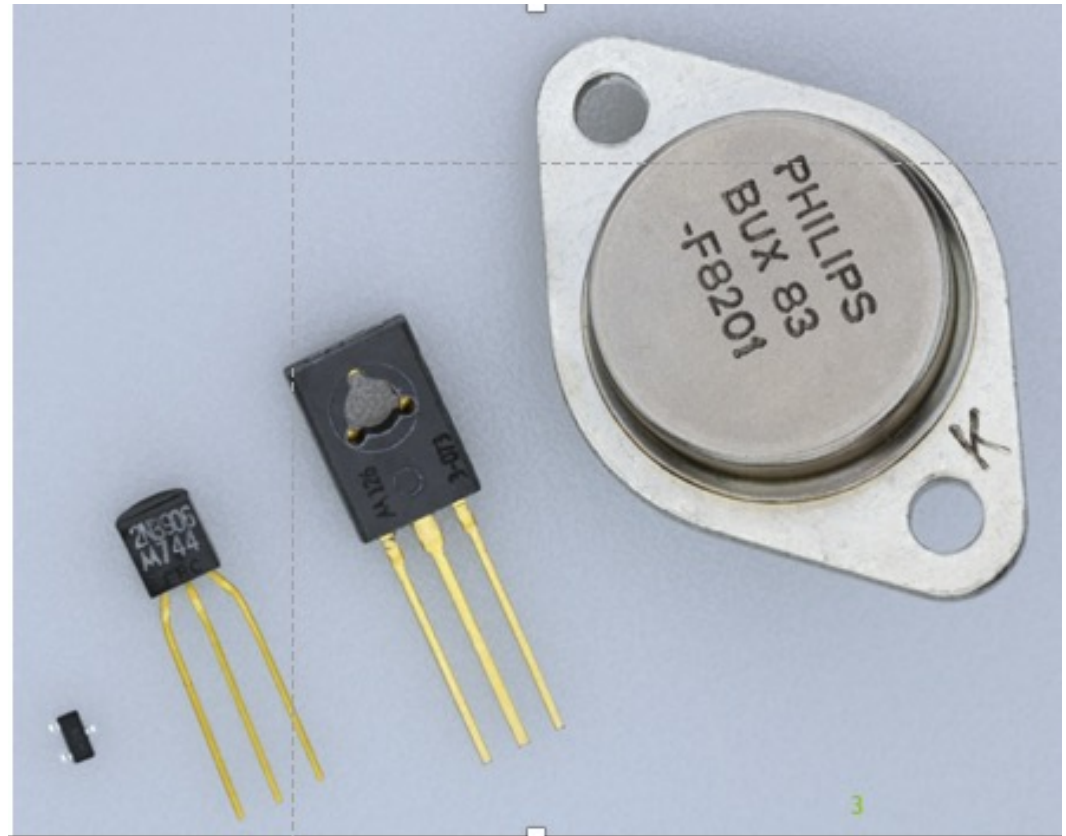
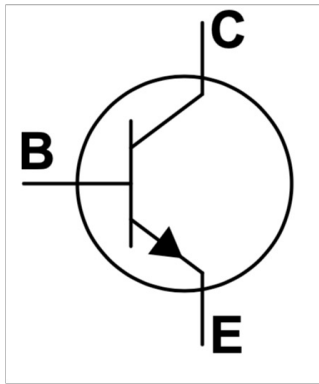
Hans Wallinga



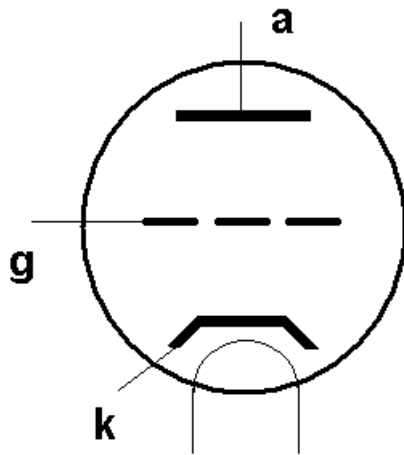
Bardeen-Shockley-Brattain, 1948

Transistor

Een halfgeleider-component die elektrische stroom kan versterken of schakelen



De transistor is de opvolger van de vacuümbuis



Radiobuis (jaren vijftig)

 [Meer informatie](#)

 **RJB1** - Eigen werk

Vacuum rectifiers 5C3S (5U4G equivalents) Polish (left) and Russian (right)

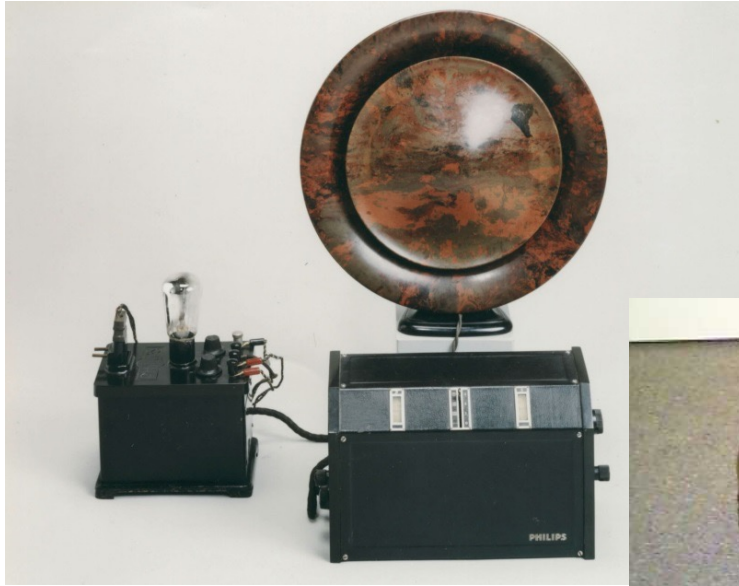
 **CC BY-SA 4.0**

 File: 5C3Ss.jpg

 Geüpload: 16 februari 2011

[Over Media Viewer](#)

Toestellen uit de oude doos



±1925



Toestellen uit de oude doos



± 1950





Experimentele tv-uitzending in Poort van Kleef, Eindhoven, 1950



Amerikaanse
veldtelefoon uit 2e
wereldoorlog



**RT68, zender-ontvanger,
buizentechniek uit de
vroege jaren vijftig**

Natuurkunde in de eerste helft vorige eeuw

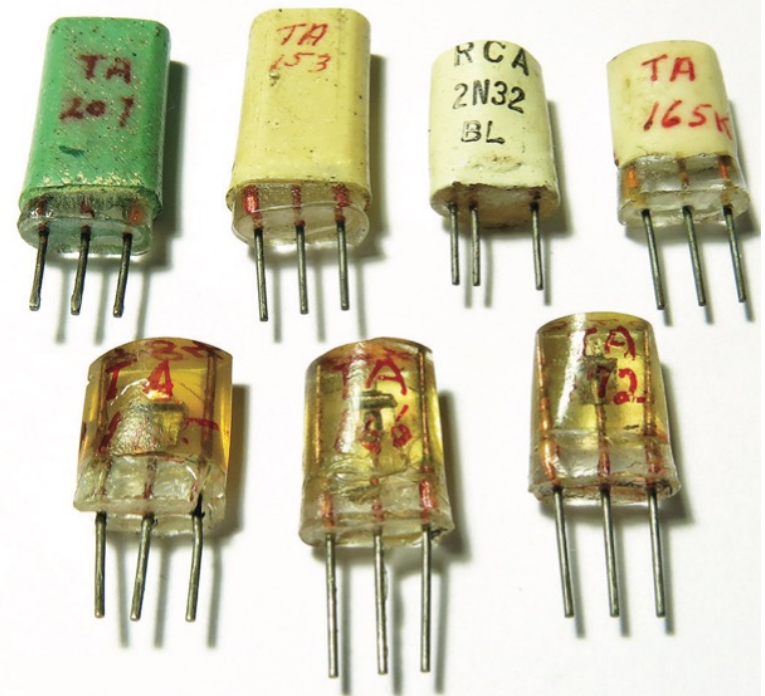
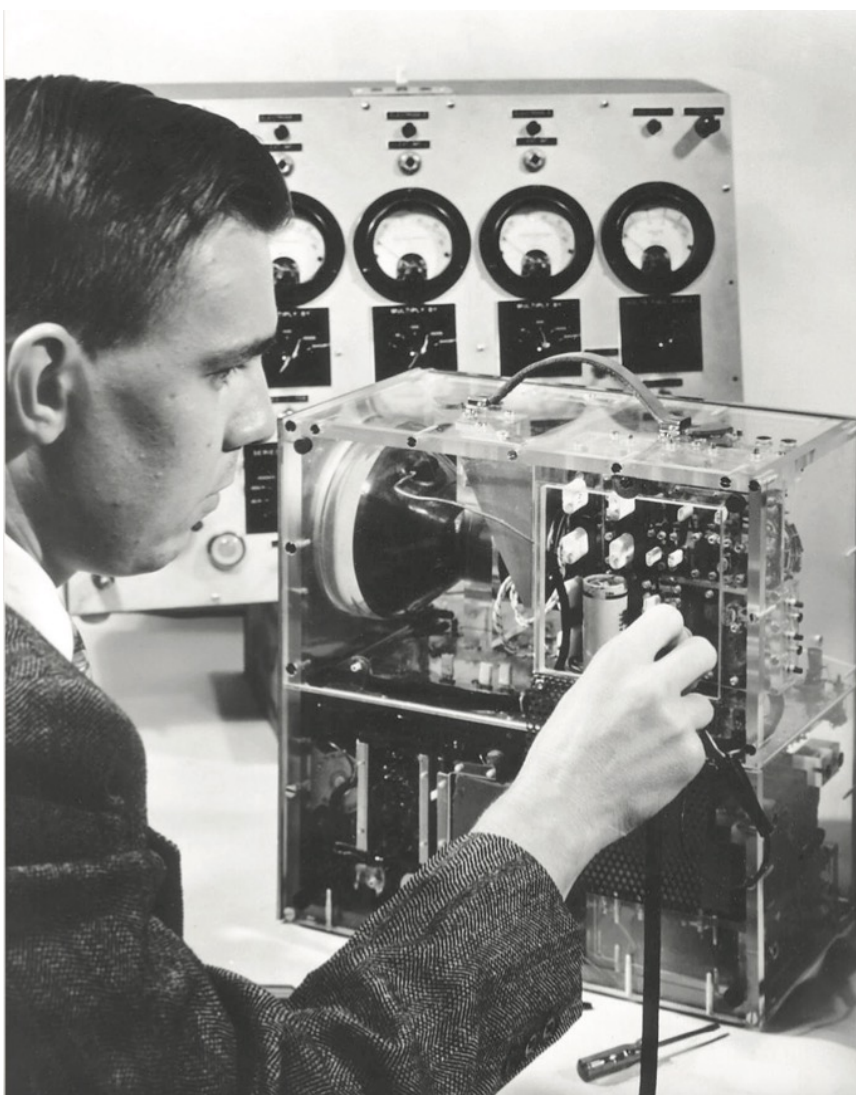
Röntgen	1845-1923	Röntgenstralen, kristalstructuren	1901
Lorentz	1853-1928	Lorentzkracht; verwevenheid deeltjes-golven	1902
Rutherford	1871-1937	atoommodel; radioactieve straling	1908
Planck	1858-1947	kwantumtheorie	1920
Einstein	1879-1955	relativiteitstheorie	1921
Bohr	1885-1962	atoommodel	1922
Heisenberg	1901-1976	kwantummechanica; onzekerheidsprincipe	1932
Schrödinger	1887-1961	kwantummechanica	1933
Dirac	1902-1982	Kwantummechanica; golfvergelijking	1933
Debije	1884-1966	molecuul- en kristalstructuren	1936



Replica eerste
transistor

Bell labs
Dec. 1947

Bardeen
Brittain
Shockley



RCA was one of the first licensees of the Bell Labs transistors. In 1953, the company used point-contact transistors to build what the company called the first "all-transistor" television (yes, it had a cathode-ray tube). The approximately 22 transistors used in the experimental set included the TA153 [color photo: top row, second from left], the TA165 [top, far right], the TA156 [bottom row, middle] and the TA172 [bottom, right]. The man in the black-and-white photo is RCA engineer Gerald Herzog, whose team designed and built the television.

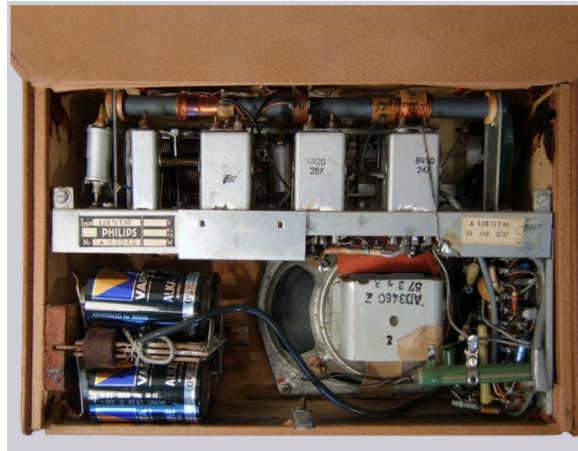
Rond 1950 werden de eerste transistoren op de markt gebracht, Maar kwaliteit van radiobuizen nog bij lange na niet benaderd.

Eerste transistor radio's, 1958



1960

Philips L3X71T "Sharpie"



Hoorapparaat

Toestellen uit de oude doos



1975

Introductie van PC en digitale camera



±1980



De elektronica digitaliseert rond 1990



Motorola 1985



Nokia 1998

Digital hits the shops



1988

The Fujifilm DS-1P and memory card.

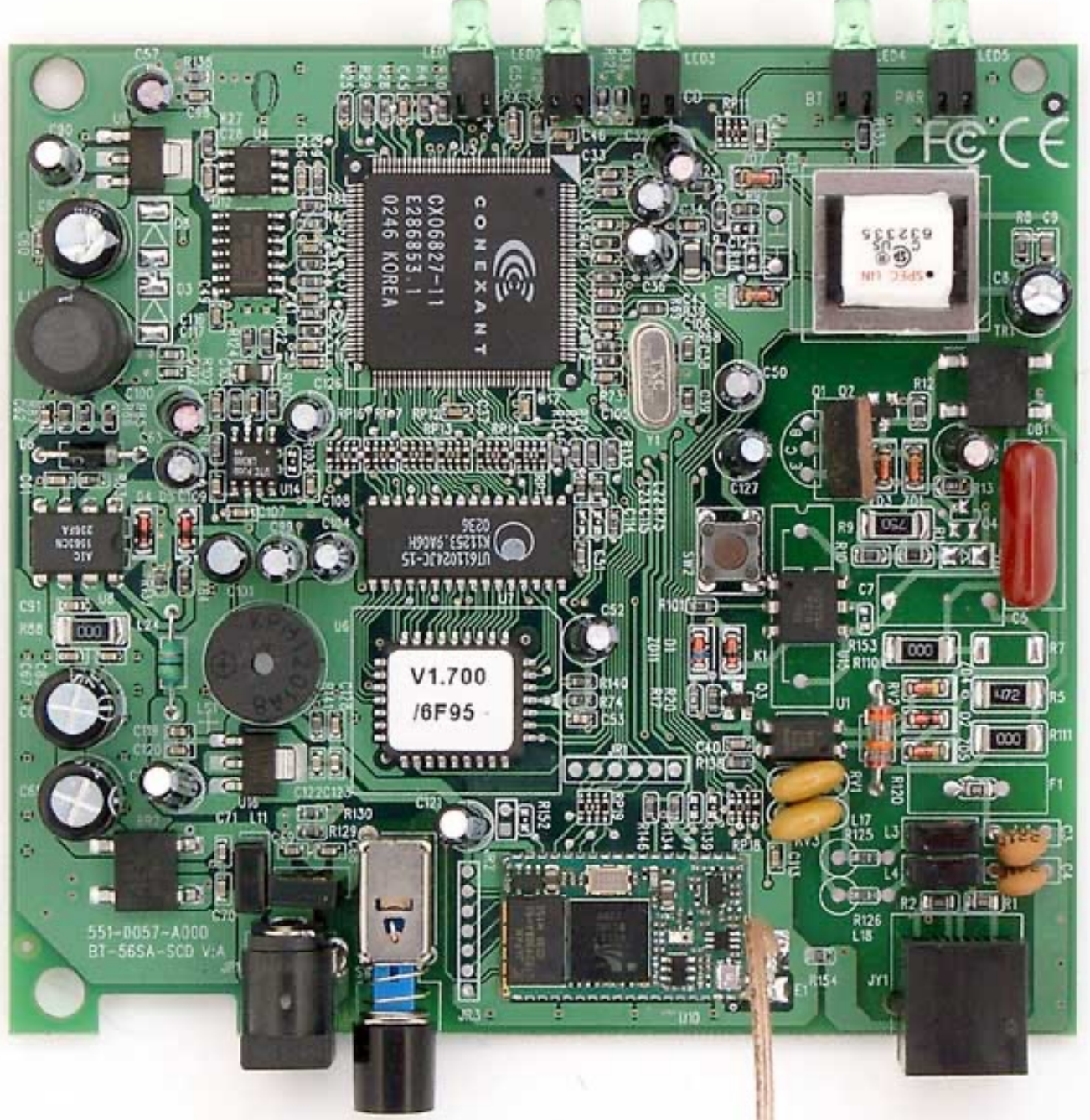


Apple ipod 2001

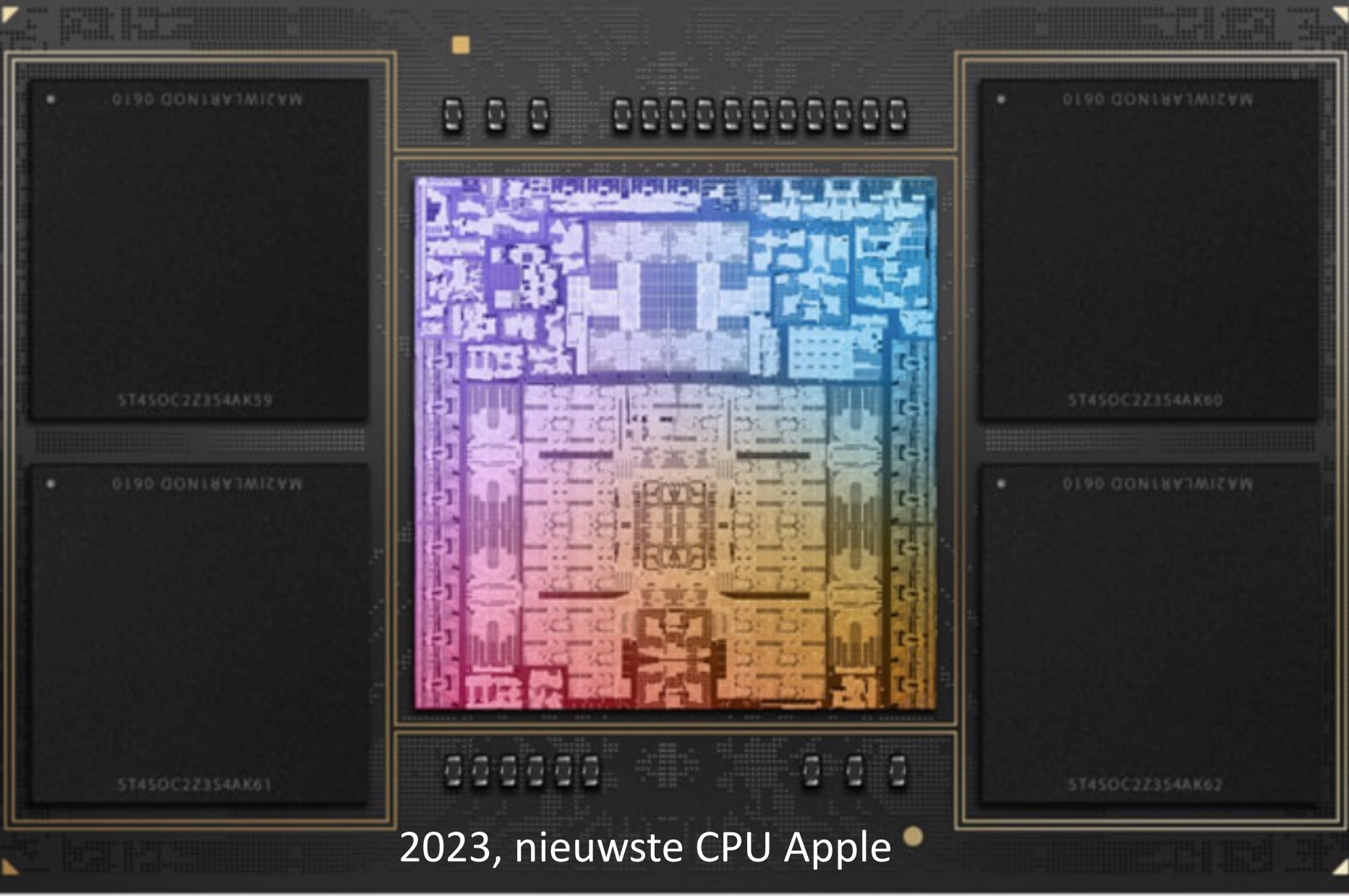


Apple Macbook 2001

Omstreeks 1990
worden de
microprocessoren zo
krachtig en snel dat de
de digitale
signaalbewerking de
analoge elektronica
overwint.

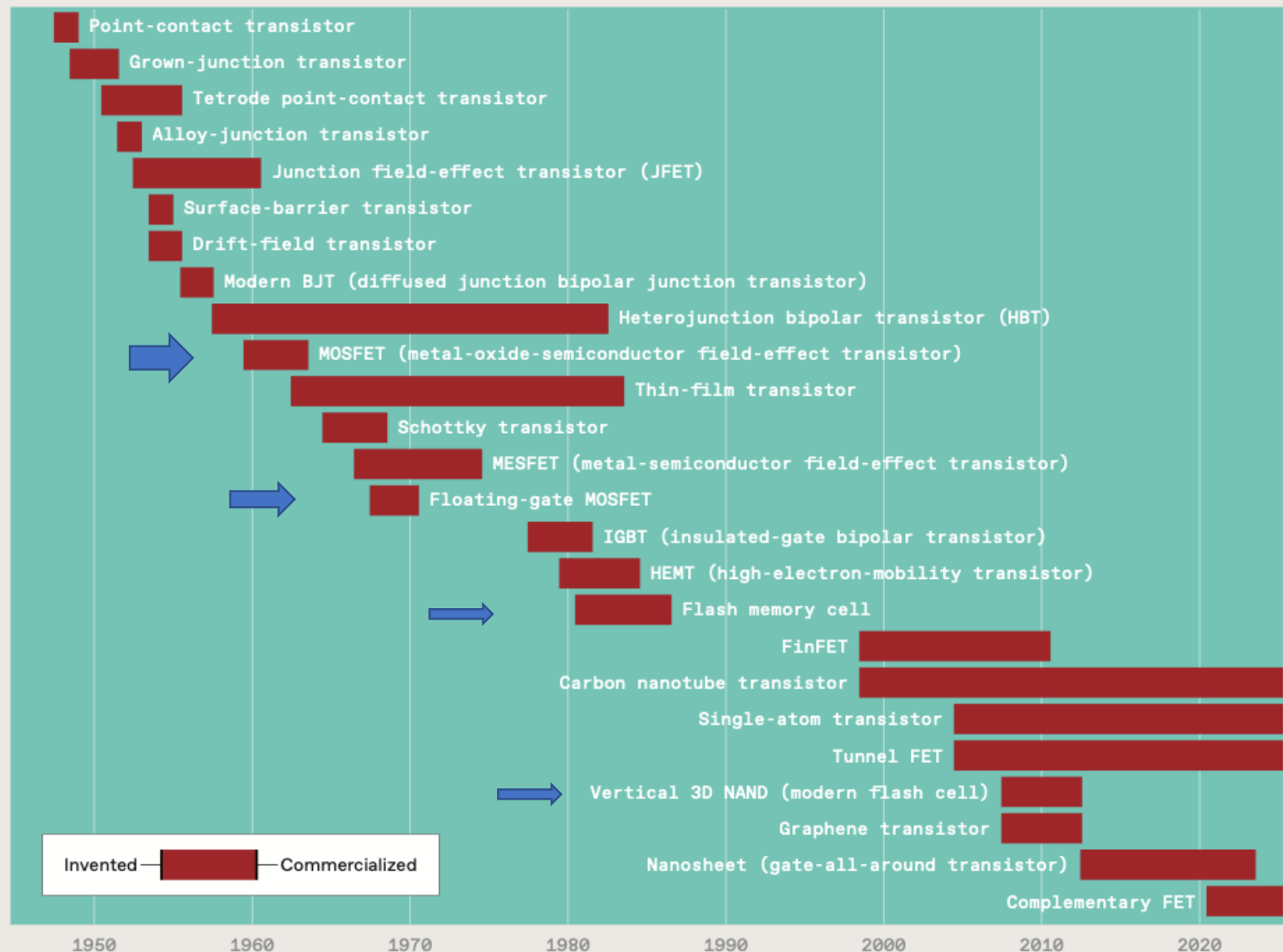


Printed circuit
board met
diverse chips



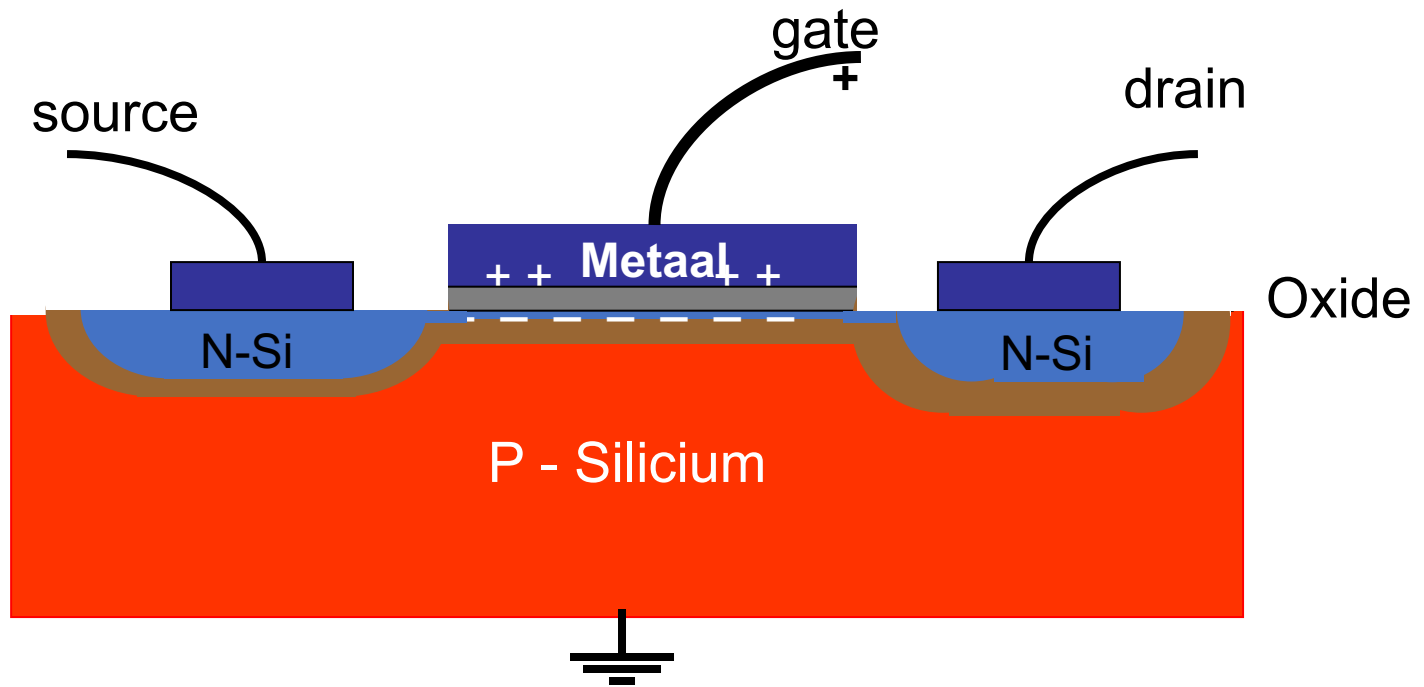
2023, nieuwste CPU Apple

M2 Max, 67 miljard transistors, 400 GB/s en tot 96 GB aan snel centraal geheugen

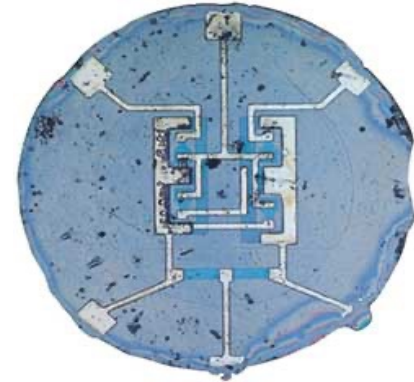


THE ULTIMATE TRANSISTOR TIMELINE

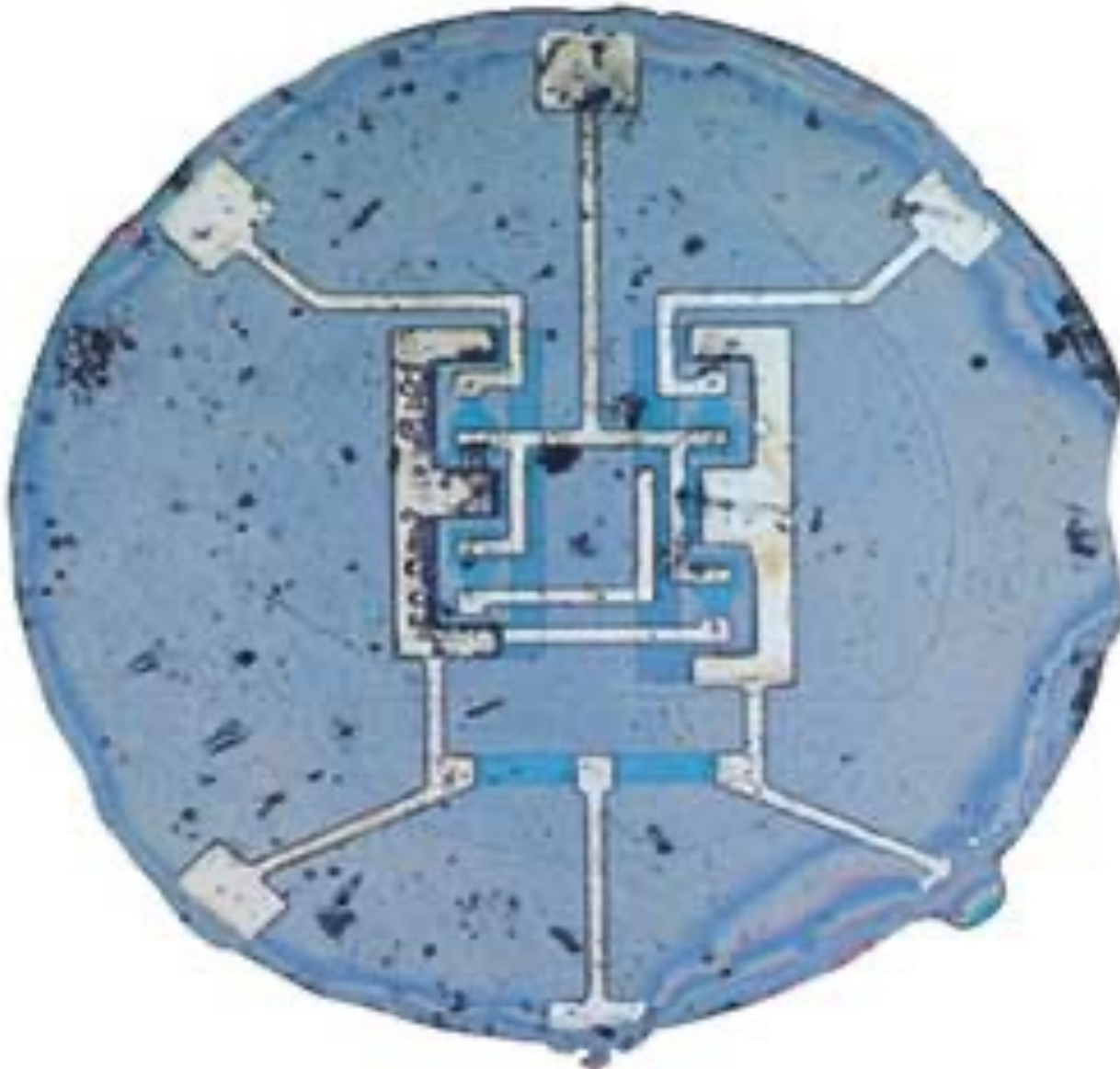
MOS Transistor



First Integrated Circuit - 1958. Jack Kilby



first commercially available
integrated circuit.
Fairchild Semiconductor.
Robert Noyce, late 1950s

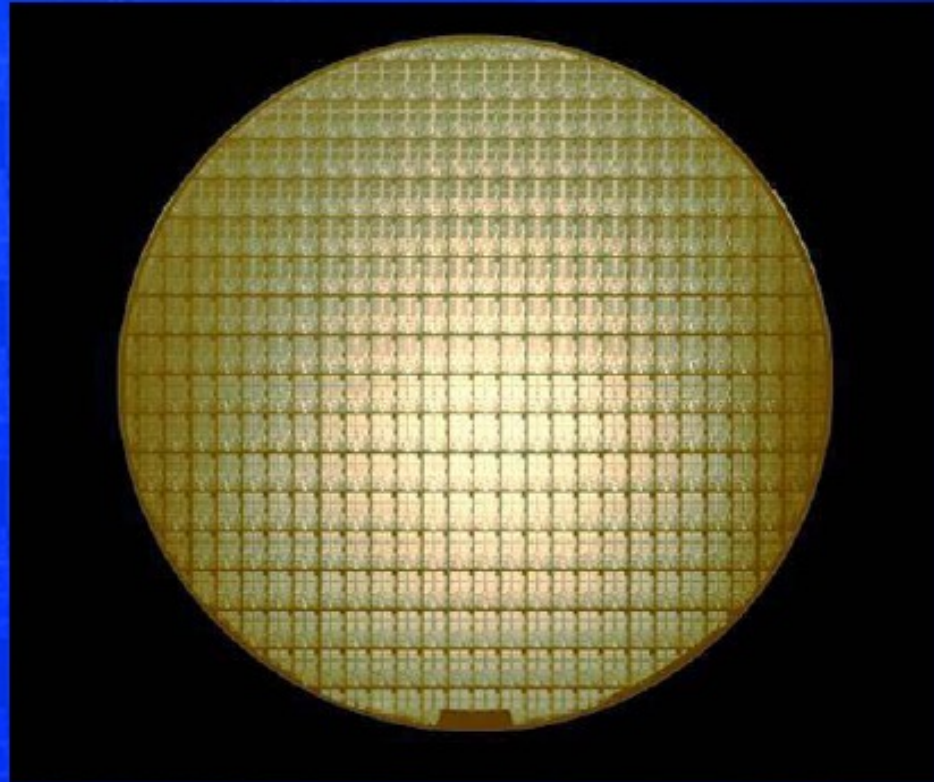


Geïntegreerde schakeling met 4 transistoren en enkele weerstanden. Fairchild 1959

Wafer Evolution



1971
2" Wafer

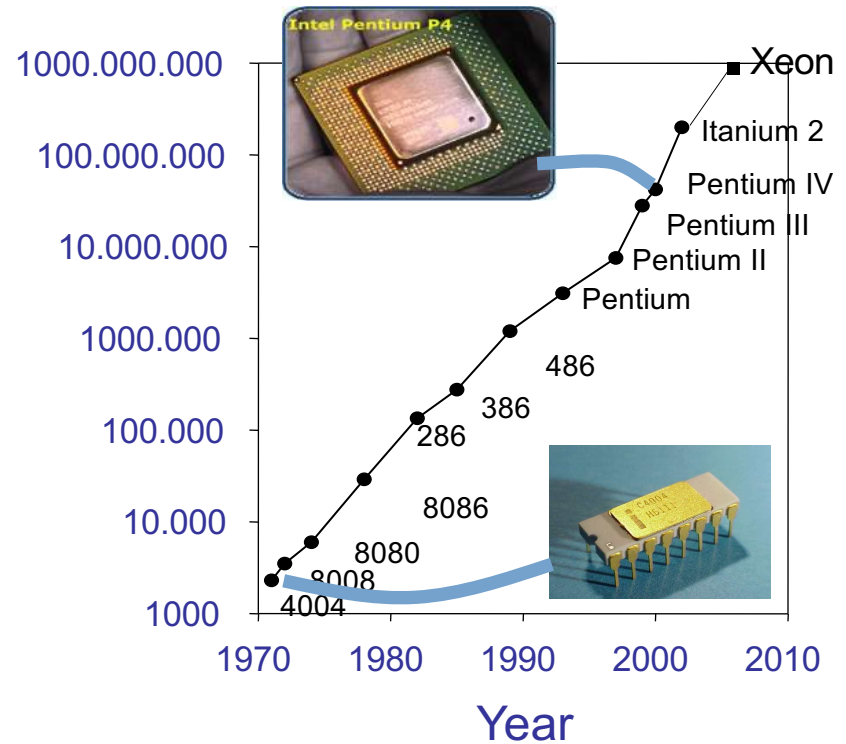
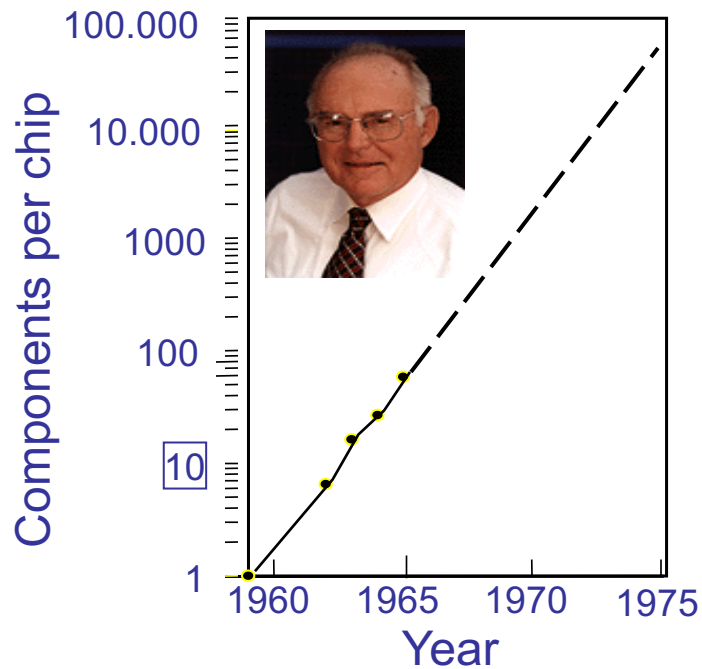


Today (2003)
12" Wafer

intel

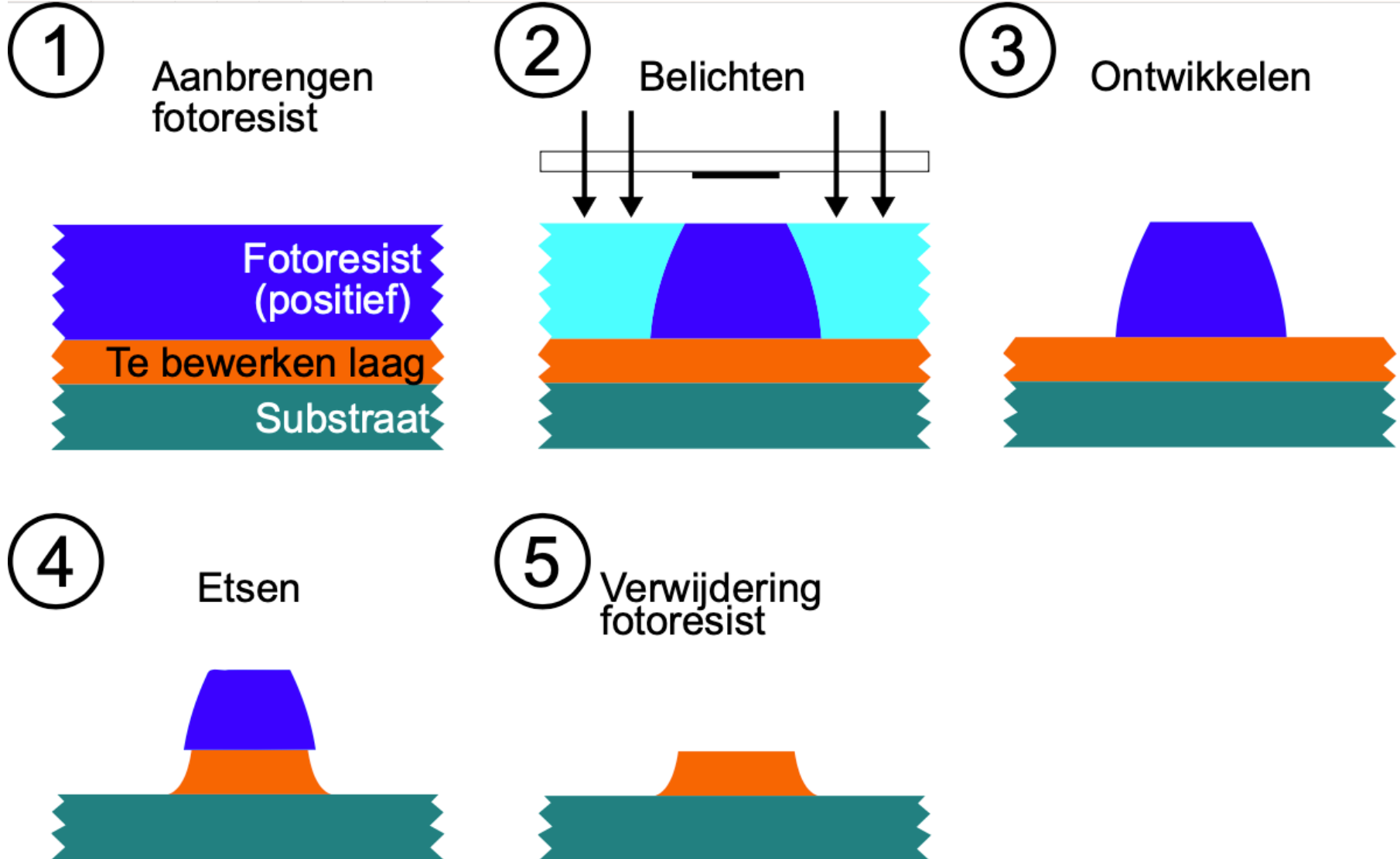
thirty-five years of innovation → **35**

Moore's Law

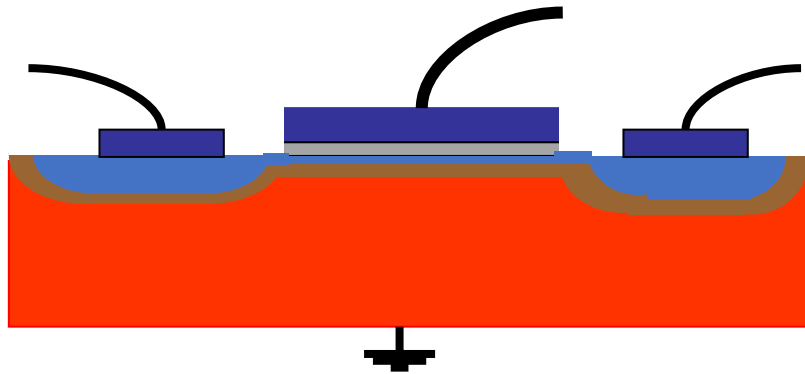


Source: Electronics / INTEL

Fotolythografie en ets proces stappen



MOS Transistor

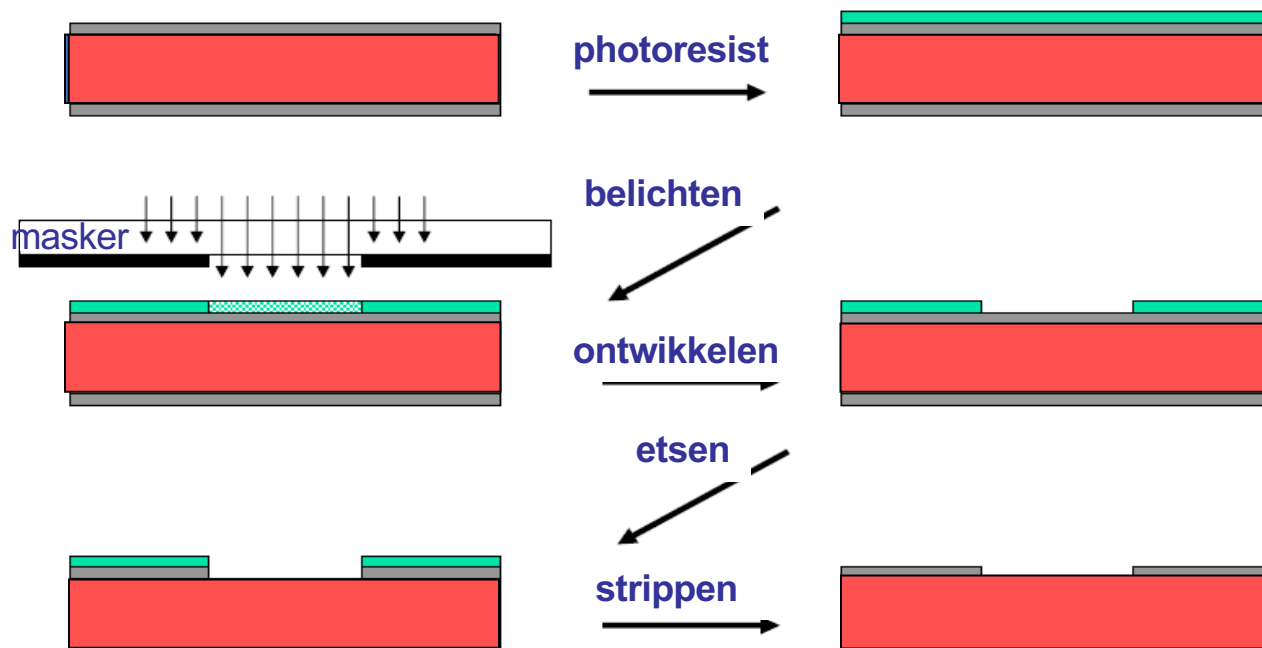


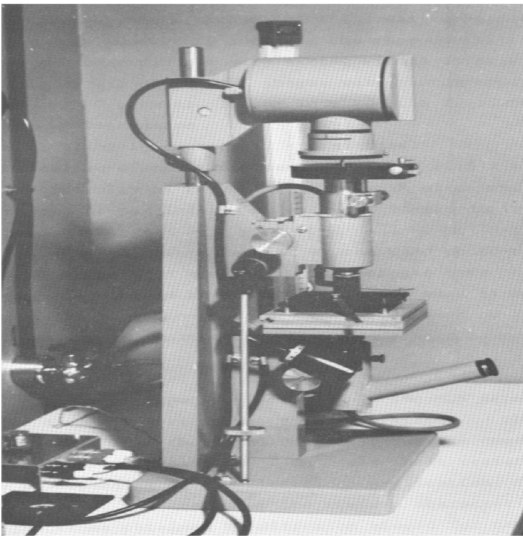
1968

2008

Fotolithografie

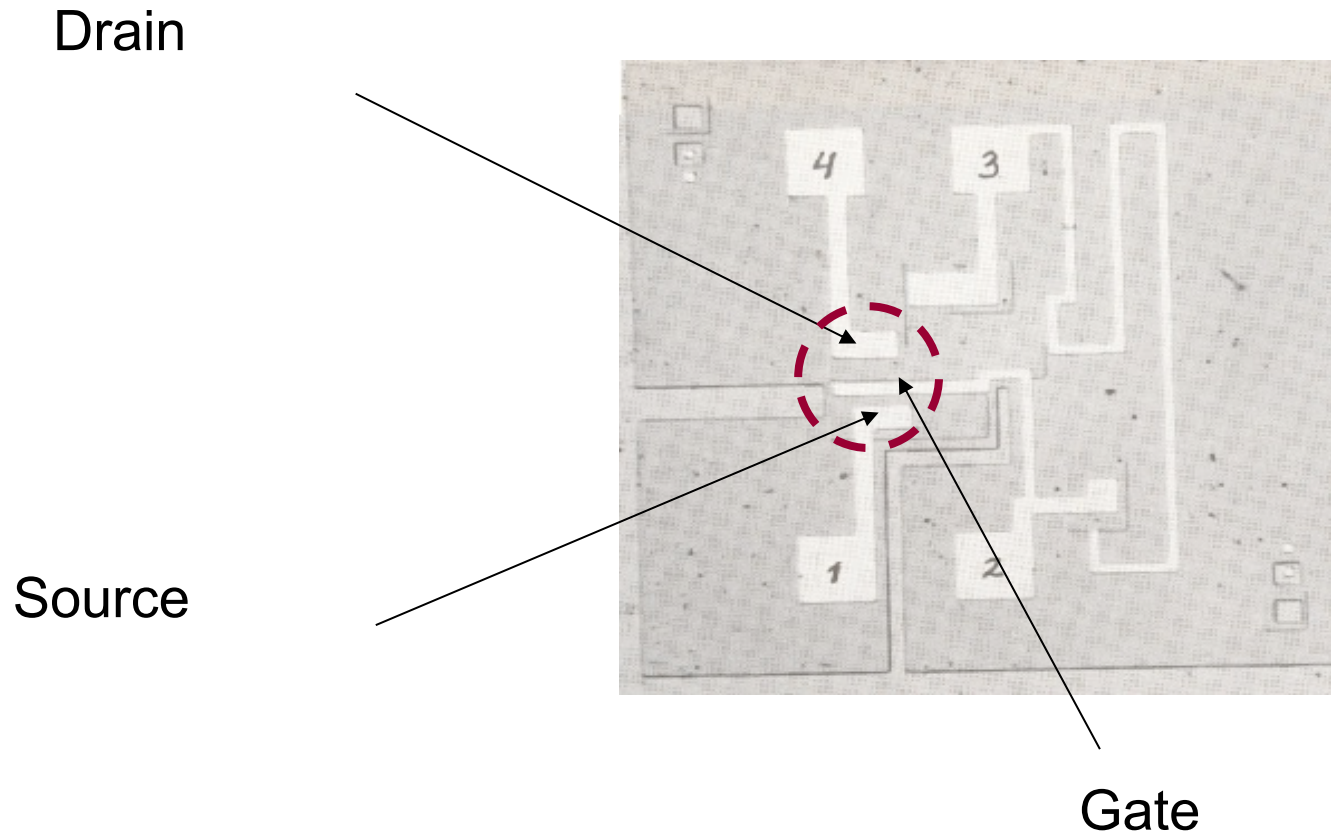
Schema van proces stap met een masker



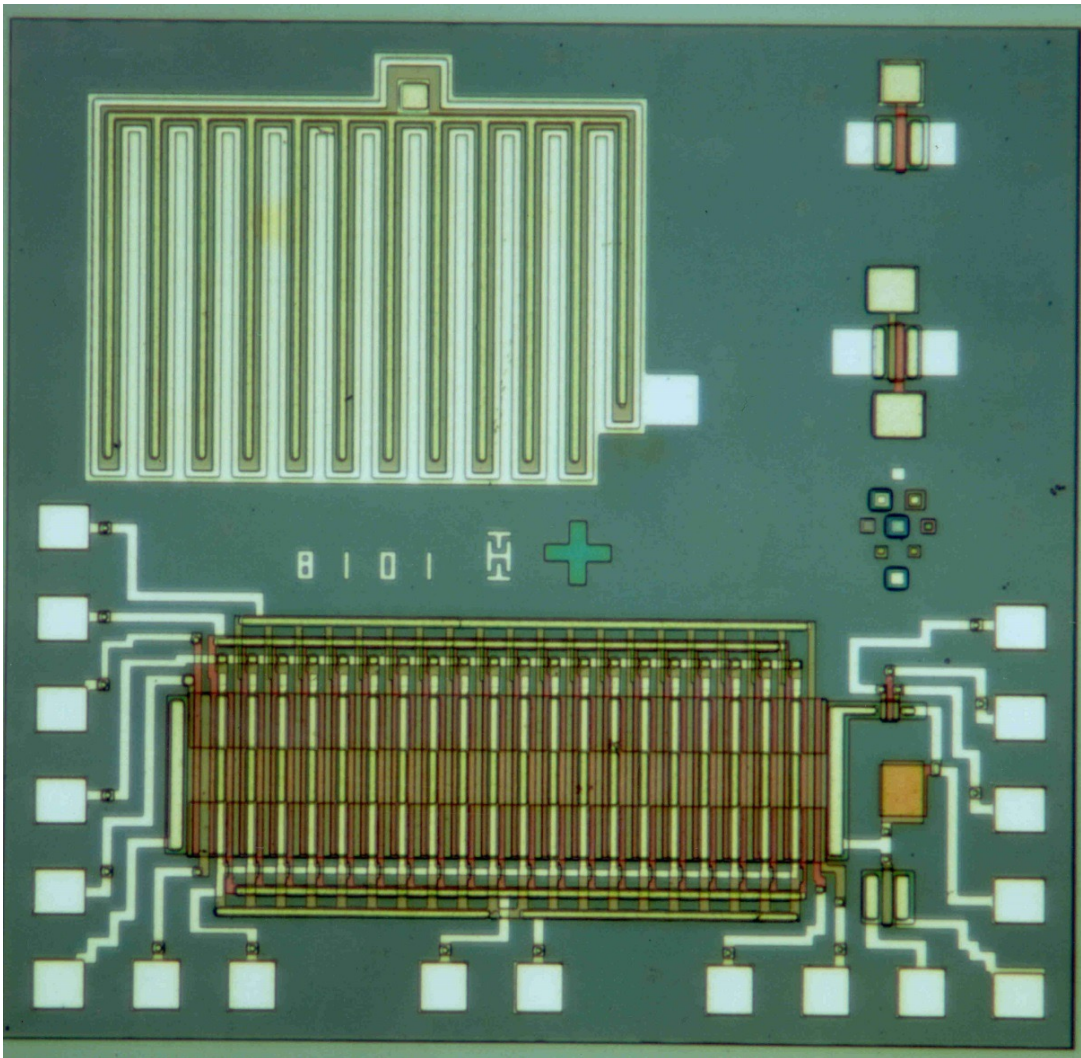


Het IC-lab van de THT ± 1970

THT MOST schakeling 1969



Vastestof Elektronica



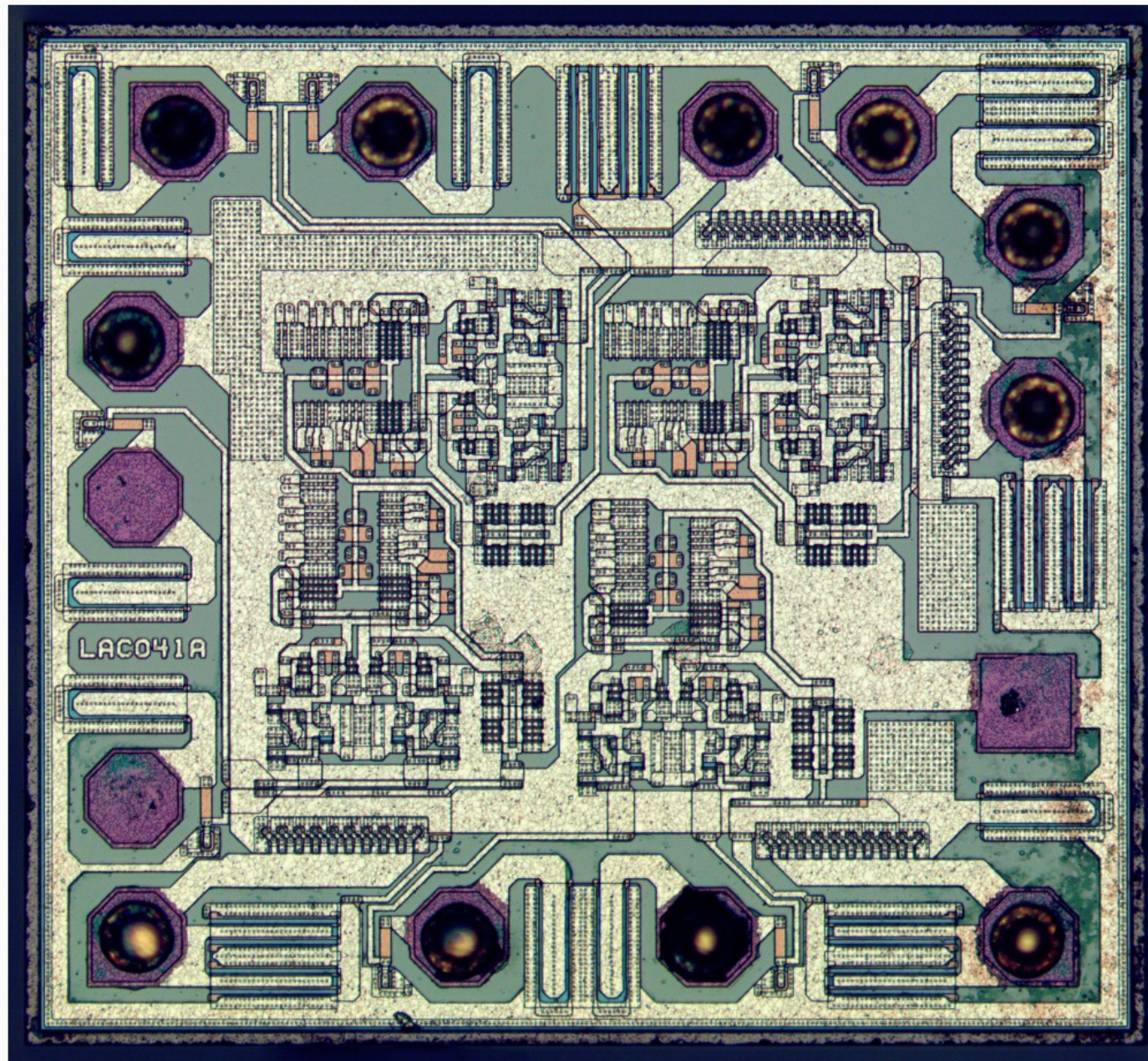
Teststructuren

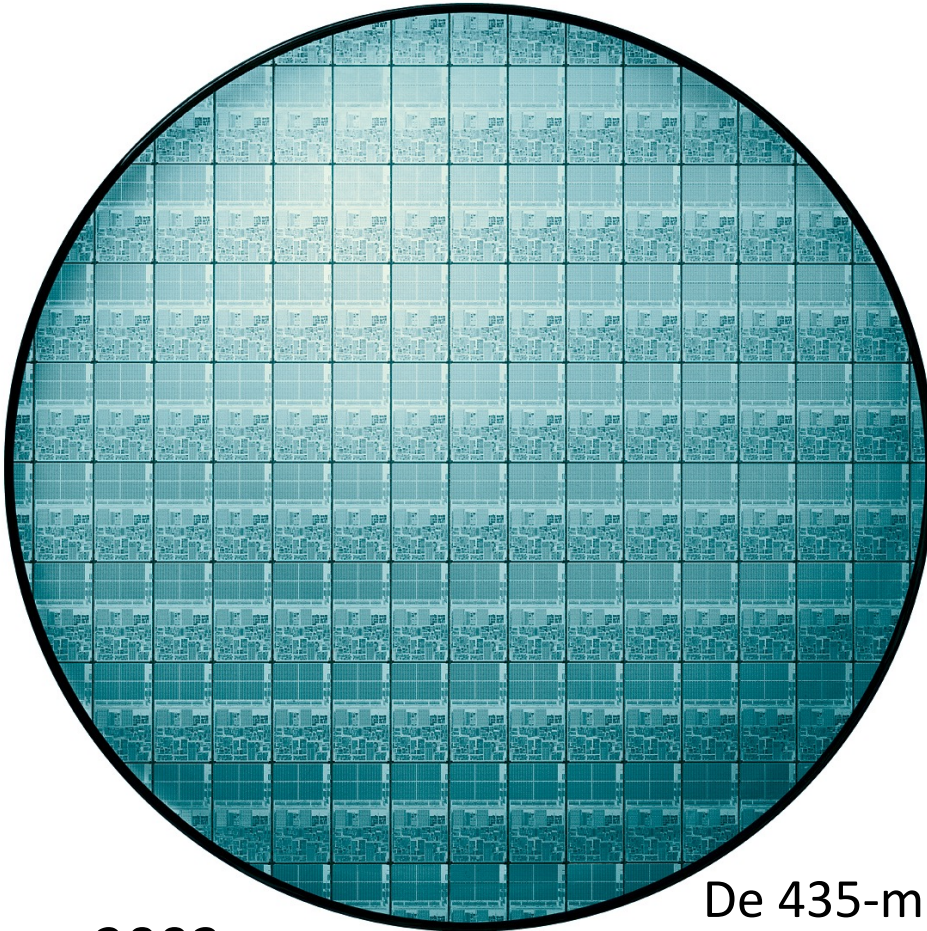
THT 1981

**CCD,
Charge-Coupled Device
met programmeerbare
filterfunctie**

NXP 74AHC00 — quad 2-input NAND gate.

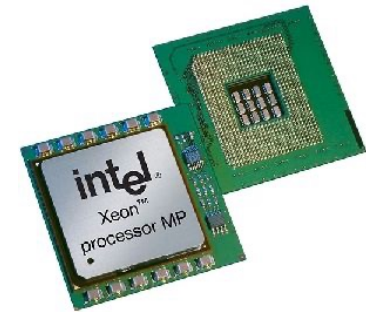
This is a nice example that 'old' tech nodes ($1\mu\text{m}$ and older) are still in use. Also, note how many spare via are there for improved yield..





2003

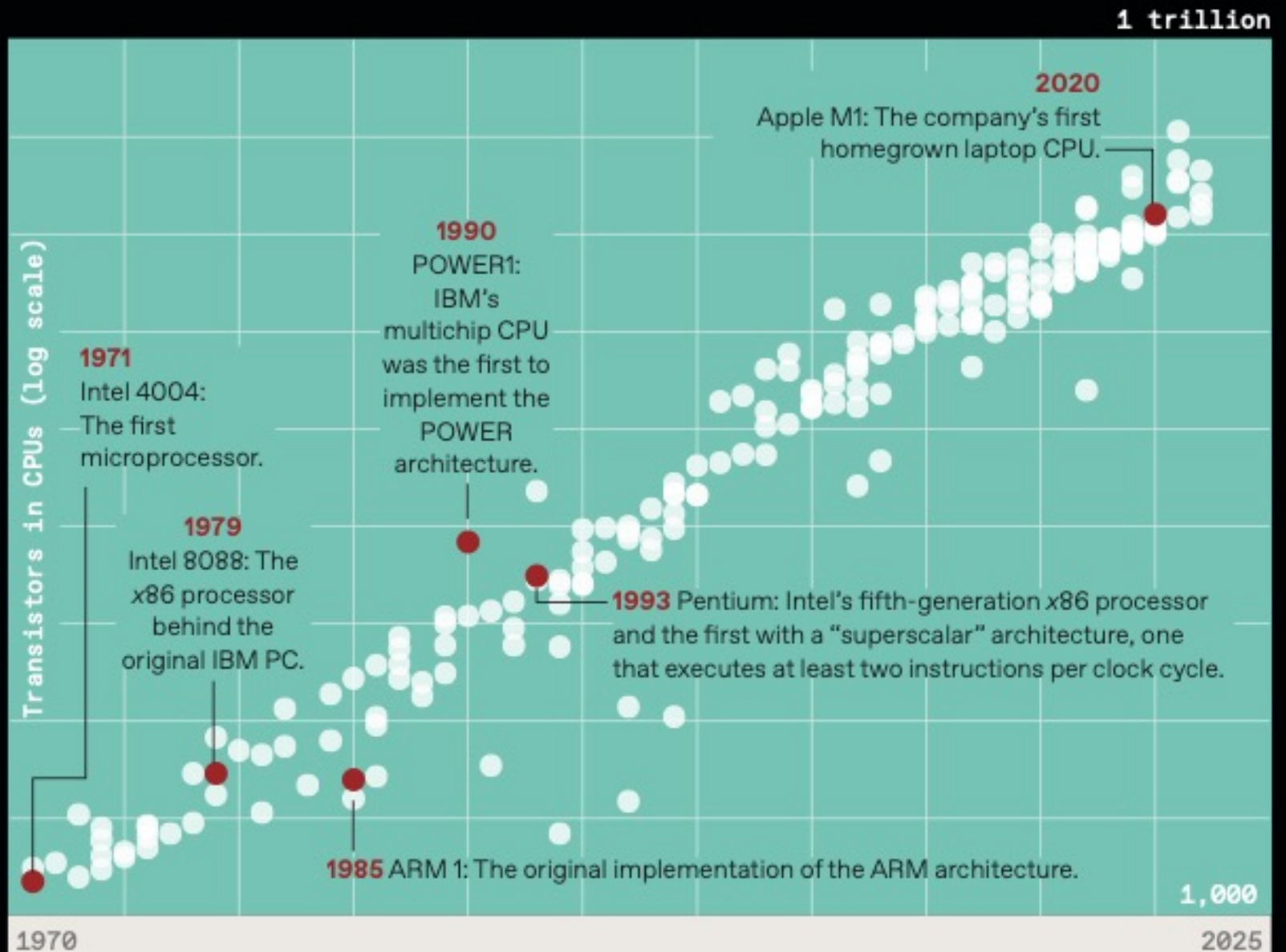
De 435-mm² chip heeft 1.328 miljoen transistoren



Xeon

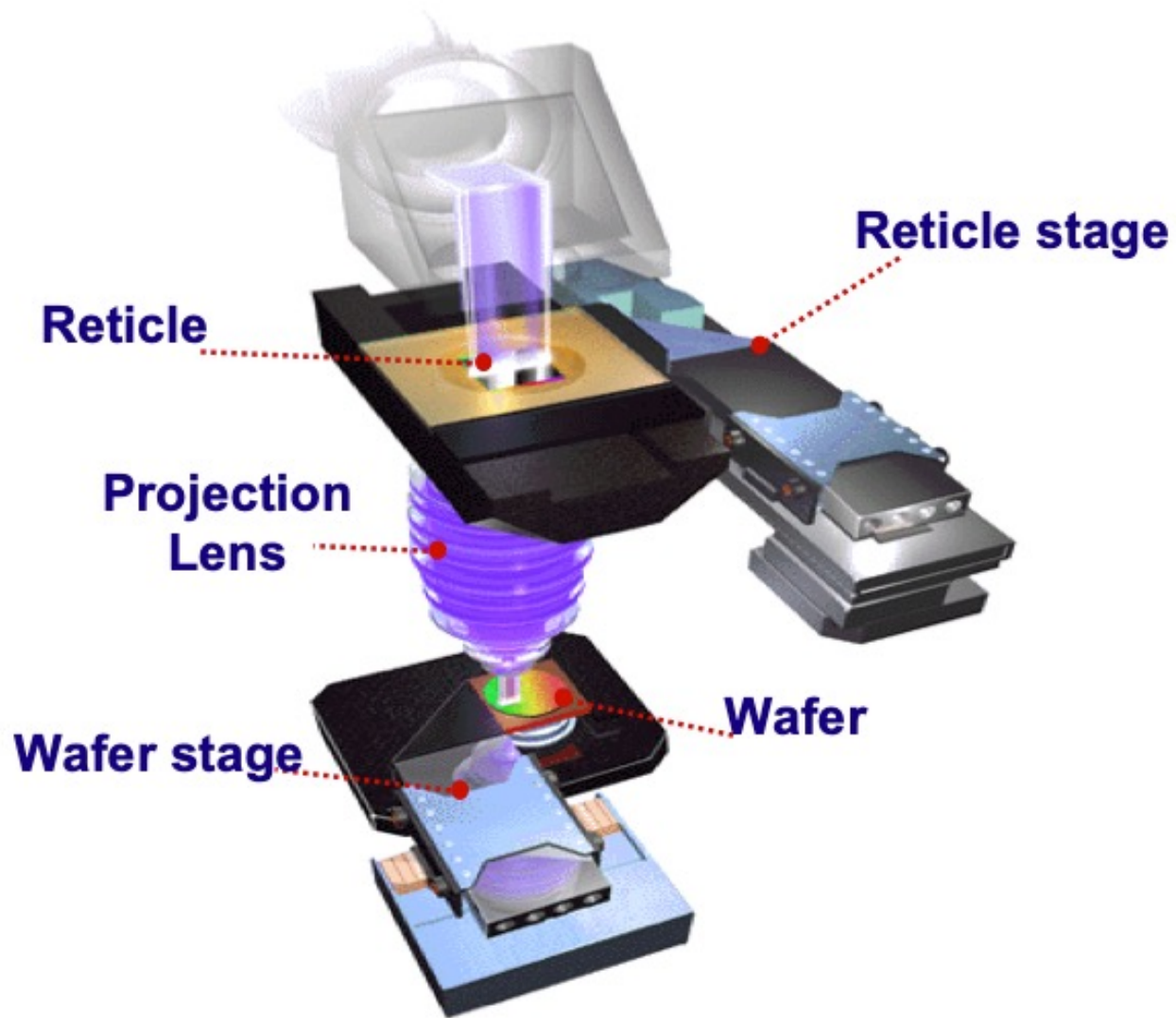
Intel
dual-core 64-b Xeon μ P
processor implemented
in a 65-nm eight-metal
process.

Prijs: $\pm$ \$ 1000 /chip



TRANSISTORS PER PROCESSOR

Number of transistors in CPUs



Projectie van masker op de wafer

$$CD = k_1 \cdot \lambda / NA$$

VISIBLE SPECTRUM

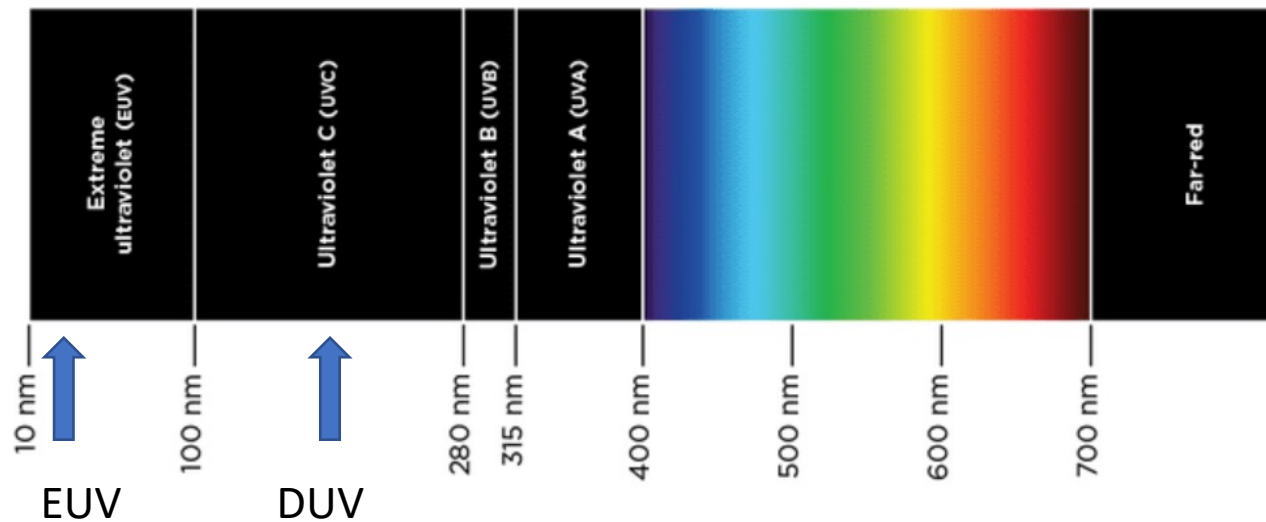
400 600 800 nm



VISIBLE LIGHT

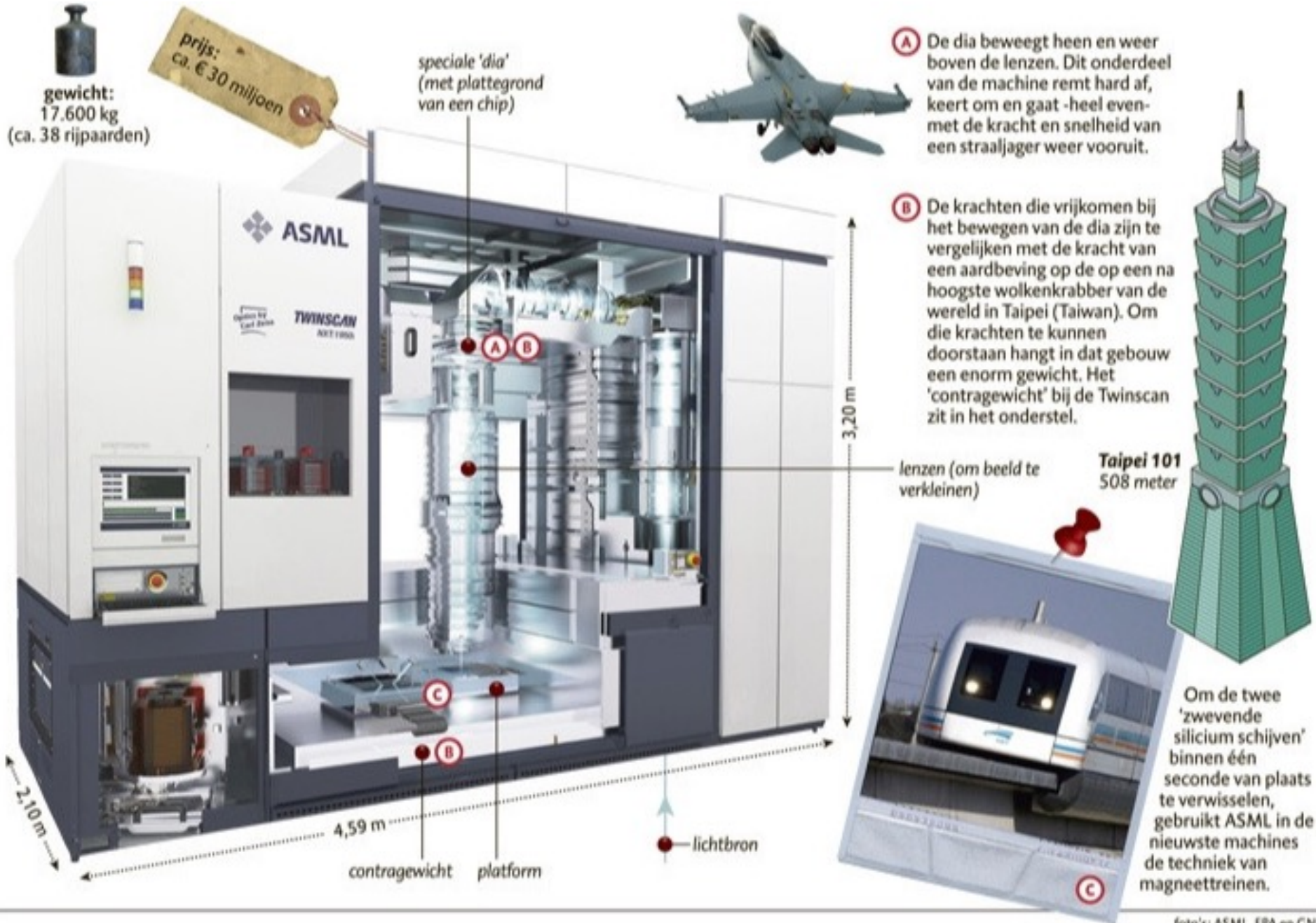


ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



DUV 193 nm

EUV 13,5 nm





TWINSKAN NXT:2100i

The dual-stage
immersion
lithography
system



193 nm

ArF light source



≤ 38 nm

Resolution



1.35 NA

Projection optics



295

Wafers per hour

TWINSKAN NXE:3600D

The TWINSKAN NXE:3600D is ASML's latest-generation lithography system



13.5 nm

EUV light wavelength



13 nm

Resolution



0.33 NA

Projection optics

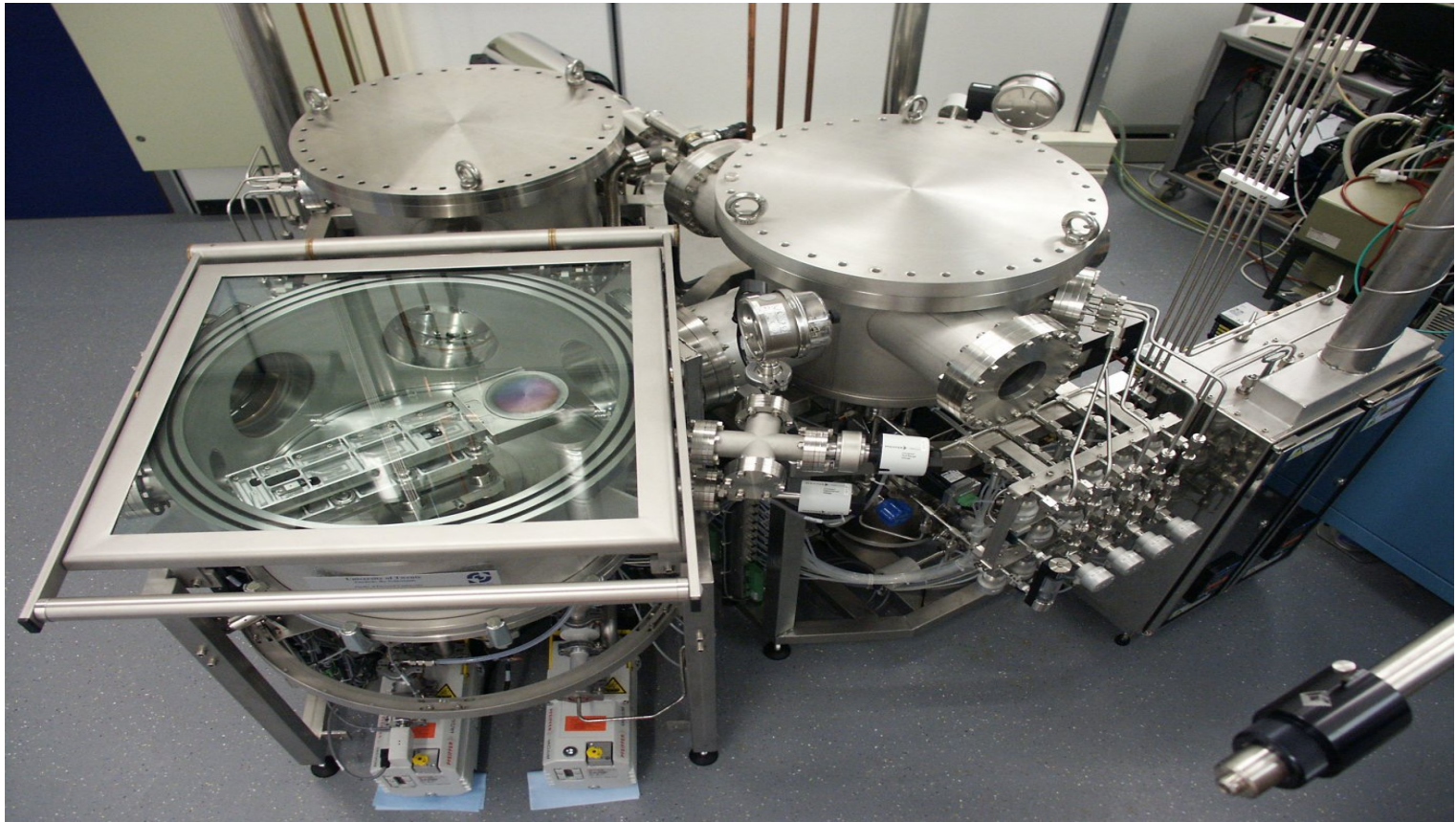


≥ 160

Wafers per hour





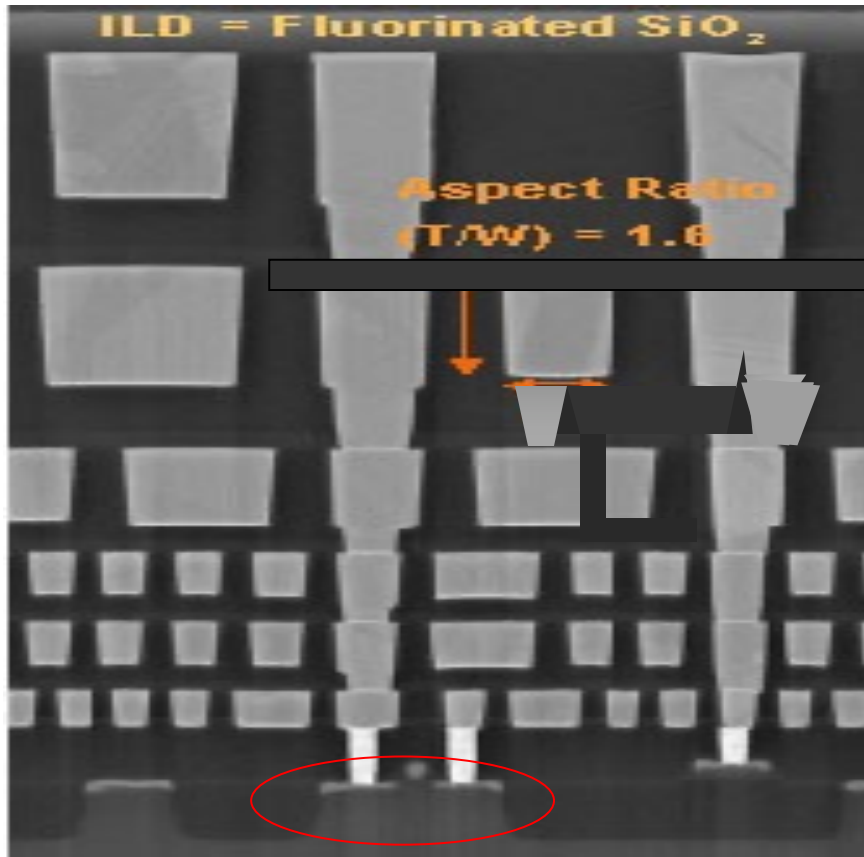


Clustertool voor Atomic Layer Depositie, UT

(2000)



*Nieuwe nodes uitrollen is een complexe en kostelijk affaire. Vandaag zijn er nog maar drie fabrikanten die meespelen op het scherp van de snee. (Beeld; Custom Foundry van **Intel**).*

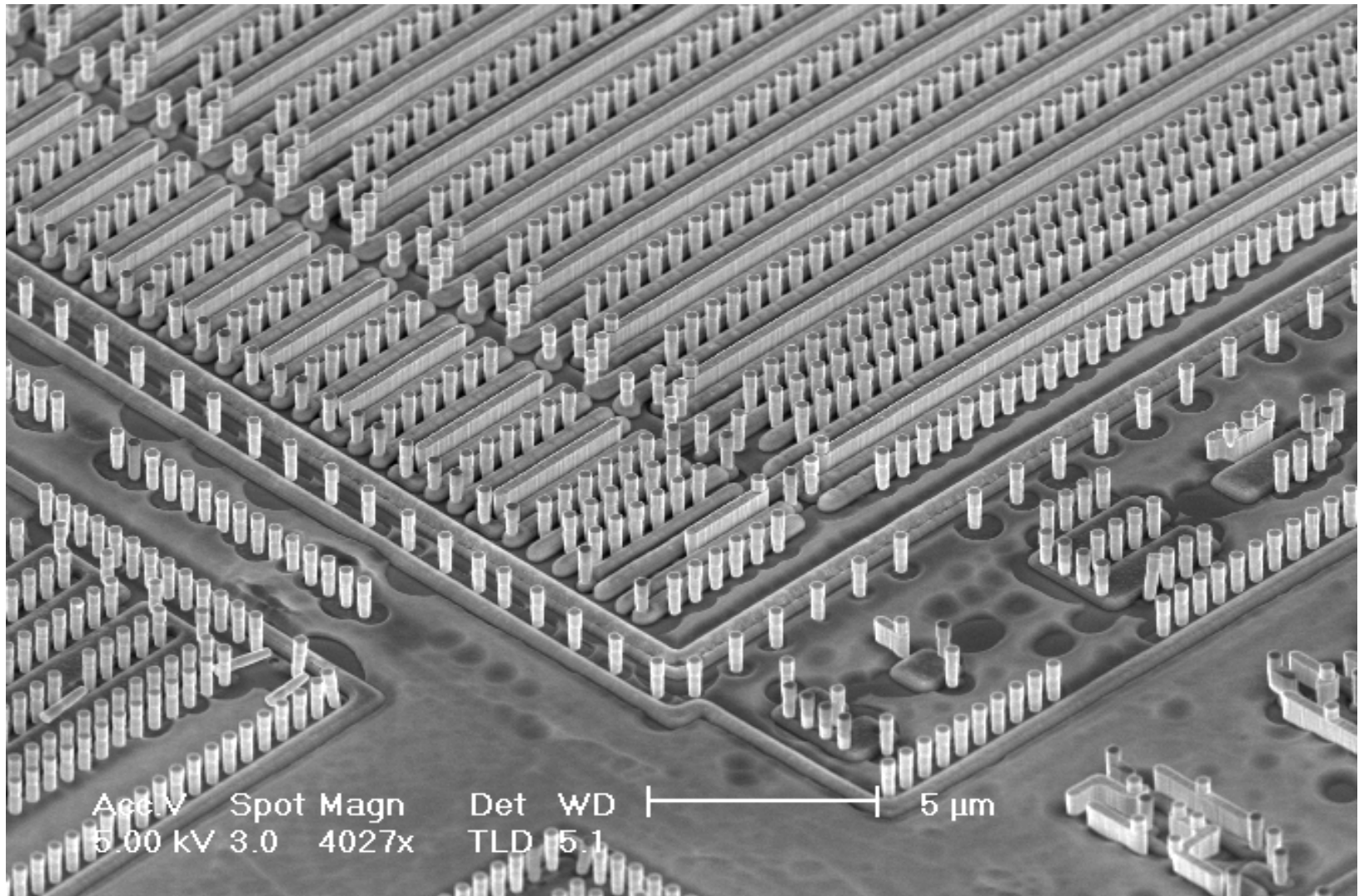


Zoek de MOST

Verticale doorsnede
van chip met 6
bedradingslagen en
onderlinge
doorverbinding

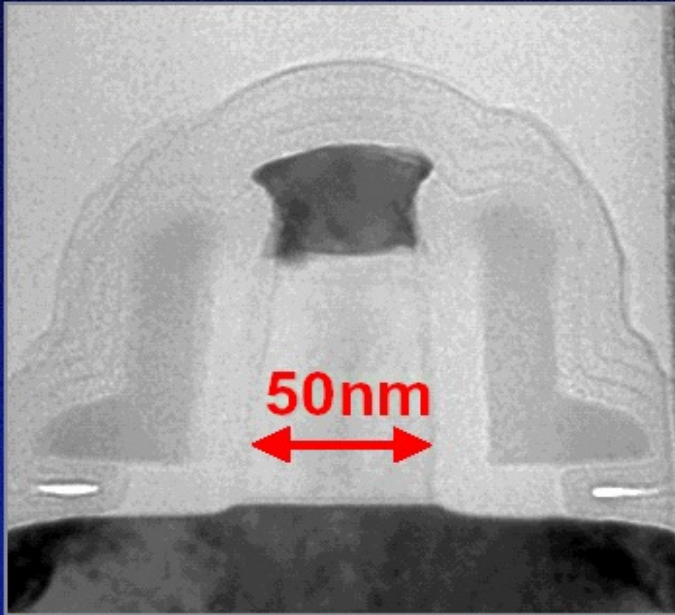
Beeld gemaakt met
elektronenmicroscop

Opengewerkte EEPROM geheugenchip



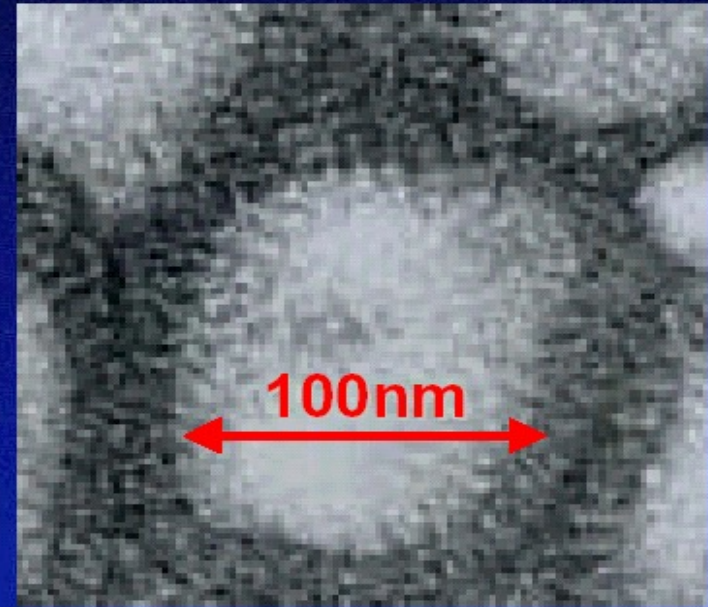
Courtesy Philips Semiconductors

Silicon devices are Nanotechnology



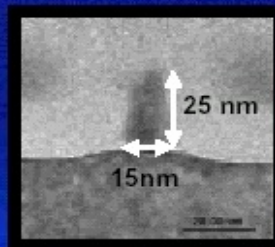
**Transistor for
90nm process**

Source: Intel

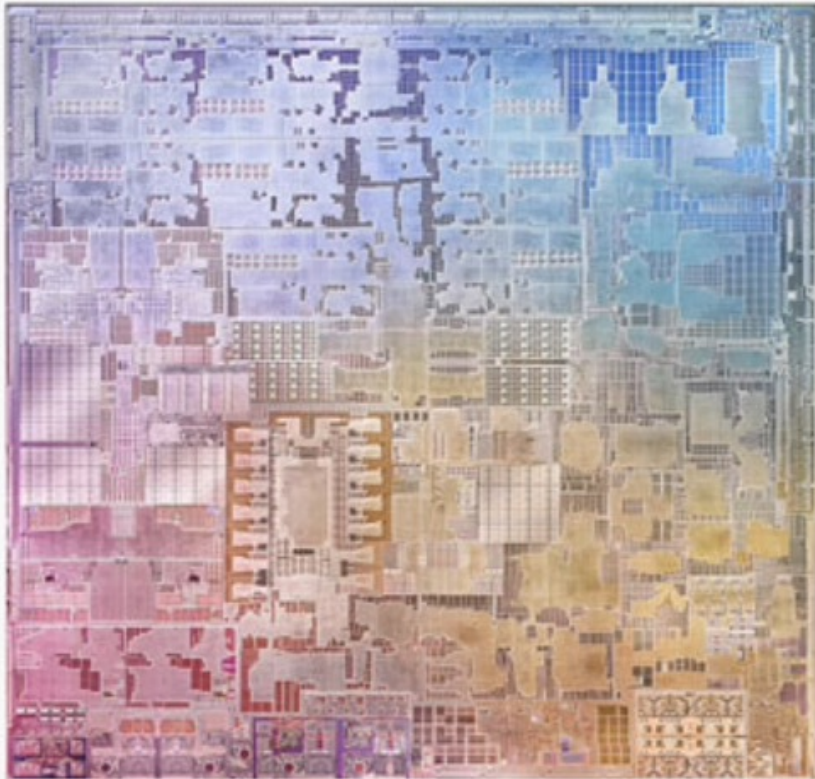


Influenza virus

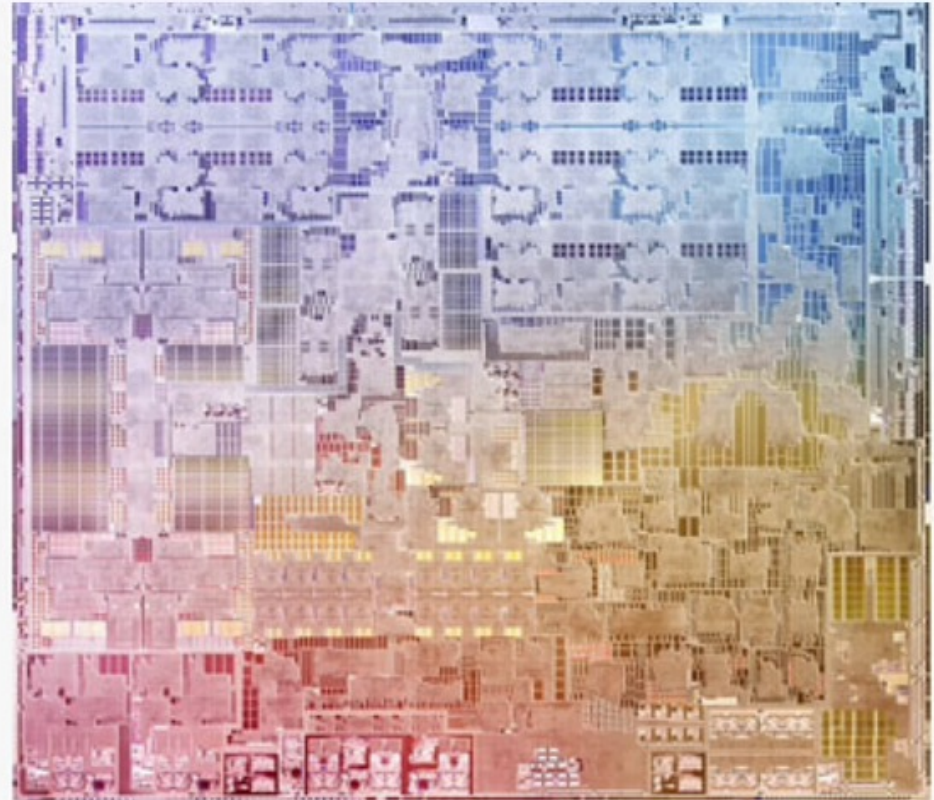
Source: CDC



**15nm Research
Transistor**



Apple M1



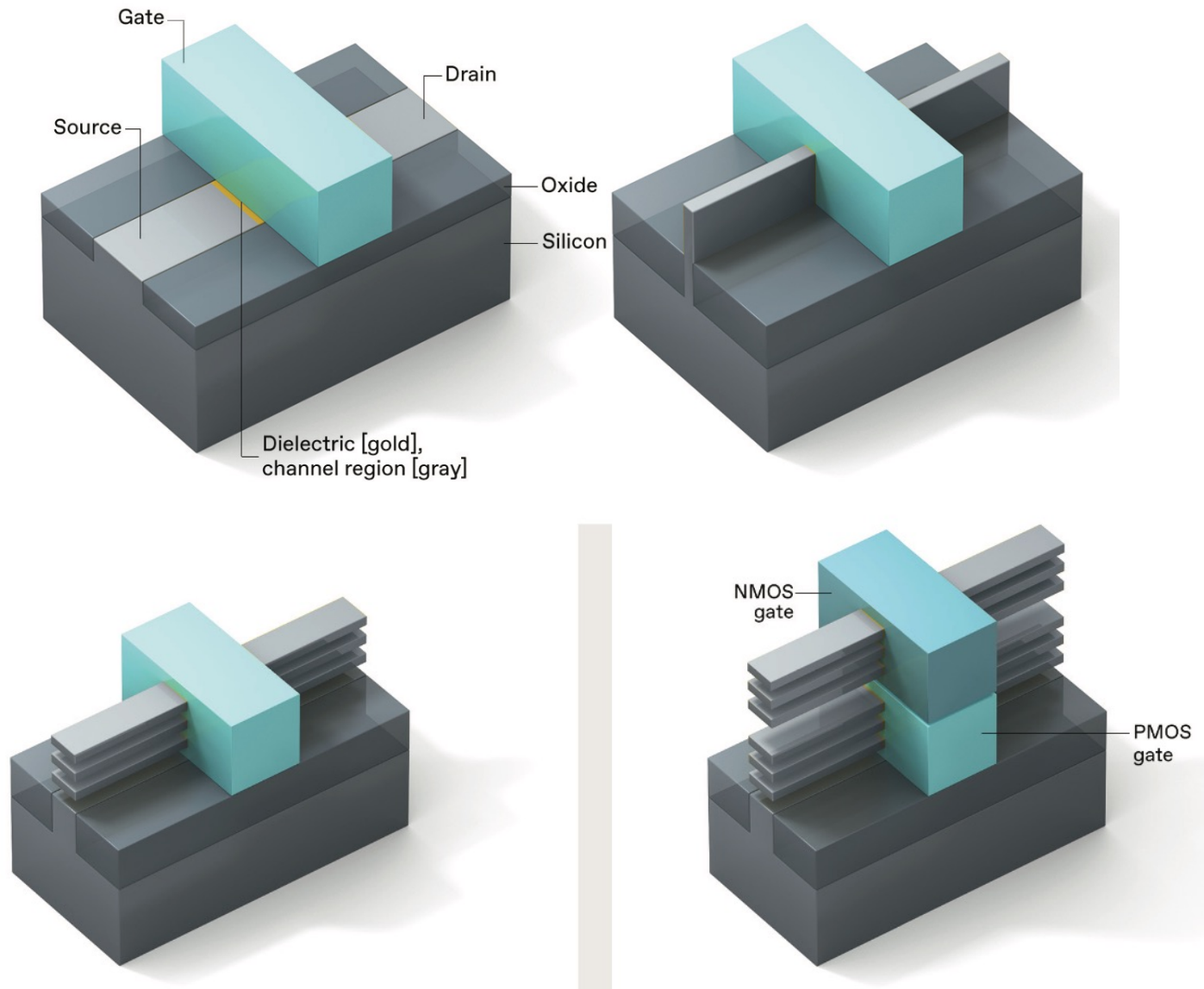
Apple M2

Apple CPU in Macbook, 2020

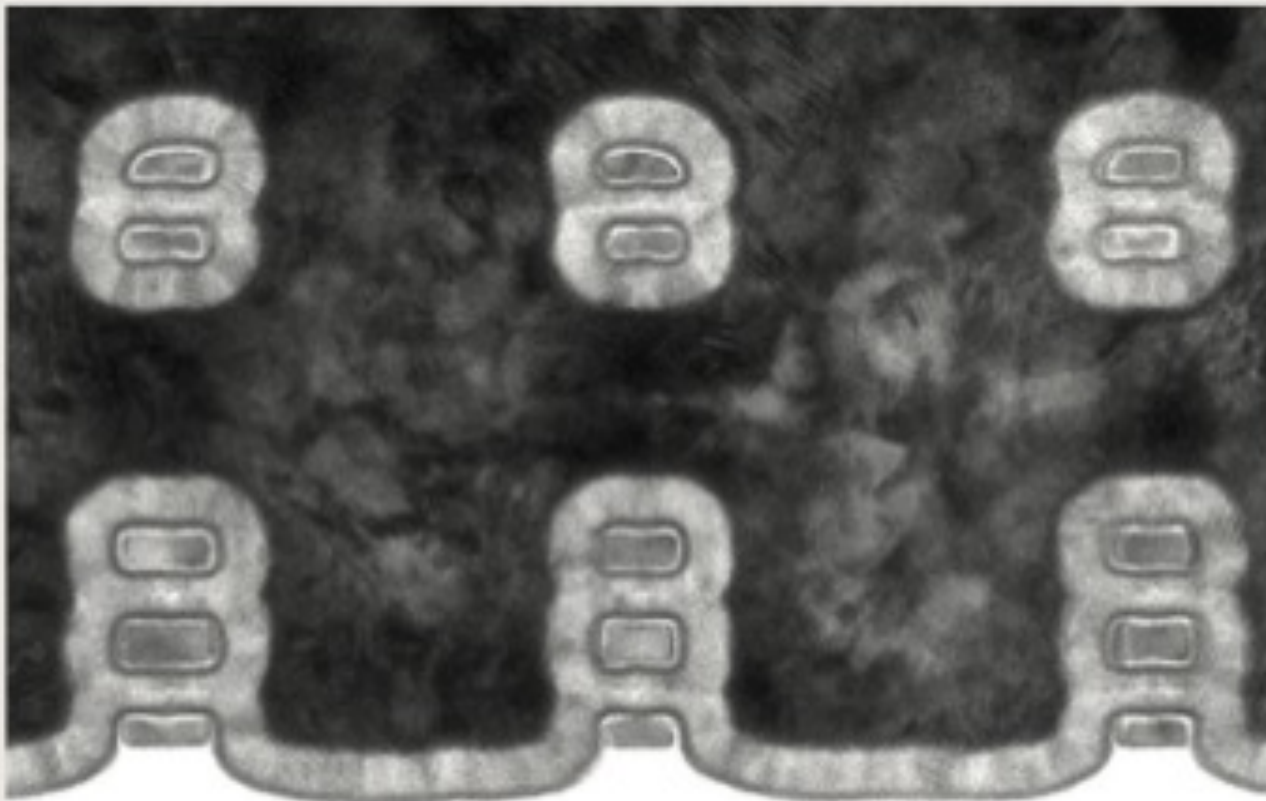
De M2 wordt gemaakt in de 5-nanometertechnologie en heeft 20 miljard transistoren, 25 % meer dan de M1

De M2 maakt gebruik van verbeterde 5-nanometertechnologie van de tweede generatie en heeft maar liefst 20 miljard transistors: 25 procent meer dan de M1.

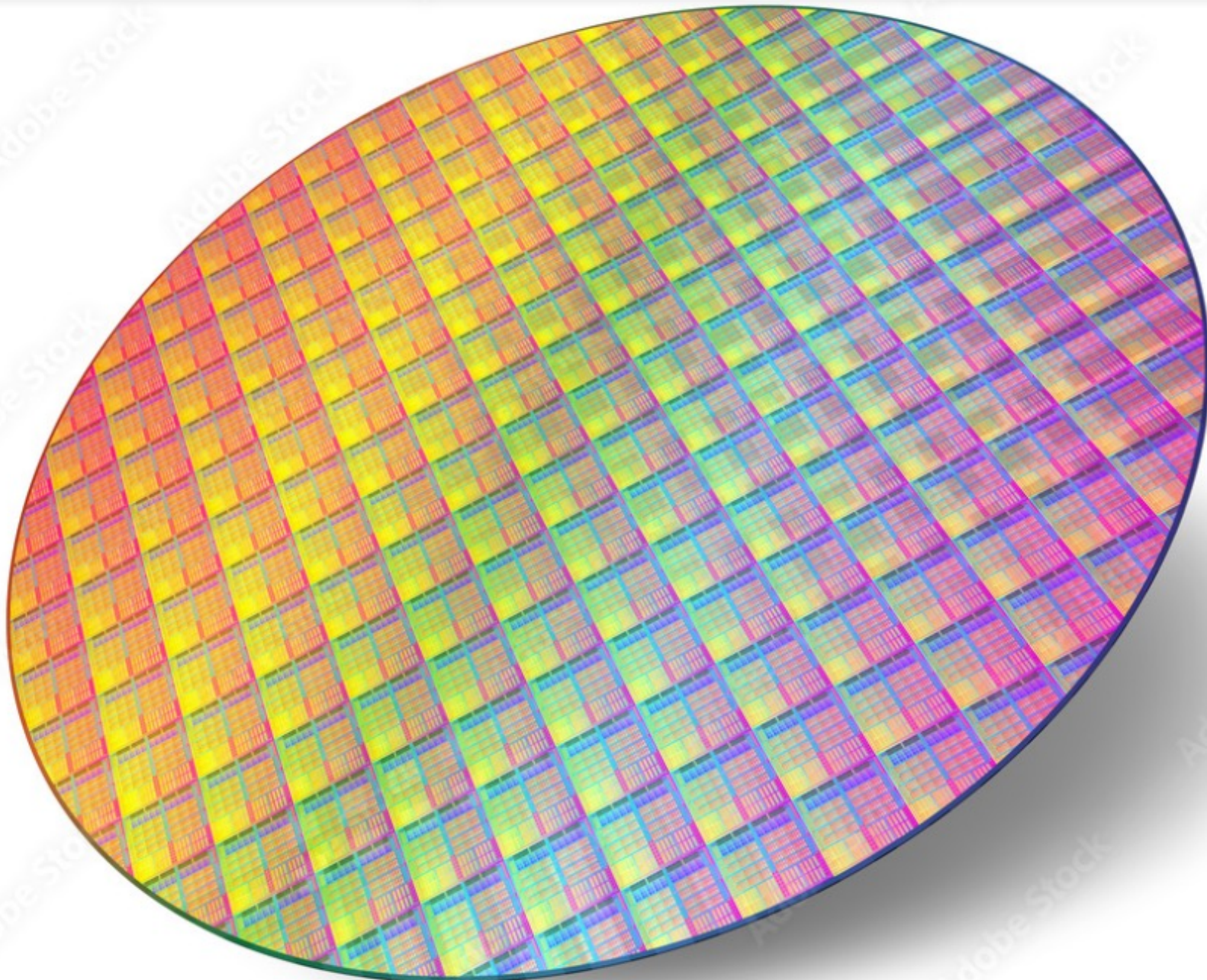


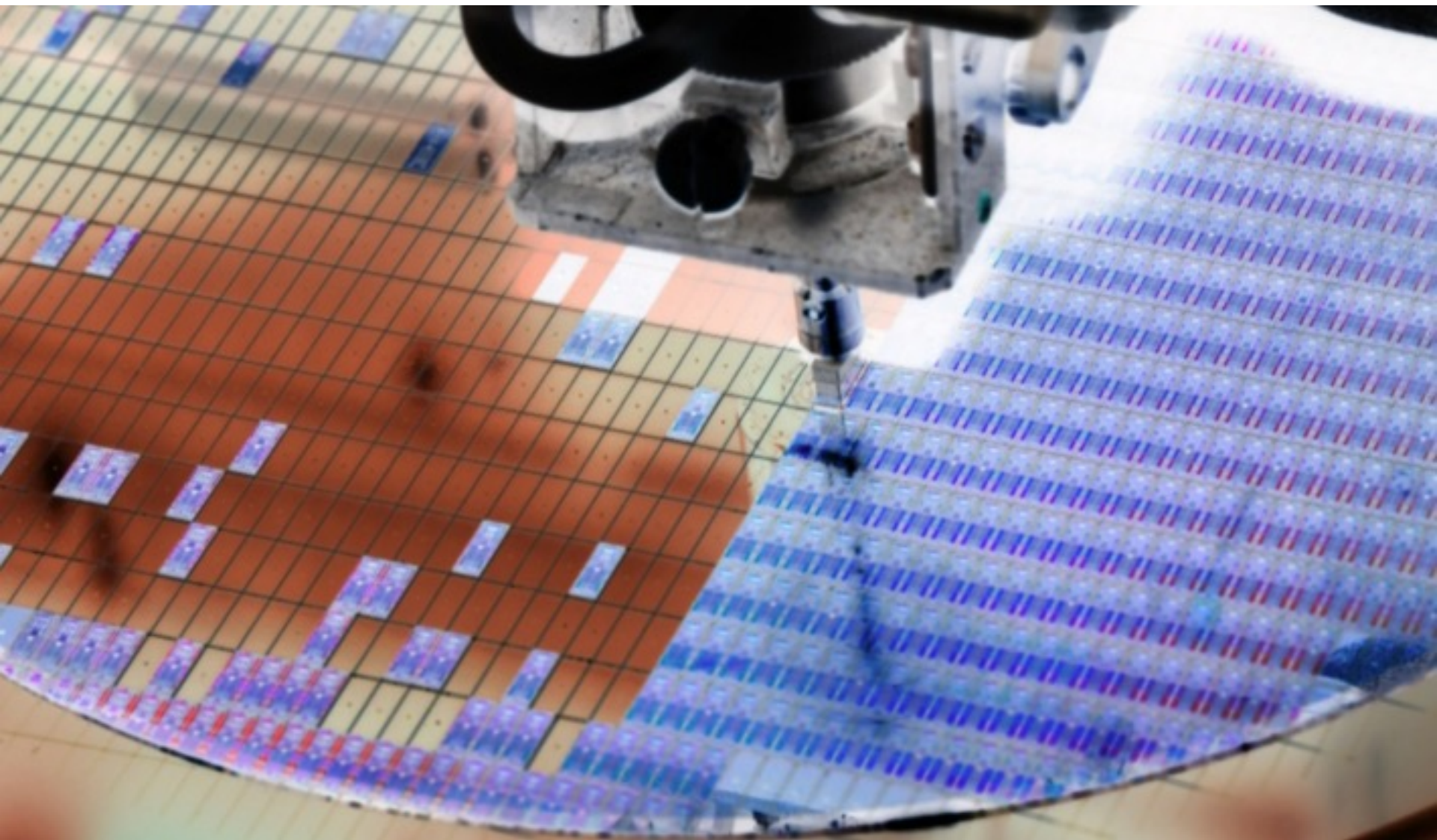


Toekomstige MOST structuren



In CMOS logic, NMOS and PMOS devices usually sit side by side on chips. An early prototype has NMOS devices stacked on top of PMOS devices, compressing circuit sizes.

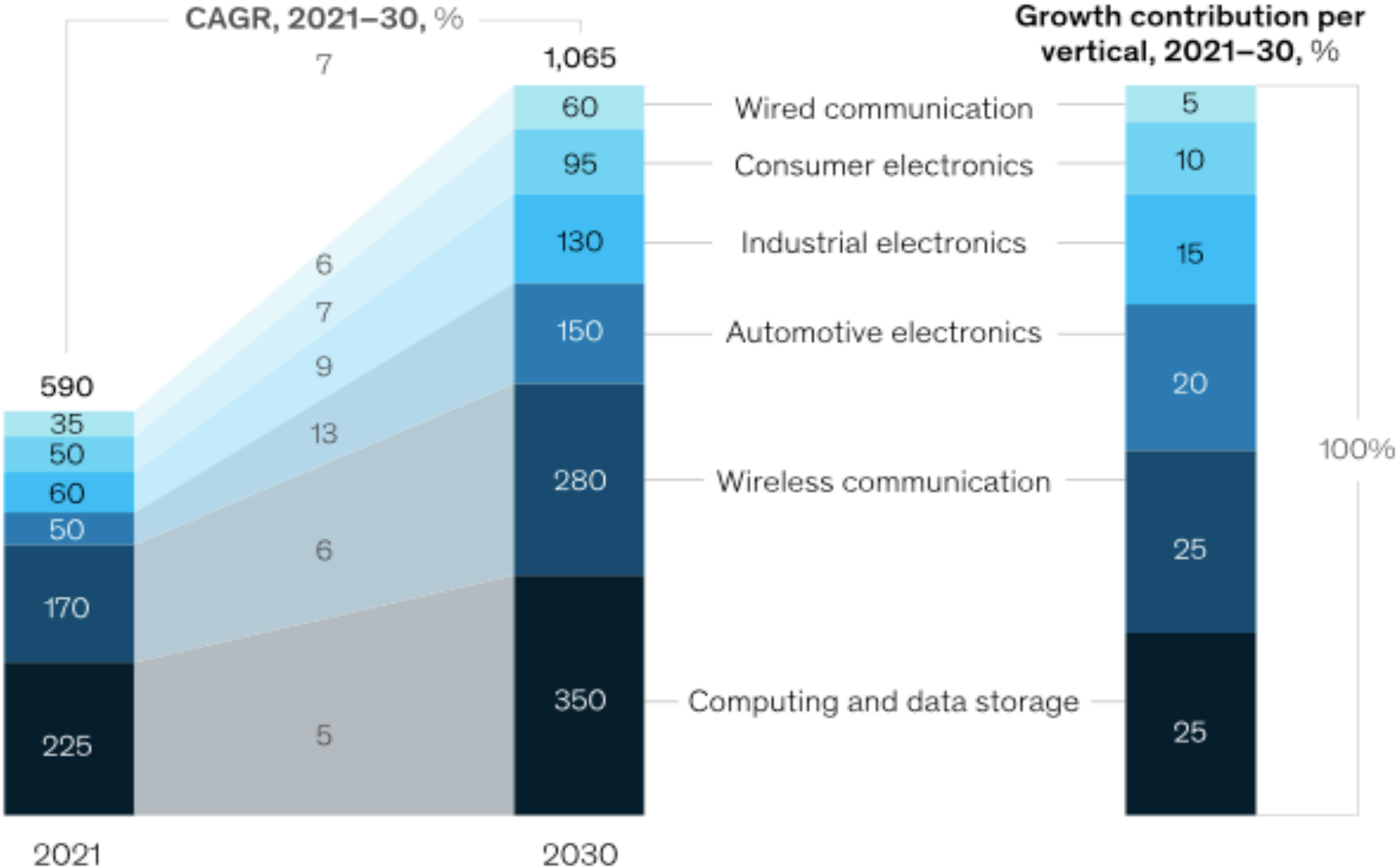


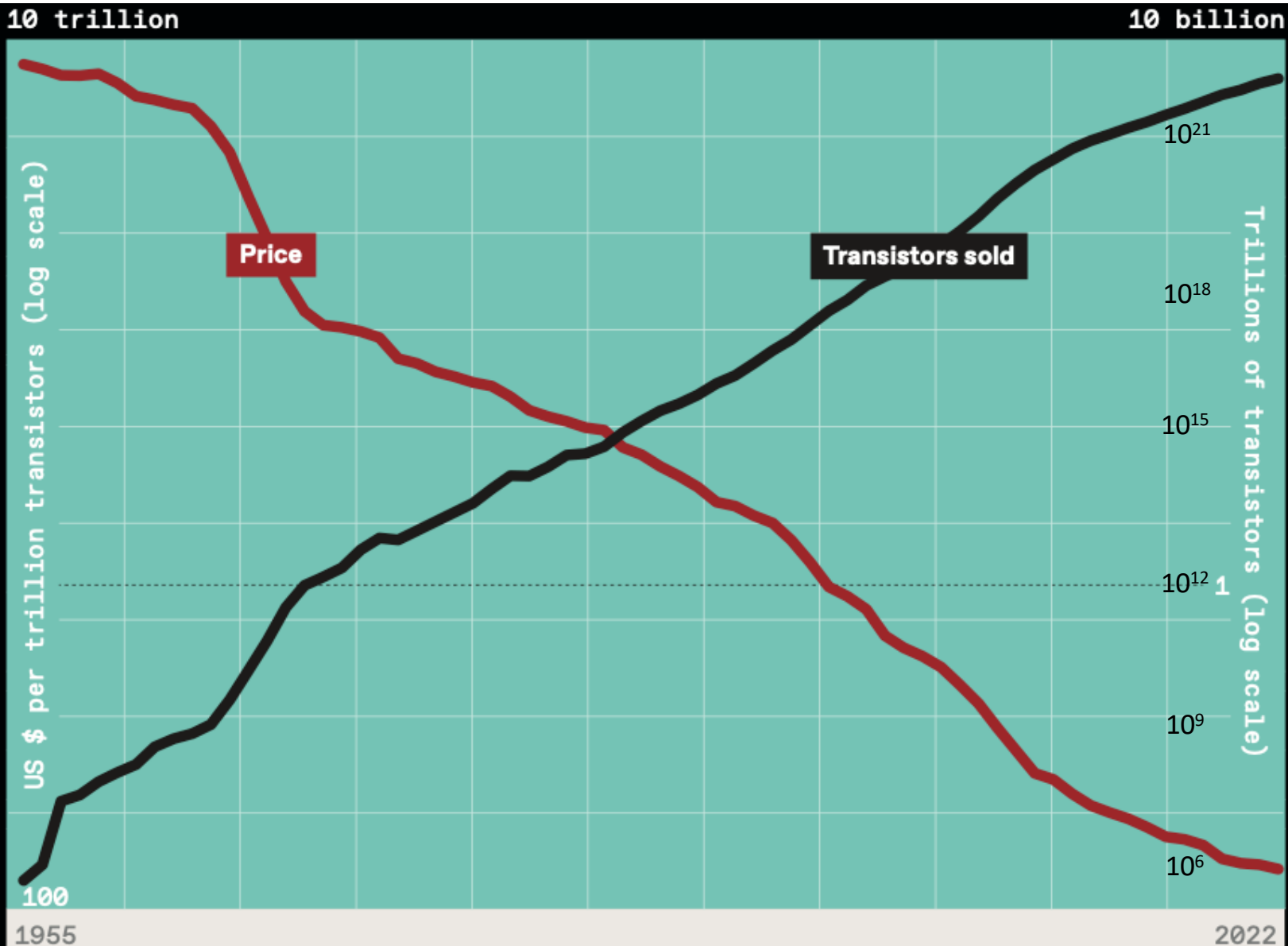


jaar	2013	2022
Omzet wereldwijde halfgeleiderindustrie in US \$	325 miljard	676 miljard
Aantal geproduceerde transistoren/jaar	10^{19}	10^{21}
Aantal transistoren/persoon/dag	4 miljoen	340 miljoen

The overall growth in the global semiconductor market is driven by the automotive, data storage, and wireless industries.

Global semiconductor market value by vertical, indicative, \$ billion

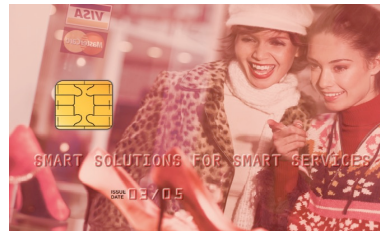




HUGE VOLUME, SMALL PRICE

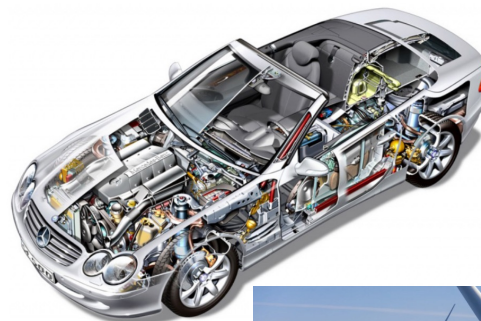
Price per trillion transistors, US \$; transistors sold per year, trillions

Micro-elektronika is overall



2013

Internet, Artificial Intelligence, Energietransitie



2023

18-09-2023

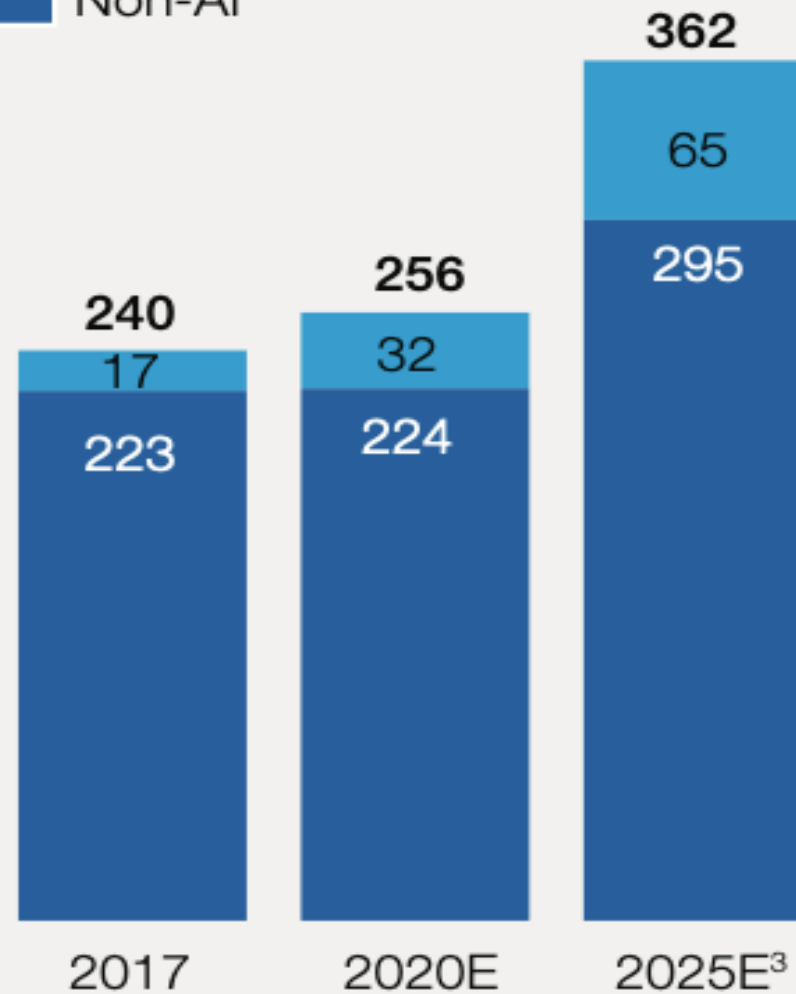
AI semiconductor total available market,¹ \$ billion



AI



Non-AI



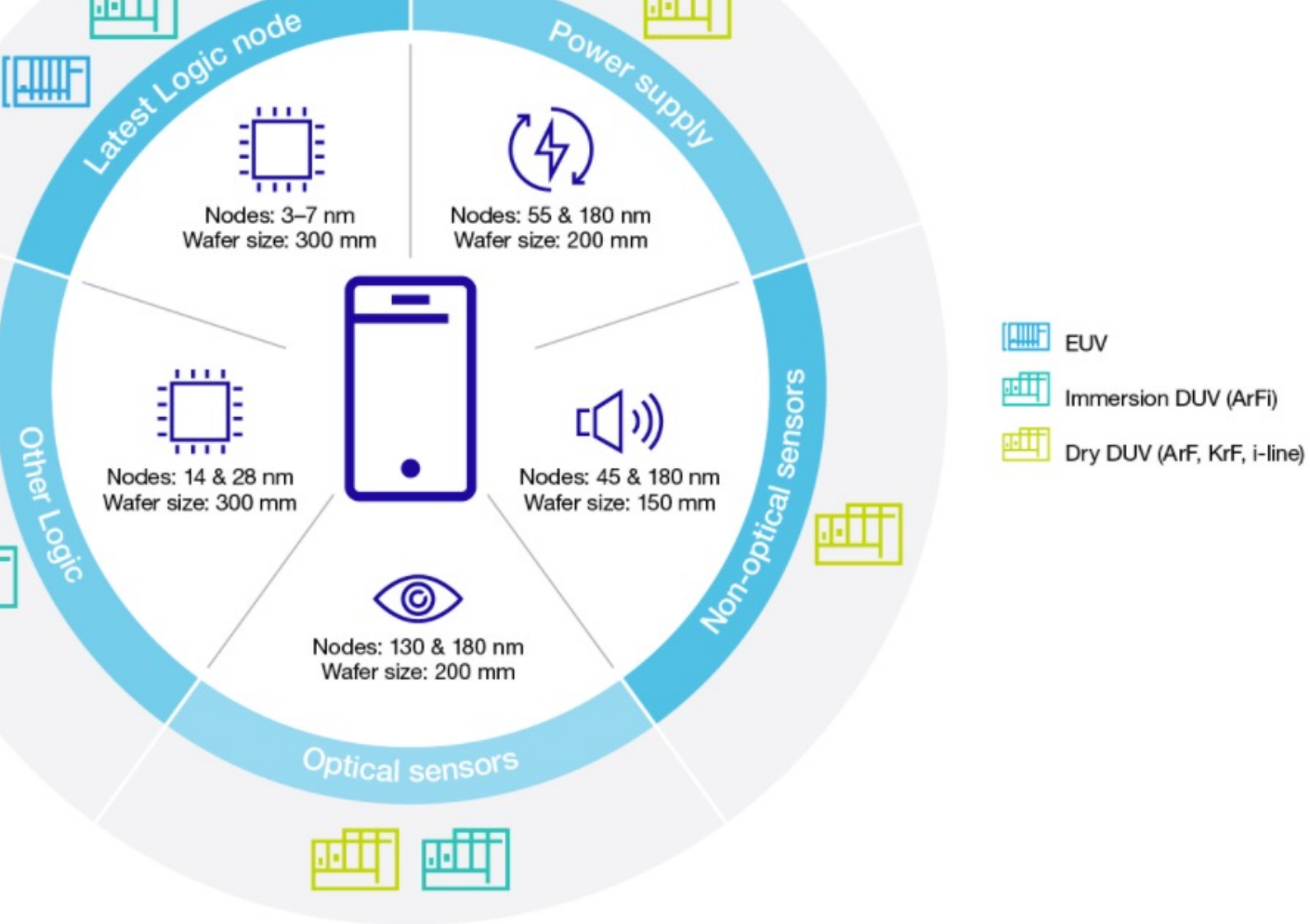


Met je smartphone heb je vele miljarden transistoren op zak, die met biljarden transistoren elders op de wereld communiceren.

Je consumeert meer dan 4000 transistoren/s

Dat is ongeveer 3,5 miljoen transistoren per dag





Smartphones contain many different types of microchips made using a range of ASML lithography machines.