

Elettronica dello Stato Solido

Lezione 1: **Introduzione**



Daniele Ielmini

DEIB – Politecnico di Milano

daniele.ielmini@polimi.it

Outline

- Informazioni sul corso
- Introduzione all'elettronica dello stato solido
- Breve storia della microelettronica
- Conclusioni

Obiettivi del corso

- Obiettivo: apprendere il funzionamento fisico dei dispositivi tramite la comprensione dello *stato* e delle proprietà di *trasporto* dei portatori (elettroni, lacune):
 1. Meccanica quantistica (elettroni in atomi, elettroni nei solidi, teoria delle bande, densità degli stati)
 2. Statistica dei portatori (distribuzioni di energia, densità di portatori in metalli, semiconduttori e isolanti, drogaggio)
 3. Trasporto di portatori (mobilità, drift, diffusione, effetti di alto campo)

Perchè ESS?

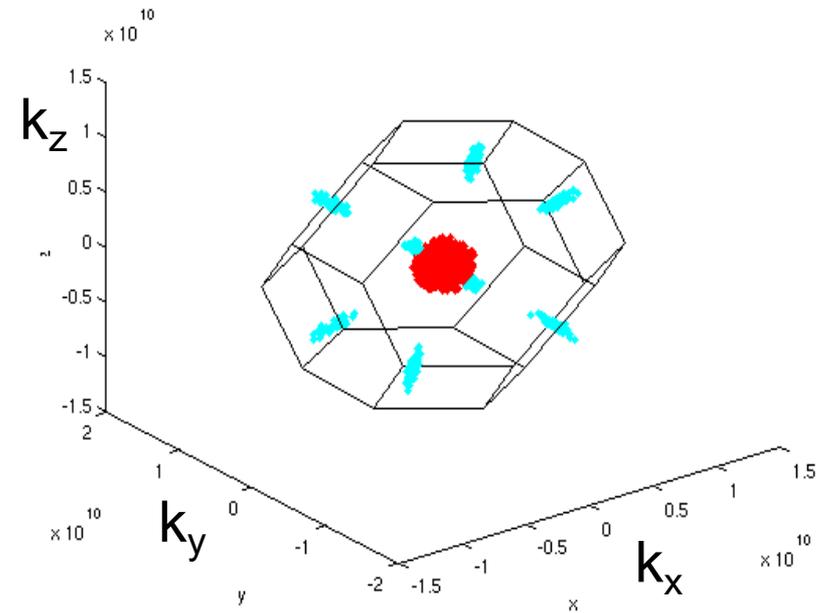
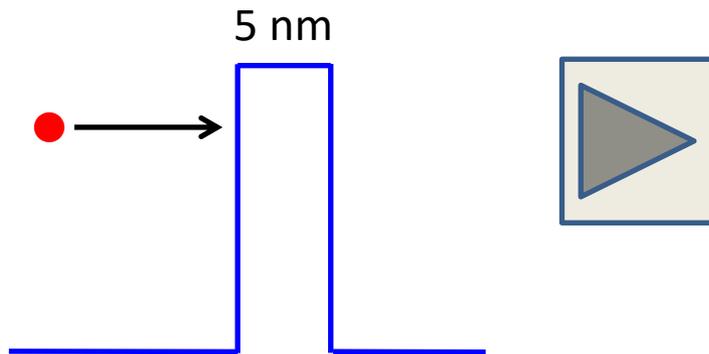
- Elettronica dal punto di vista della fisica dei dispositivi (meccanica quantistica, fisica dello stato solido, fisica dei semiconduttori)
- Propedeutico a corsi nella triennale (Optoelettronica) e magistrale (Electron Devices)
- Formativo per ogni ingegnere elettronico completo (parassiti, regole di layout, banda, scaling)
- È il punto d'accesso per uno degli argomenti di ricerca più affascinanti del panorama dell'elettronica:
 - Memristori
 - Spintronica
 - Quantum computing
 - In-memory computing
 - Neuromorphic computing

Organizzazione del corso

Data	Dove	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Lunedì	5.02			ELETTRONICA DELLO STATO SOLIDO lezione (dal 22/02/2021 al 31/05/2021)									
Martedì	2.1.2 (EX N.1.2)			ELETTRONICA DELLO STATO SOLIDO lezione (dal 23/02/2021 al 01/06/2021)									
Mercoledì	25.S.1 (EX D.0.1)		ELETTRONICA DELLO STATO SOLIDO lezione (dal 24/02/2021 al 26/05/2021)										
Giovedì	5.03			ELETTRONICA DELLO STATO SOLIDO esercitazione (dal 25/02/2021 al 03/06/2021)									
Venerdì													
Sabato													

- Lezioni (totale 60 ore)
- Esercitazioni (totale 32 ore)
- Laboratorio numerico (totale 8 ore)

Laboratorio numerico



$T=600K$

- Vedere la fisica dei dispositivi (dipendenza dal tempo, 3D)
- Acquisire strumenti multidisciplinari di apprendimento e approfondimento
- Per i laboratori a distanza, sarà necessario scaricare Matlab sul vostro PC (versione free di ateneo)

Riferimenti bibliografici

- Eisberg, Resnick – Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles (Wiley)
 - Cap. 1, 2 (no 2.7/8), 3, 4, 5, 6 + leggere 13 (fac.)
- R. Pierret – Advanced Semiconductor Fundamentals
 - Cap. 1, 3, 4, 5 (no 5.3/4), 6 + leggere 2 (fac.)
- Materiale online (lezioni, esercitazioni di laboratorio e temi d'esame risolti) al link
<https://ielmini.faculty.polimi.it/>

Ricevimento/esami

- Ricevimento: Venerdì 10:30-12:00, Via Golgi 42 – Piano 4 (6120 o daniele.ielmini@polimi.it)
- Esame: esercizi su tutto il corso (lezioni + esercitazioni)
- Sito web <https://ielmini.faculty.polimi.it/>
 - Slides del corso
 - Avvisi
 - Temi d'esame 2008-2021 + soluzioni
 - Altro materiale didattico (animazioni, codici Matlab, tesi disponibili)

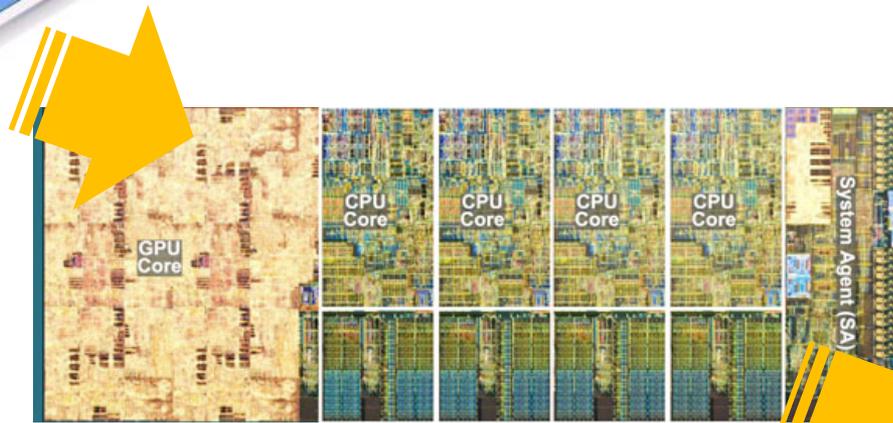
Outline

- Informazioni sul corso
- Introduzione all'elettronica dello stato solido
- Breve storia della microelettronica
- Conclusioni

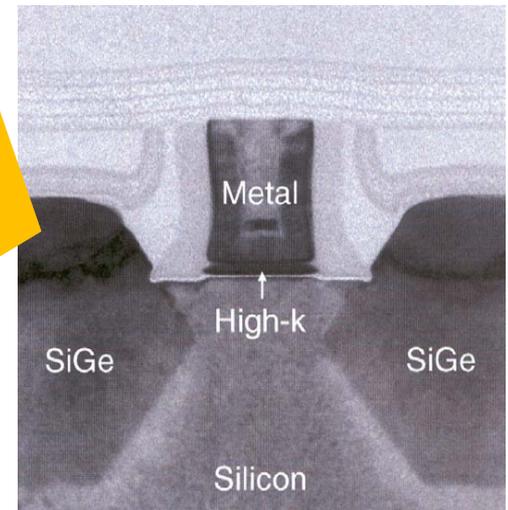
Sistemi, circuiti e dispositivi



Computer,
tablet,
smartphone

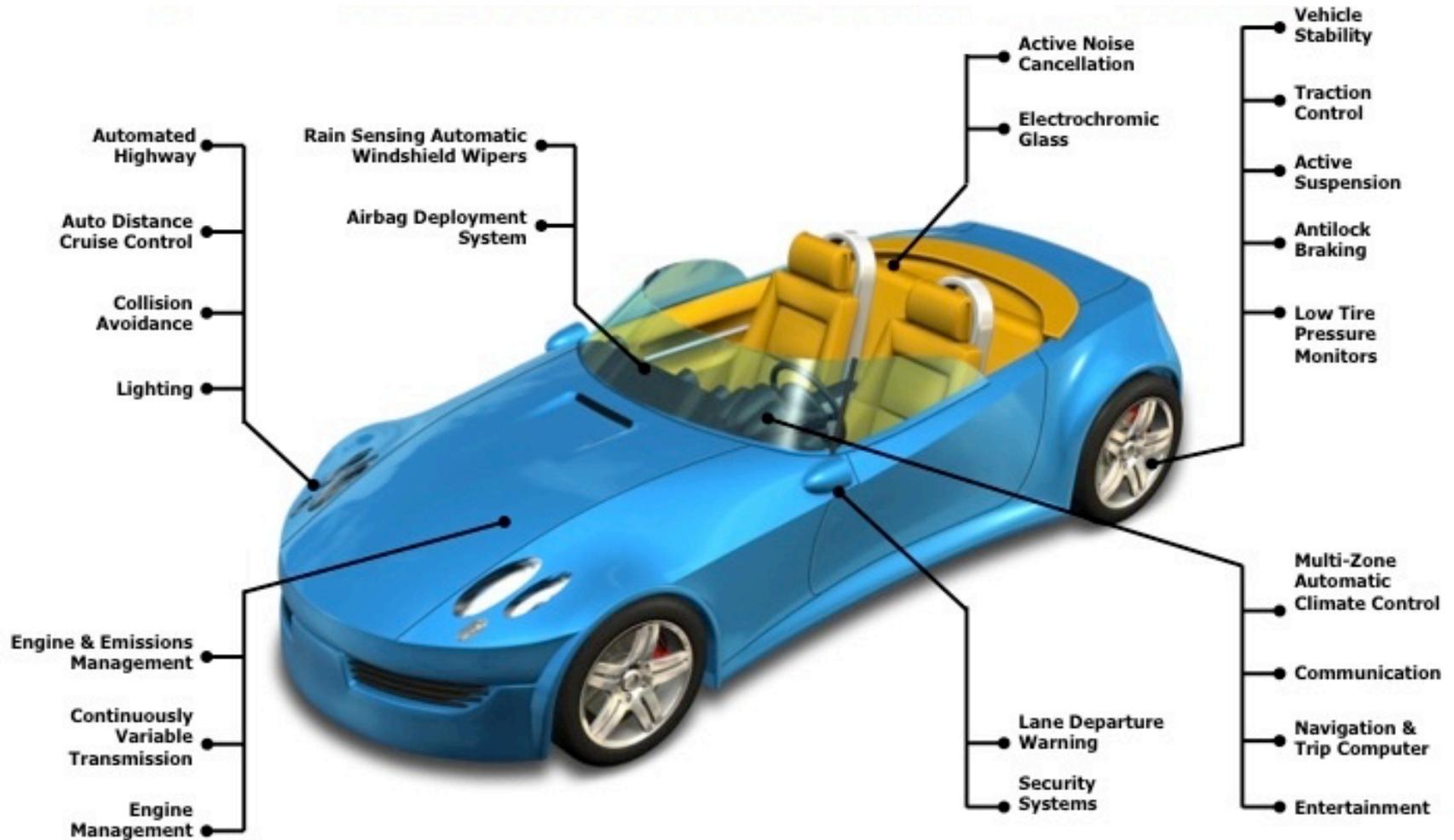


Central Processing Unit (CPU)
Intel 22 nm Ivy Bridge



MOS transistor
45 nm p-channel

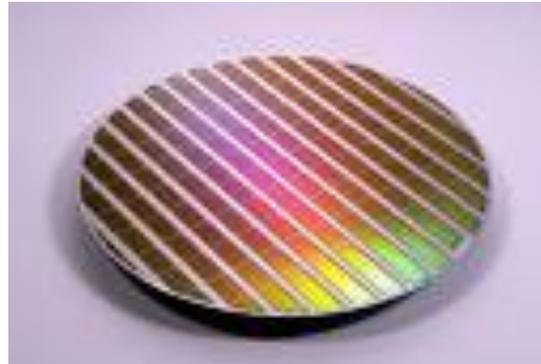
Sistemi



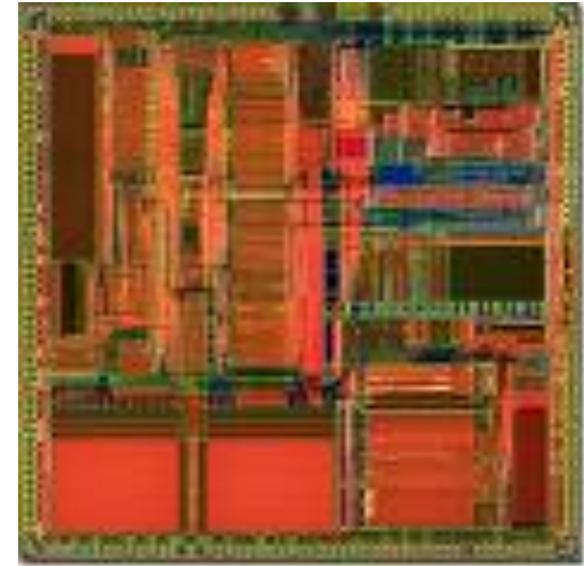
Circuiti integrati elettronici (ICs)



Primo IC nel 1958



Wafer con decine di ICs



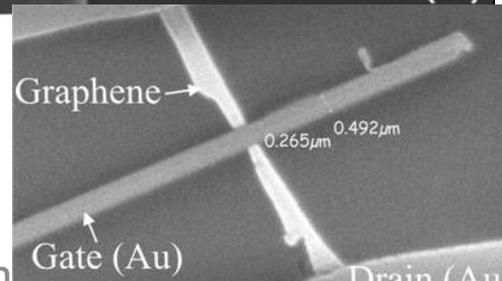
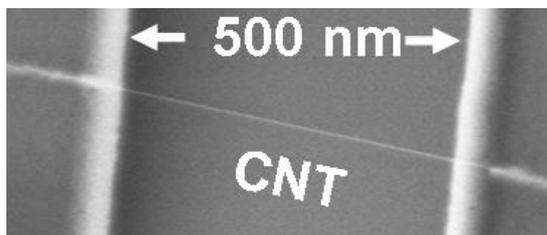
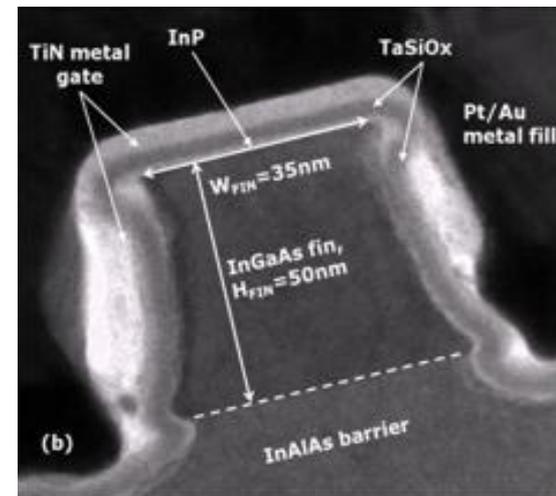
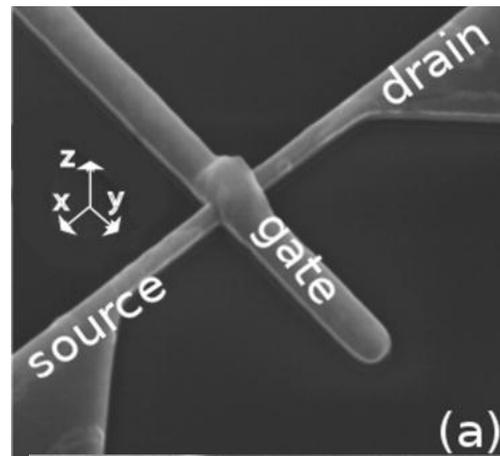
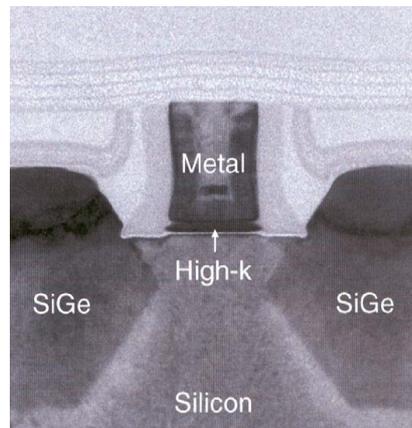
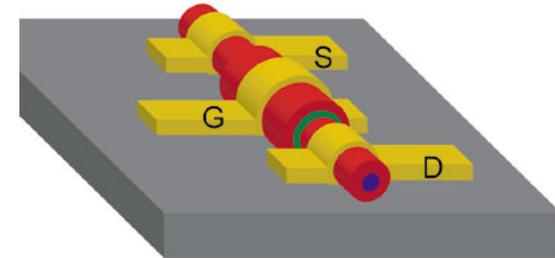
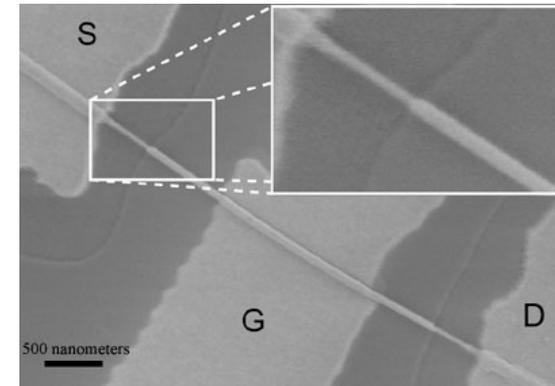
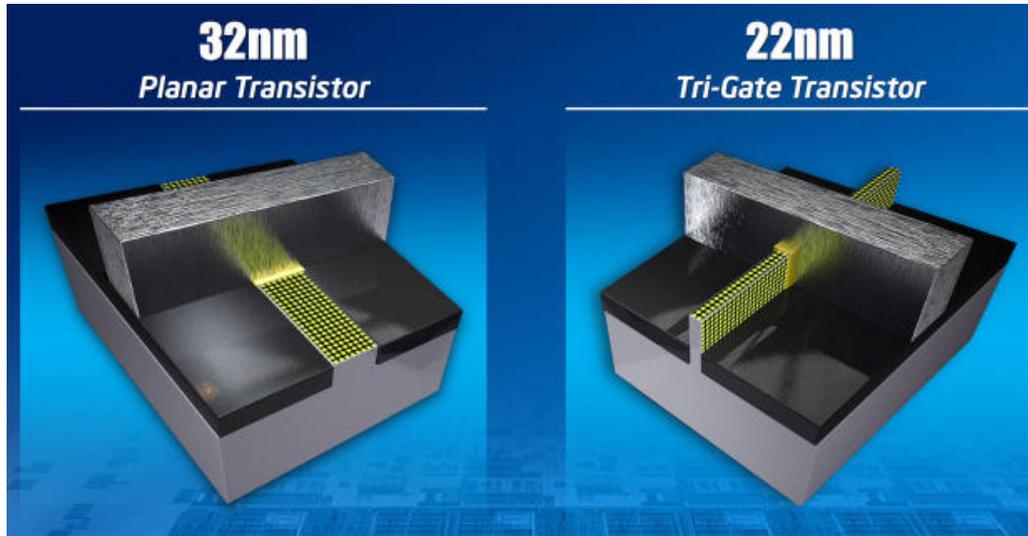
Intel 486

- IC digitali (microprocessori, microcontrollori, memorie, FPGA)
- IC analogici (amplificatori, mixers, trasmettitori/ricevitori, filtri)
- Mixed signals, convertitori

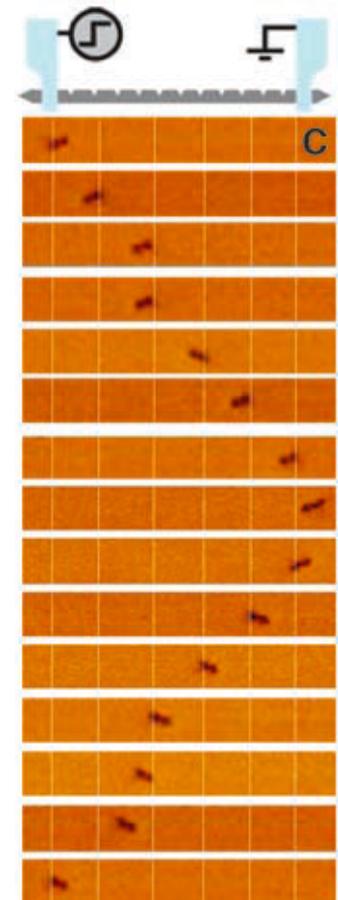
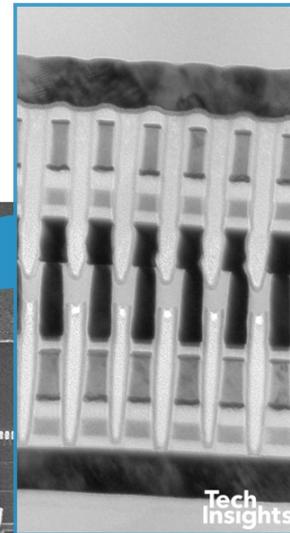
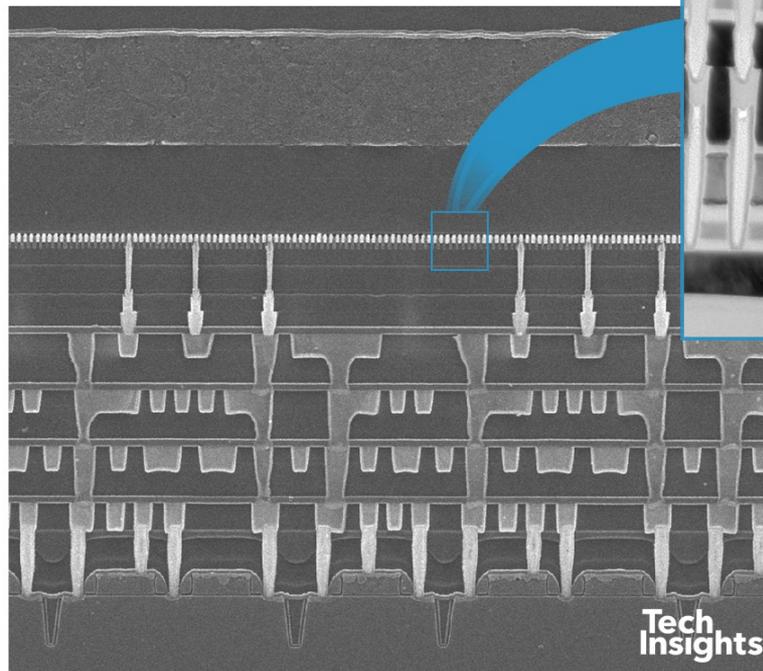
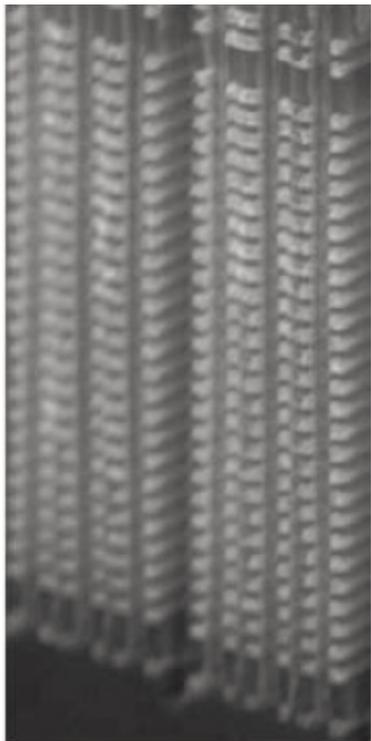
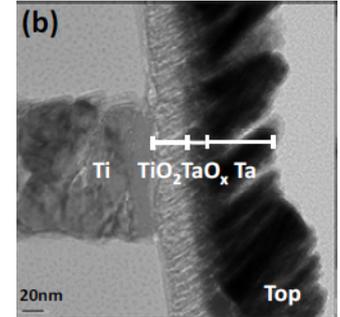
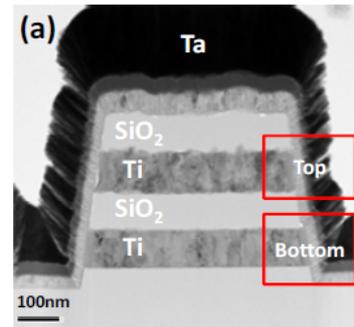
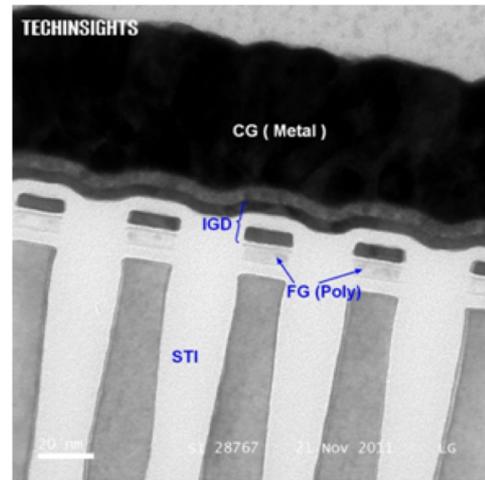
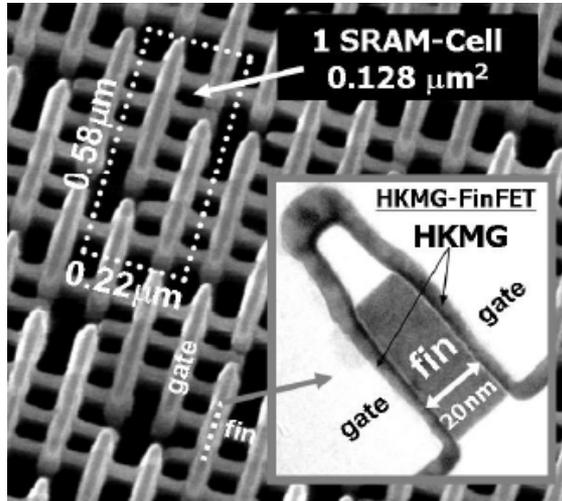


IC in package
(memoria flash)

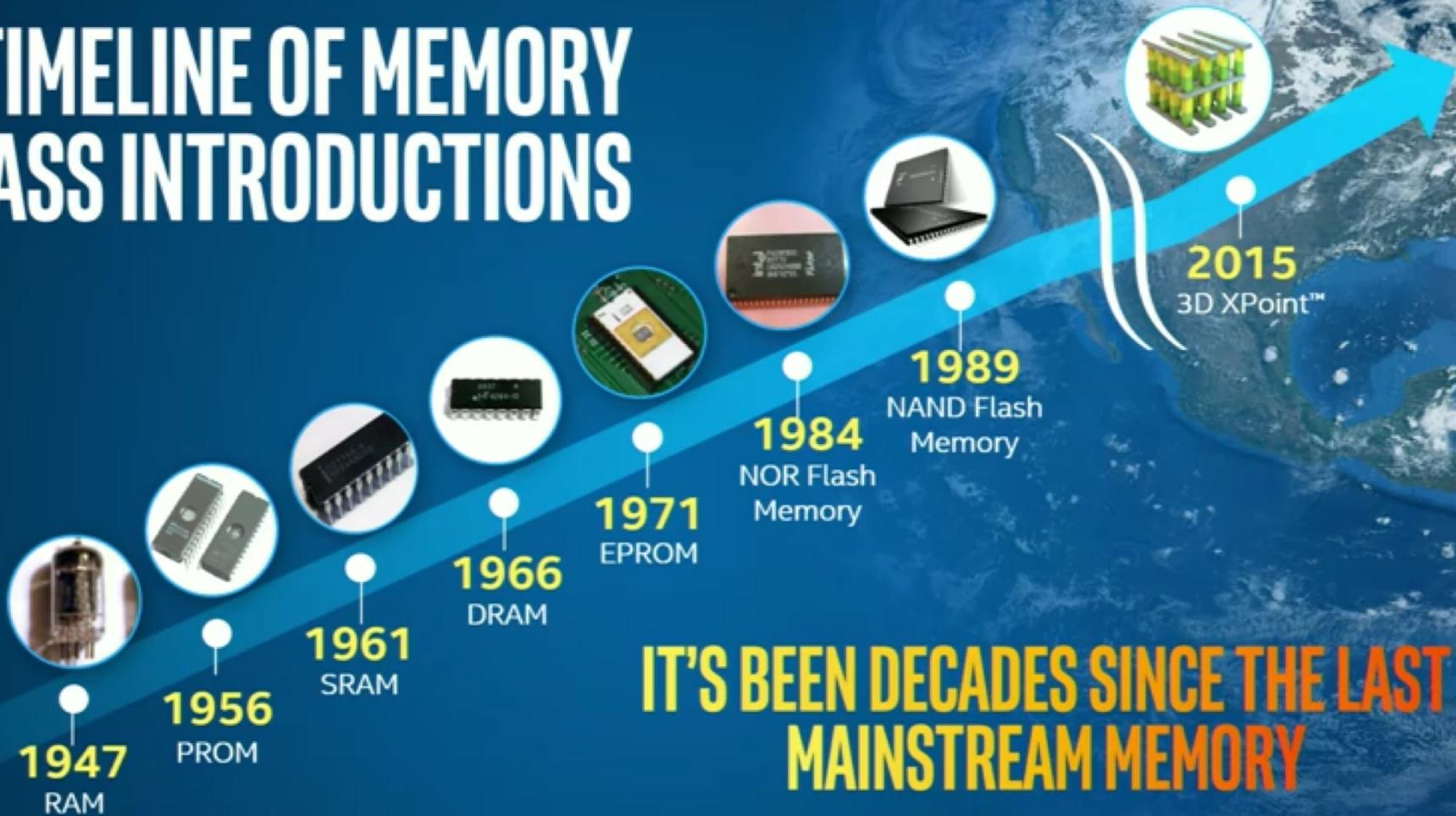
Dispositivi elettronici allo stato solido



Memory devices

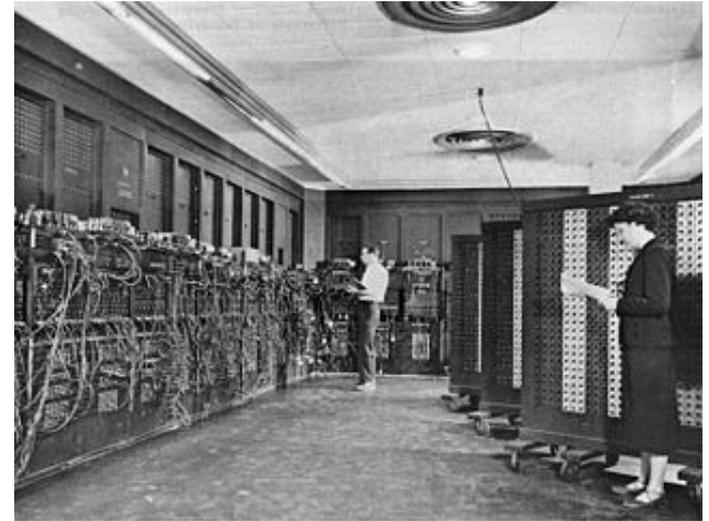


A TIMELINE OF MEMORY CLASS INTRODUCTIONS



Cosa non è stato solido?

- Prima dei dispositivi a stato solido, la computazione era mediante valvole: ENIAC (1946, Electronic Numerical Integrator And Computer) fu il primo computer da 30-ton, 18,000 valvole

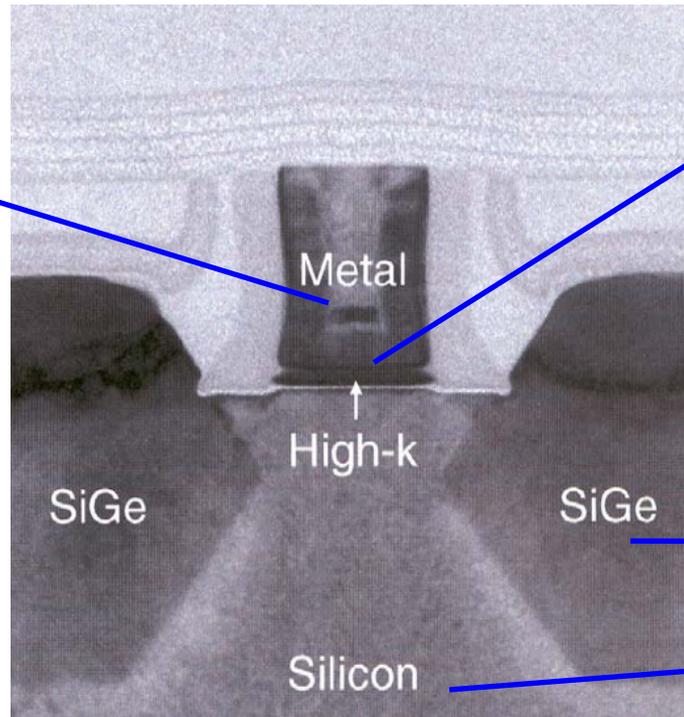


- L'immagazzinamento (storage) di dati su dischi/nastri magnetici, CD/DVD ottici



Materiali solidi in elettronica

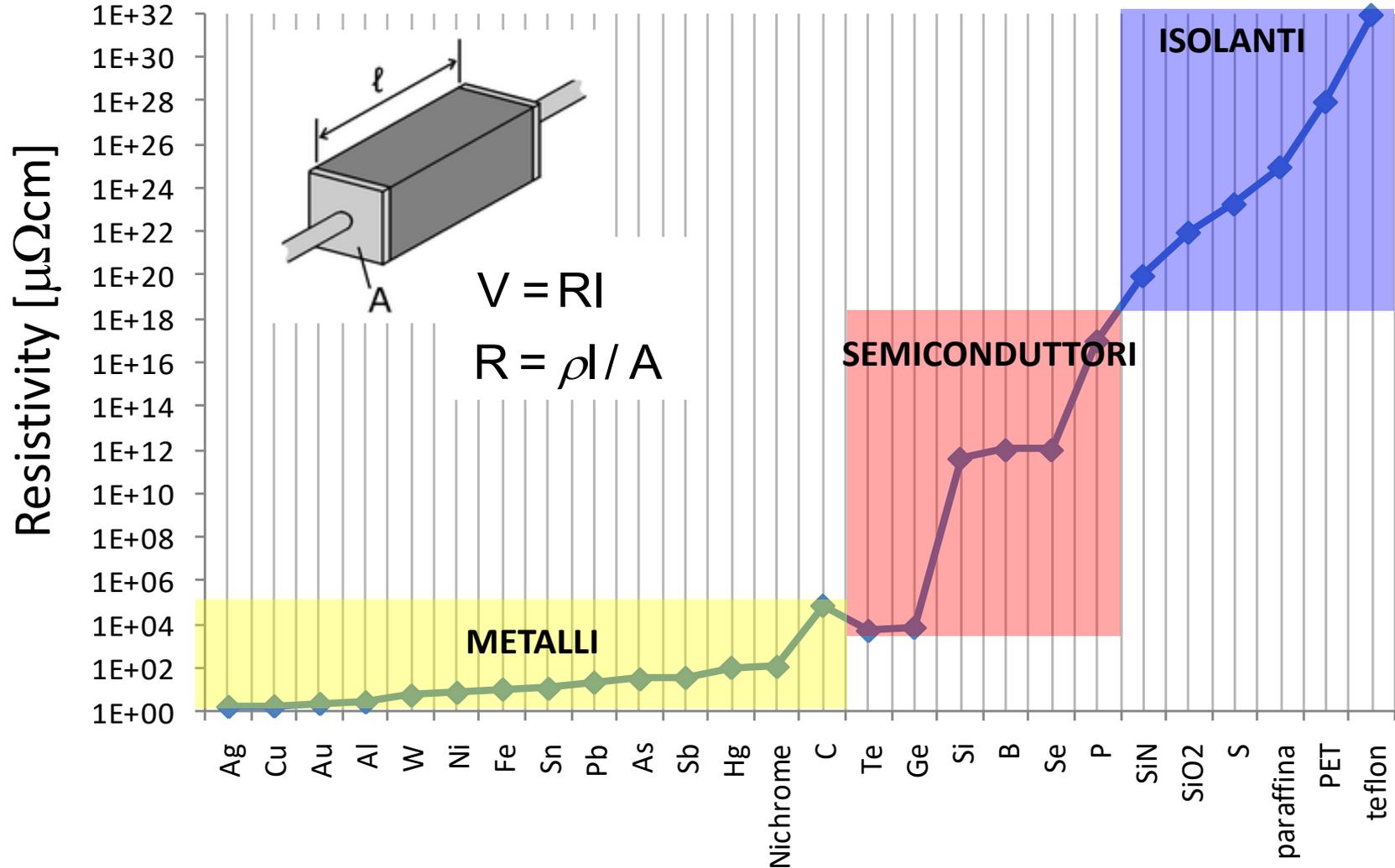
METALLI: Cu (interconnessioni), W (plug) e composti metallici come TaN, TiN, etc. per il gate (soprattutto se abbinati a high K)



ISOLANTI: SiO₂ (dielettrico di gate), SiN (spacer), dielettrici alternativi con alta costante dielettrica (high-K, isolanti di gate oltre il nodo 45 nm) o bassa costante dielettrica (low-K, interlayer dielectric)

SEMICONDUTTORI: Si, o semiconduttori alternativi (Ge, SiGe, composti III-V come GaAs, InGaAs)

Resistività elettrica



Spiegazione

- Resistività $\rho = (qn\mu_n)^{-1}$
- n = densità di portatori liberi carichi:
 - Metalli: abbondanza di portatori disponibili
 - Semiconduttori: pochi (controllabili) portatori
 - Isolanti: praticamente nessun portatore
- La disponibilità di portatori dipende dalle proprietà di legame del solido, dalle impurezze e dalle condizioni (temperatura, campo elettrico)

Tavola periodica

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Lr 103	Db 104	Jl 105	Rf 106	Bh 107	Hn 108	Mt 109									

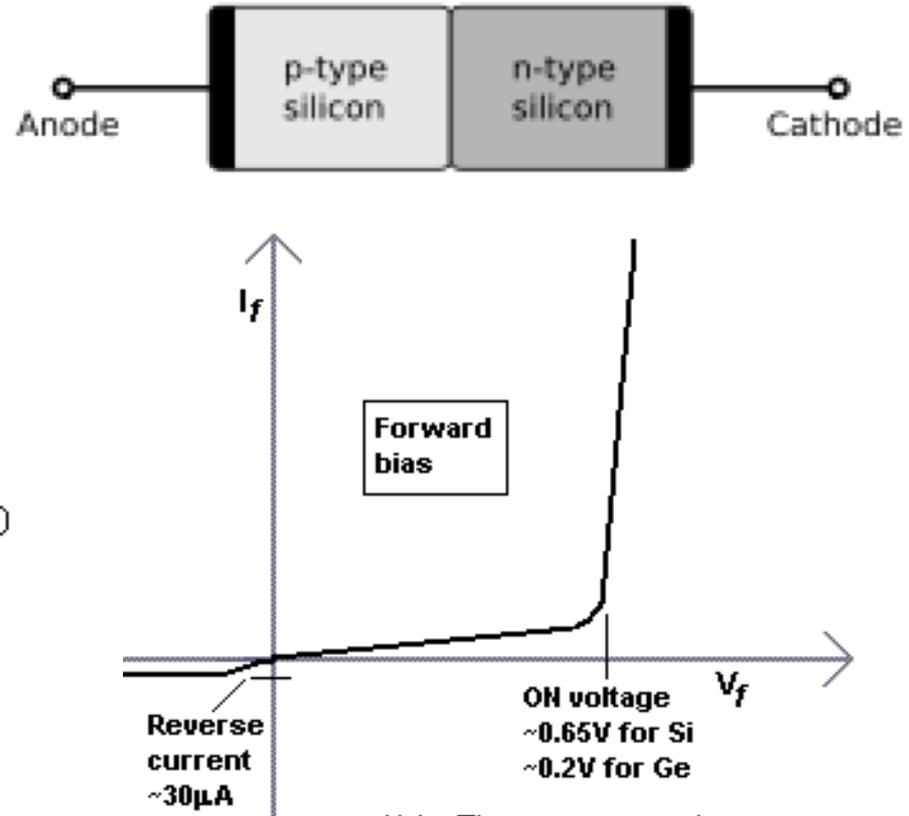
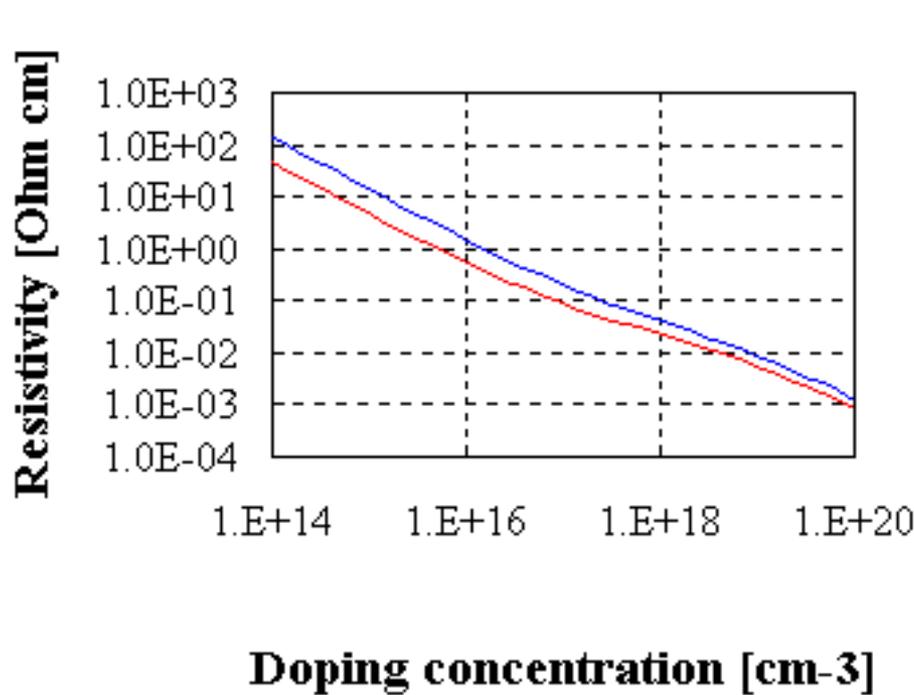
<http://facstaff.gpc.edu/~pgore/PhysicalScience/Periodic-table.html>

- Numero di elettroni nella shell esterna controlla il carattere del materiale → comportamento conduttivo o isolante a seconda di come gli elettroni sono condivisi nello stato solido

Applicazioni

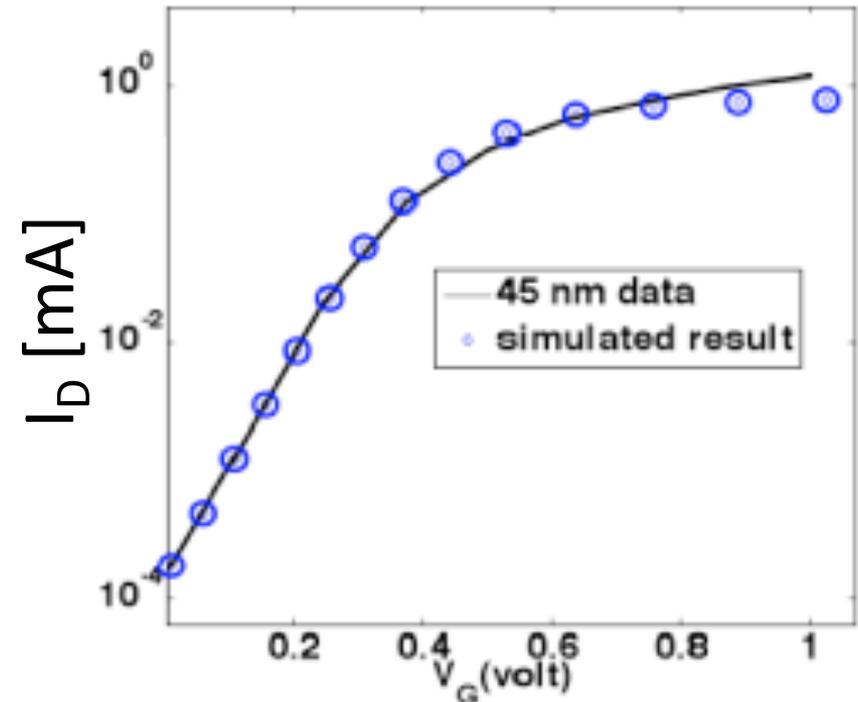
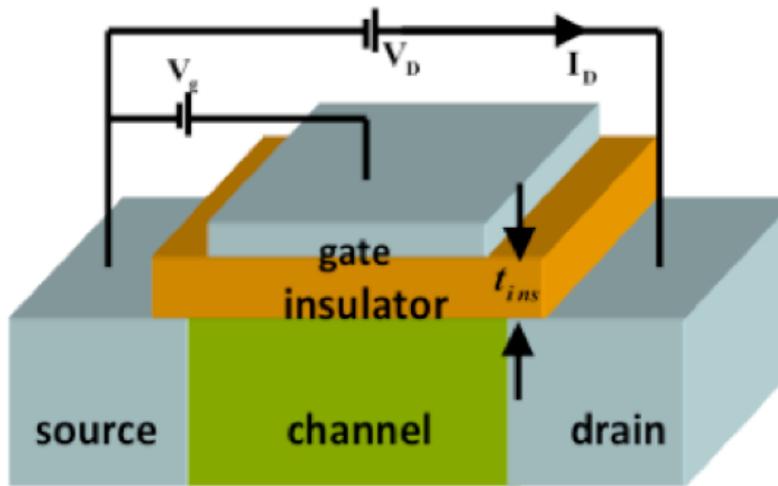
- Metalli = interconnessioni, elettrodi in condensatori (metal gate), induttori
- Isolanti = separazione tra connessioni e dielettrici in capacità (isolante di gate in MOSFET)
- Semiconduttori = materiali attivi. L'interesse nei semiconduttori va aldilà della resistività intermedia (semplice applicazione come resistore), e precisamente nella possibilità di controllare la resistività mediante:
 - drogaggio chimico
 - campo elettrico (effetto di inversione)

Drogaggio nei semiconduttori



Il diodo e il transistor a giunzione bipolare (BJT) sono basati sul drogaggio alternato di semiconduttori

Inversione in semiconduttori



Una regione di silicio p può diventare di tipo n mediante l'applicazione di un campo verticale → effetto del transistor MOS

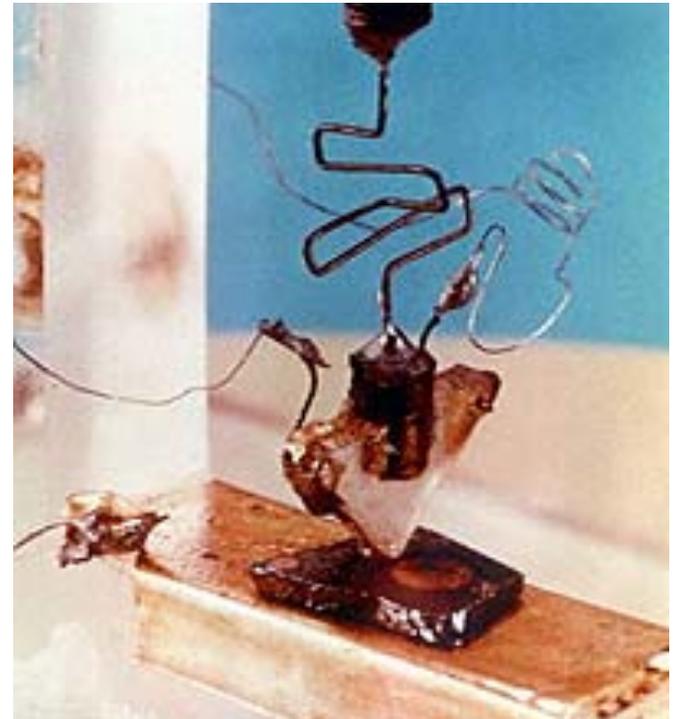
Applicazione = switch (digitale) o generatore di corrente comandato da tensione (analogico)

Outline

- Informazioni sul corso
- Introduzione all'elettronica dello stato solido
- Breve storia della microelettronica
- Conclusioni

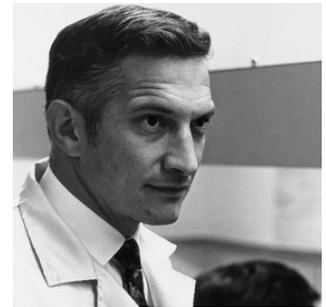
1947: il primo transistor

- Dicembre 1947: Shockley, Brattain e Bardeen sviluppano un transistor a contatto di punto usando Ge
- Nobel nel 1956
- Il transistor mostra per la prima volta amplificazione analogica



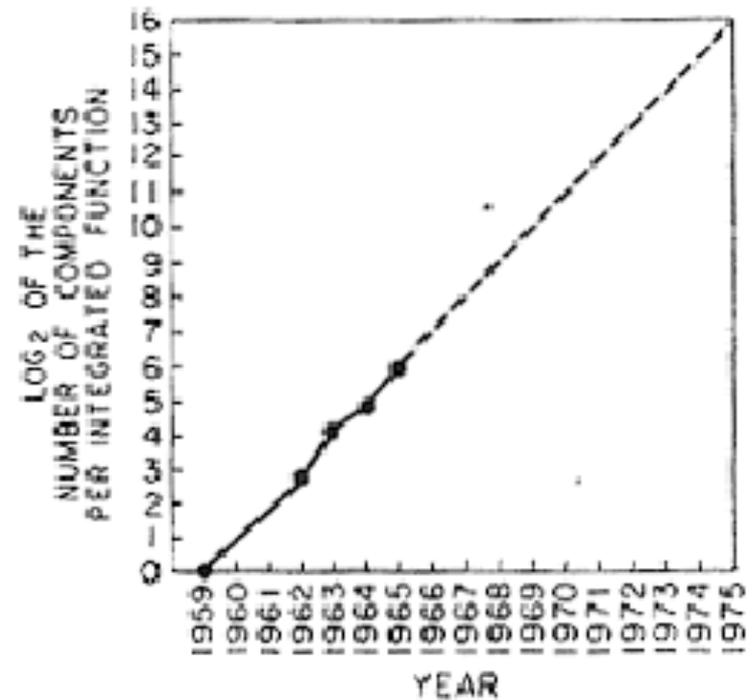
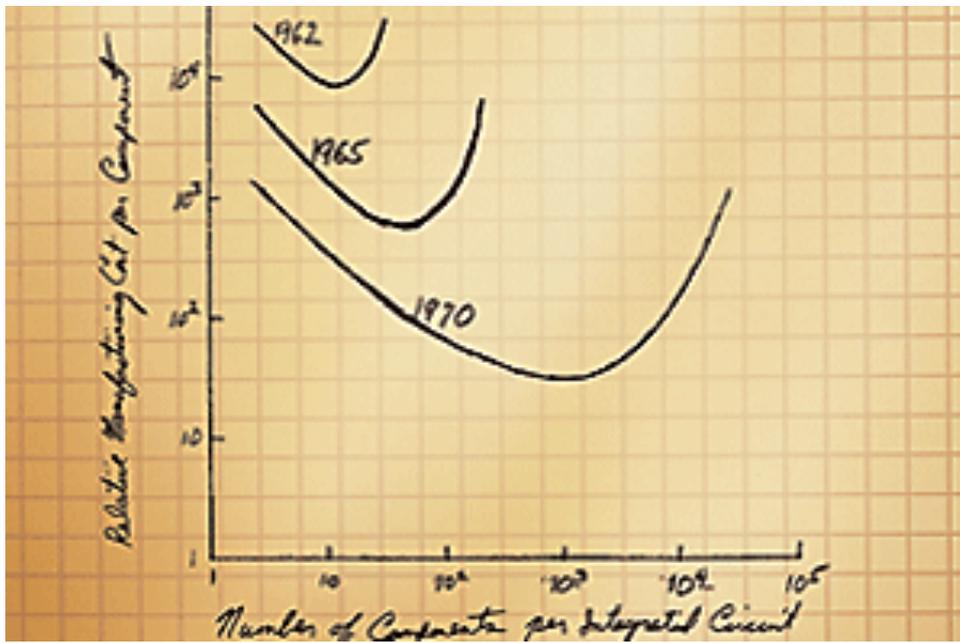
1958: primo circuito integrato (IC)

- 1958: J. Kilby (Texas Instruments) inventa una tecnica per integrare tutti i dispositivi (transistor, R, C) in un solo cristallo di Ge
- Più tardi R. Noyce (Fairchild) migliora l'idea integrando anche le interconnessioni, preparando la strada per la tecnologia di circuiti integrati ad alta densità (ultra-large-scale integration, ULSI)
- 2000: Premio Nobel a Kilby per la sua invenzione



1965: legge di Moore

- Dopo appena 4 anni dal primo IC commerciale, Moore osserva che il numero di transistori integrati raddoppia ogni 12 mesi
- Nel 1975 la corregge (ogni 18 mesi)

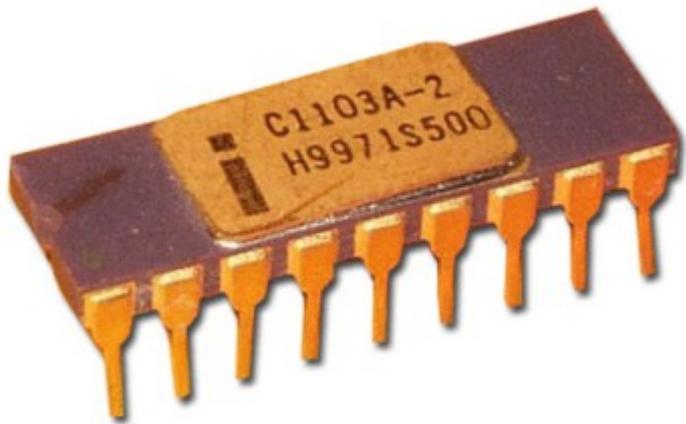


Legge di Moore



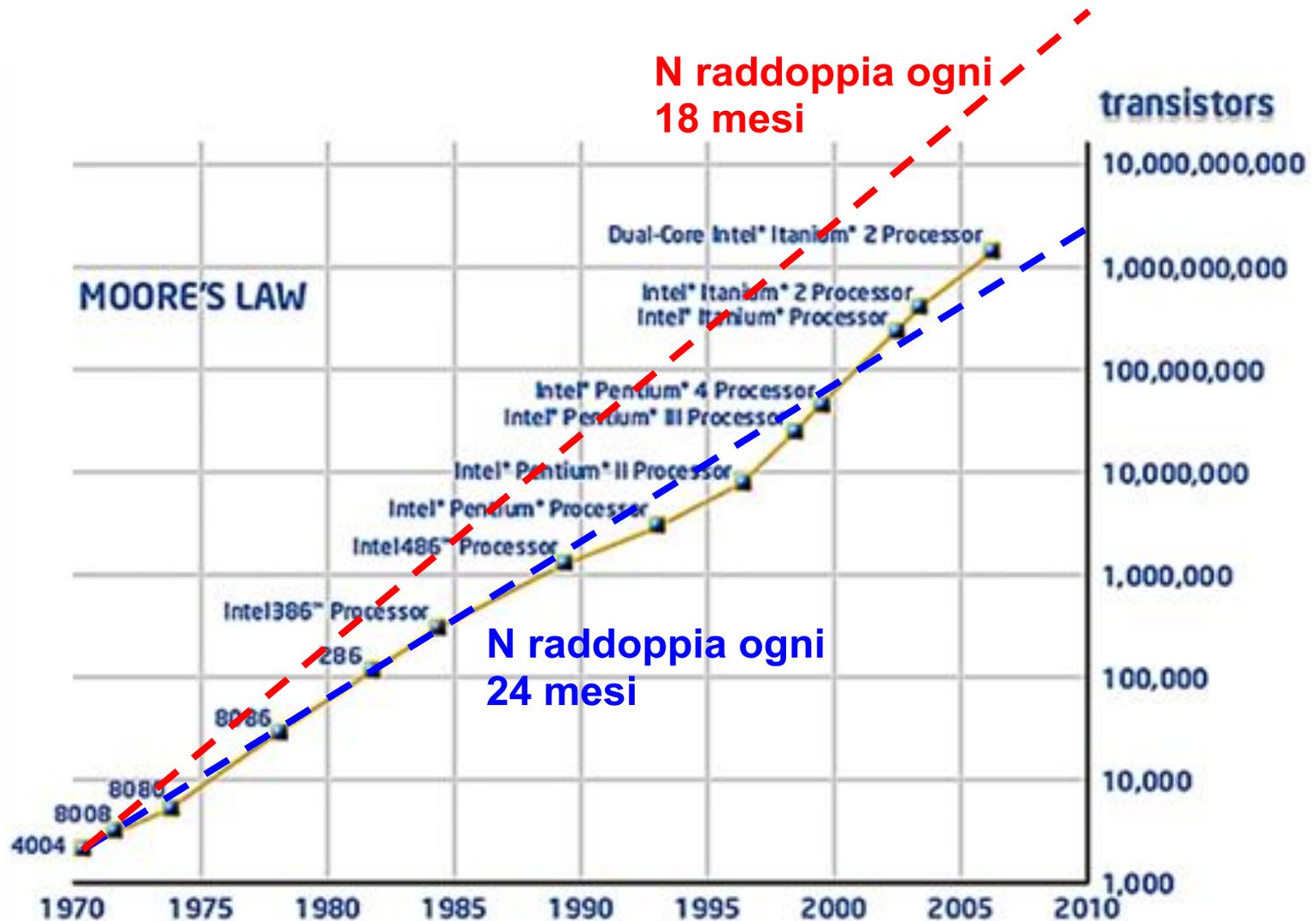
An [Osborne Executive](#) portable computer, from 1982, and an [iPhone](#), released 2007 (iPhone 3G in picture). The Executive weighs 100 times as much, has nearly 500 times the volume, cost 10 times as much, and has a 100th the [clock frequency](#) of the iPhone

Scaling

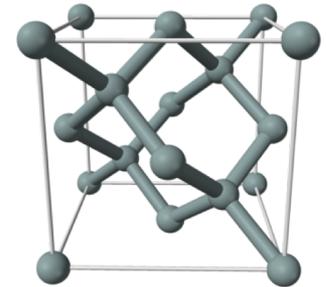
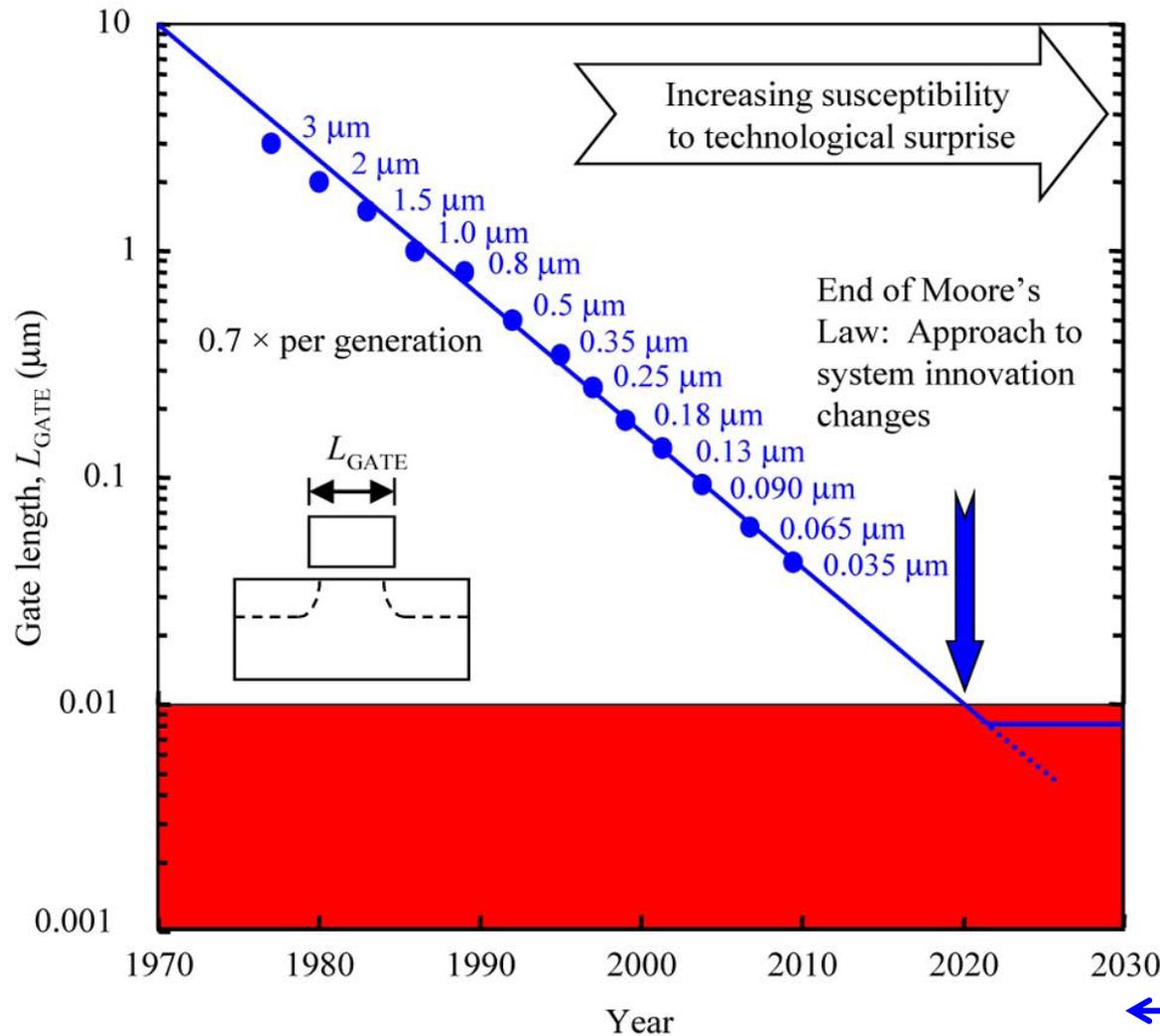


- 1971: C1103 1kb DRAM (Intel) costava 20\$
- 2014: 4GB SDRAM costava 20\$ (sarebbe costata 600 M\$ nel 1971)

Numero di transistori nella CPU

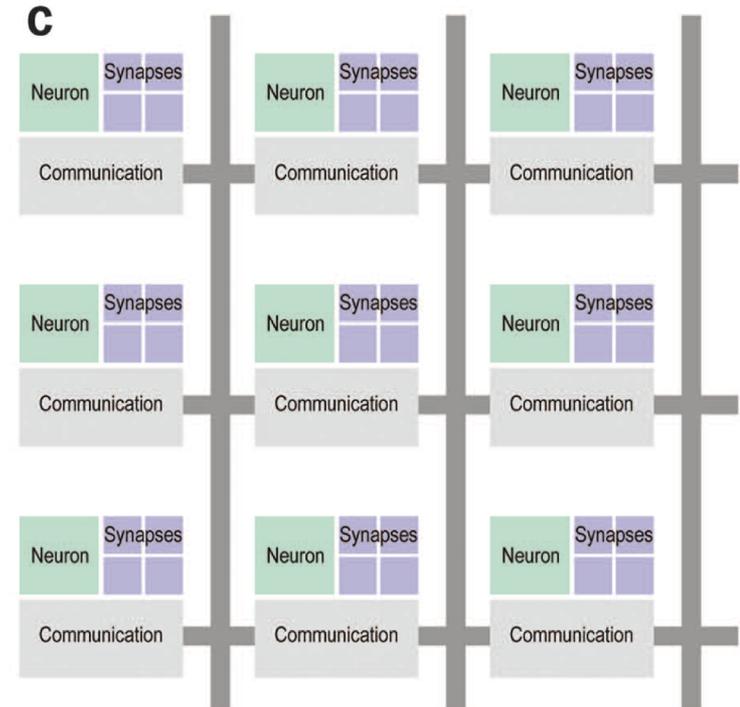
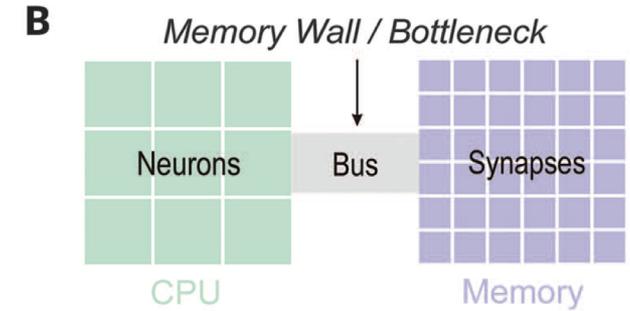
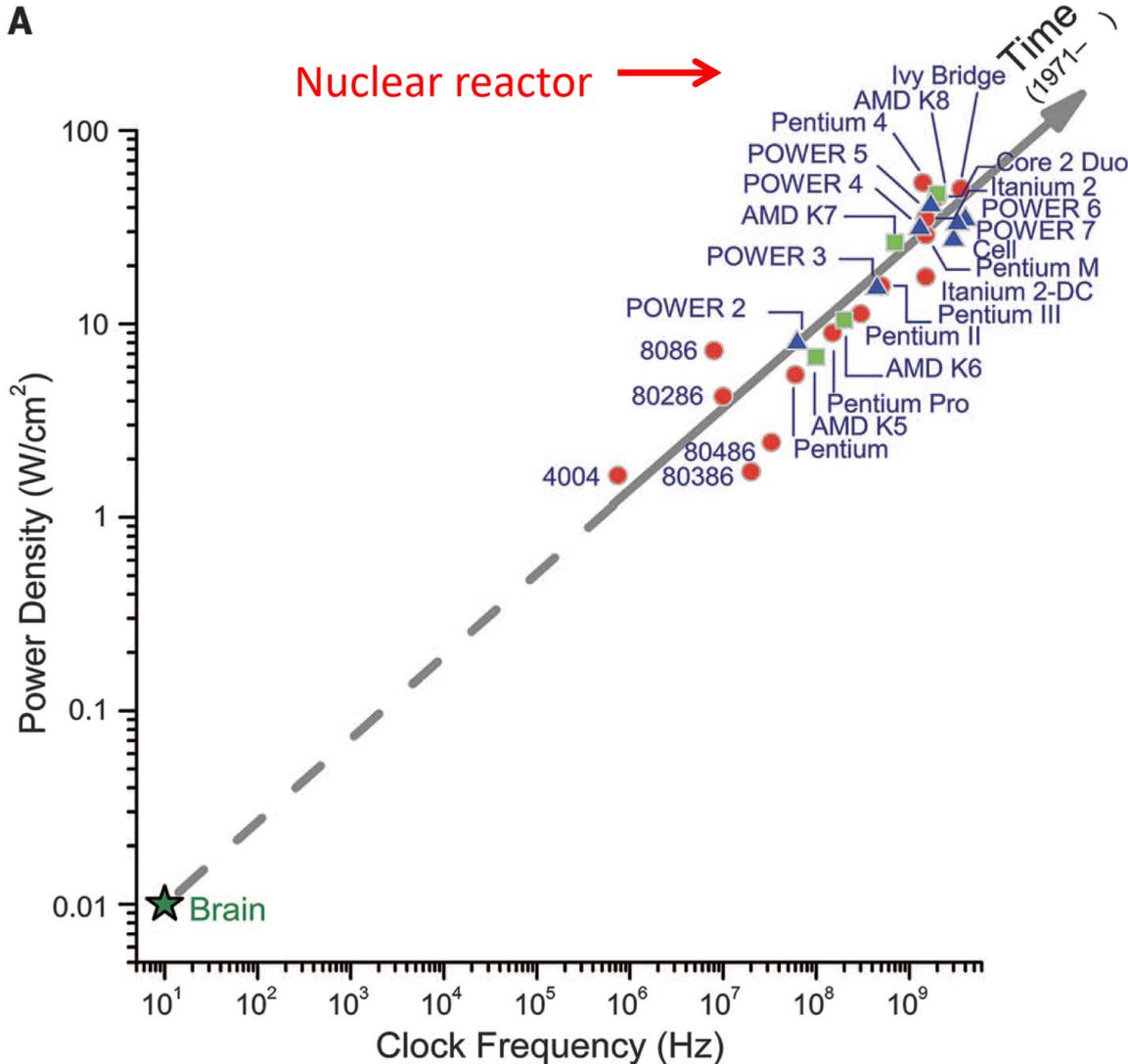


Limiti della legge di Moore

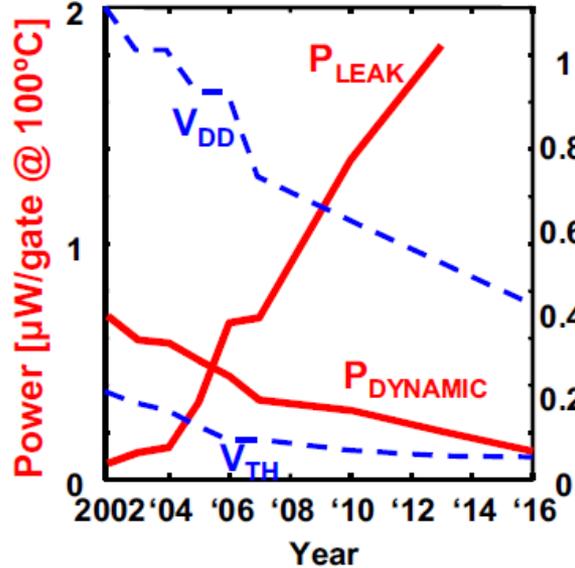
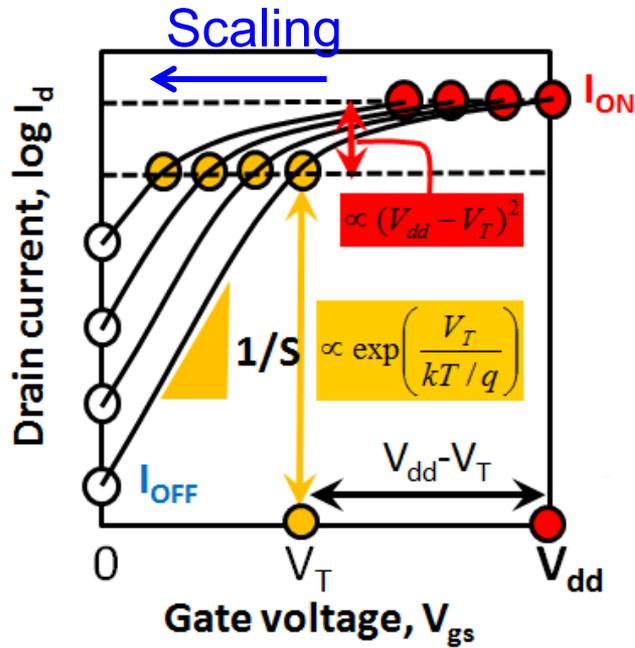


$a = 0.54 \text{ nm}$

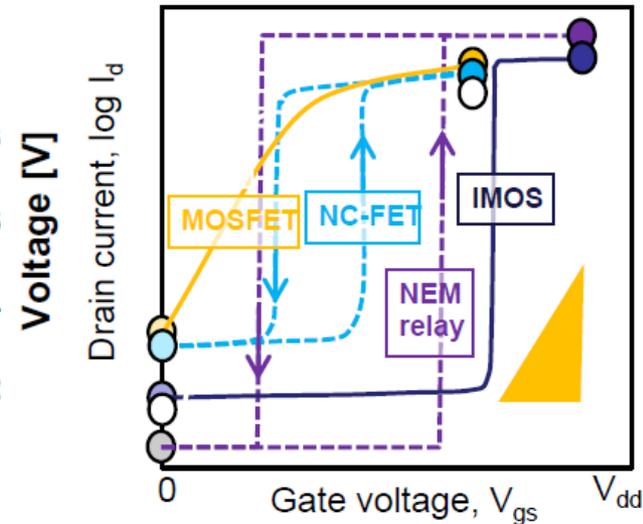
Power wall and memory wall



Off-state power



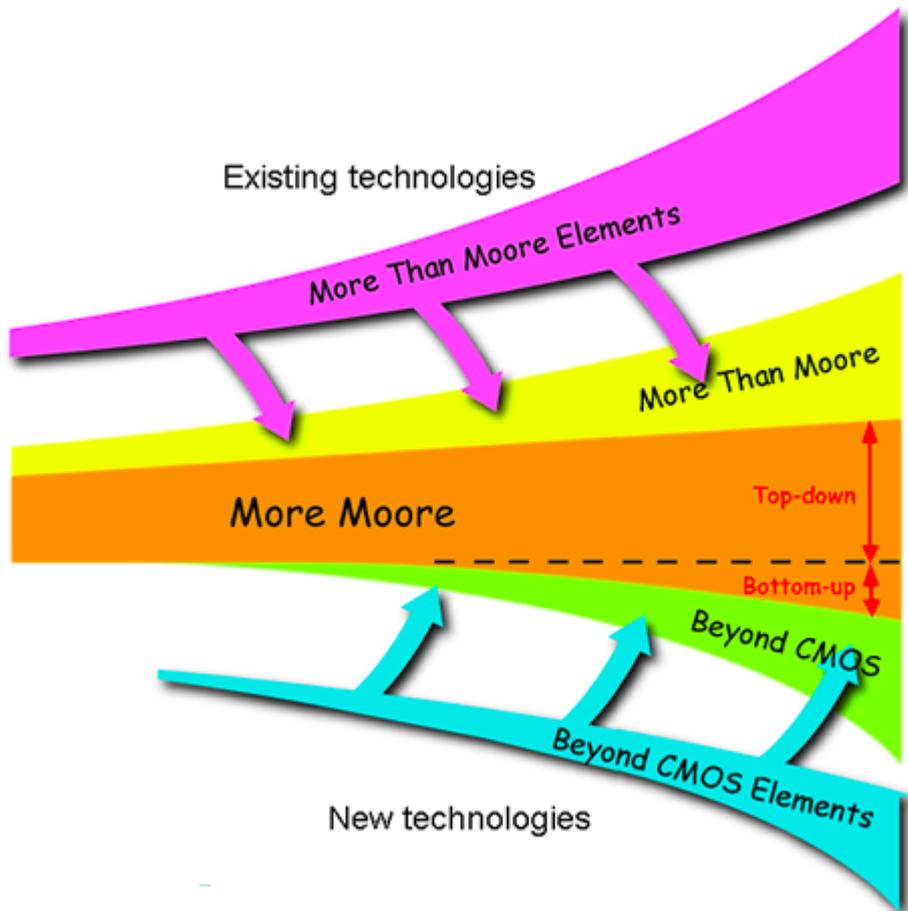
T. Sakurai, ISSCC 2003



A. Ionescu, 2011

- Dynamic power $P_{on} = fCV_{DD}^2 \rightarrow$ need for V_{DD} scaling, but reducing V_{DD} causes an increase of I_{off}
- Two approaches to reduce OFF-leakage power:
 - Steep subthreshold (TFET, IMOS, NEMS, NGFET)
 - Normally-off logic through NVM (spintronic, memristor)

Scaling = materiali e design

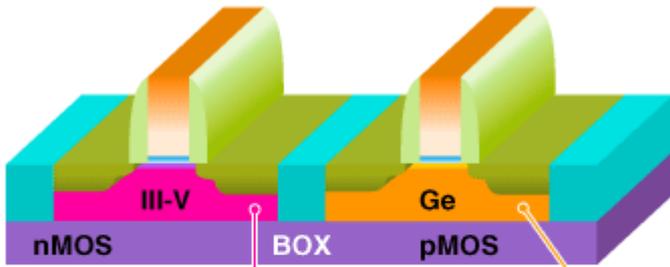
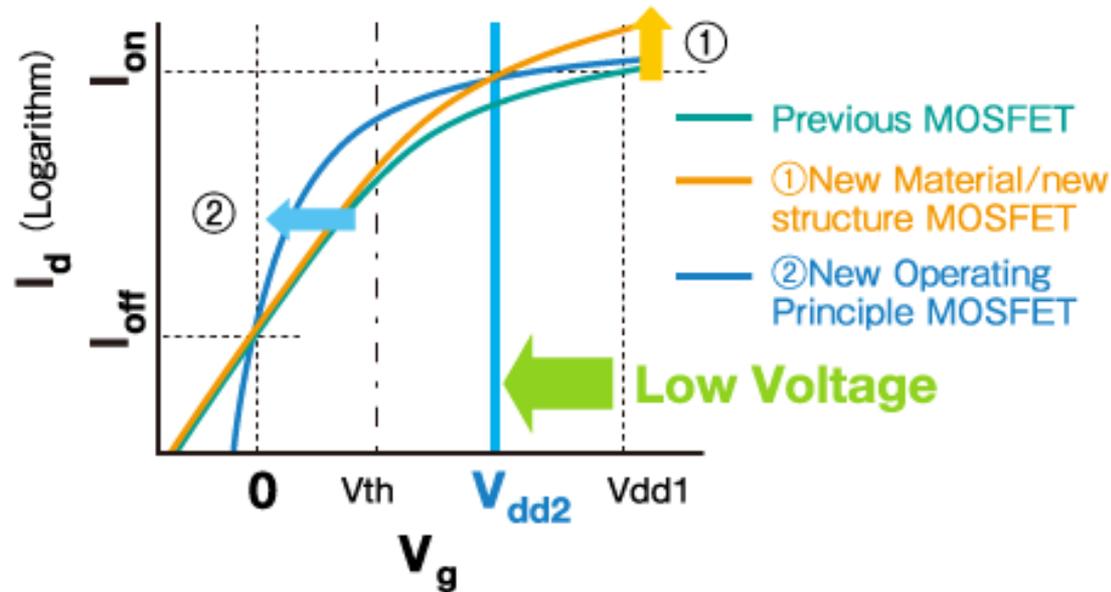


III-V semiconductors

Tunnel FET

2D semiconductors

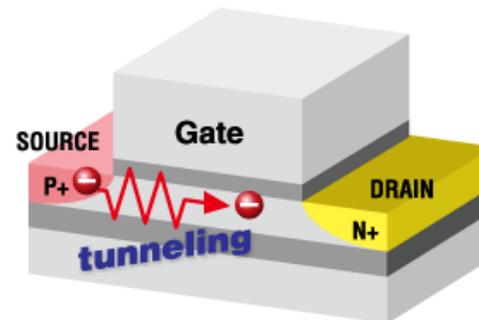
Strategie more-Moore



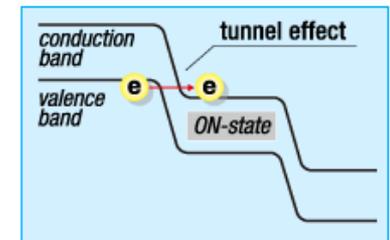
Material	Si	InAs	Ge
Electron mobility (cm ² /Vs)	1,600	40,000	3,900
Hole mobility (cm ² /Vs)	430	500	1,900

Existing channel material

(1) New materials

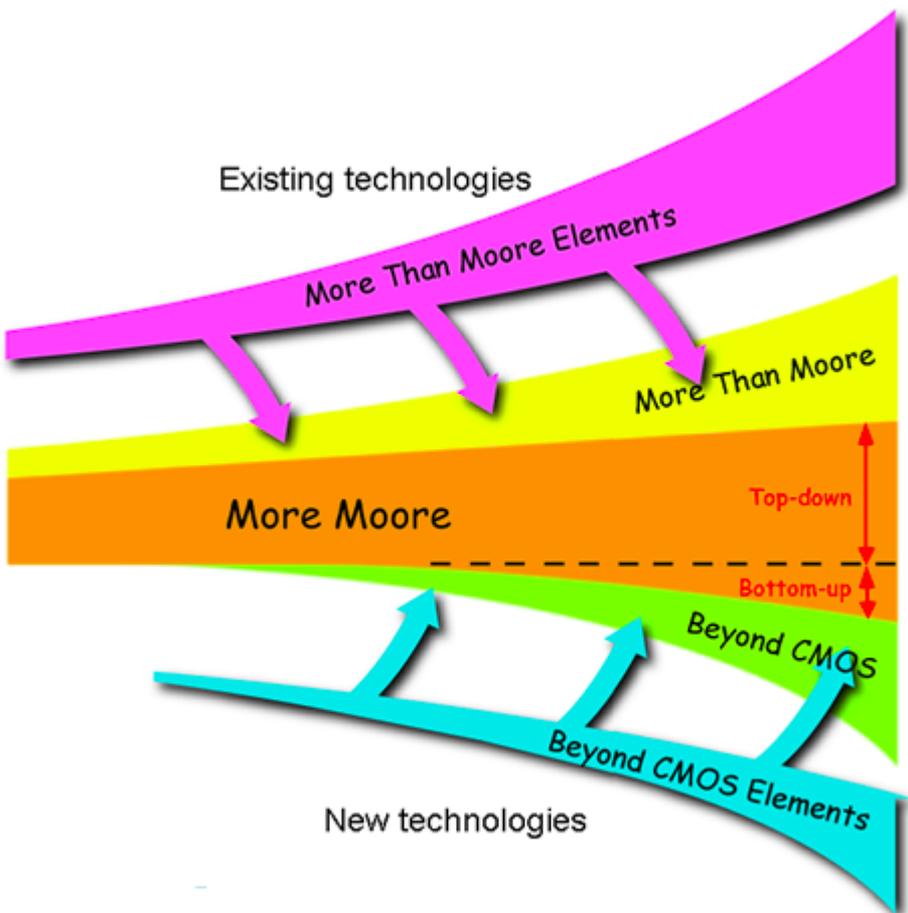


Step Slope CMOS Device



(2) New architectures

Oltre la legge di Moore



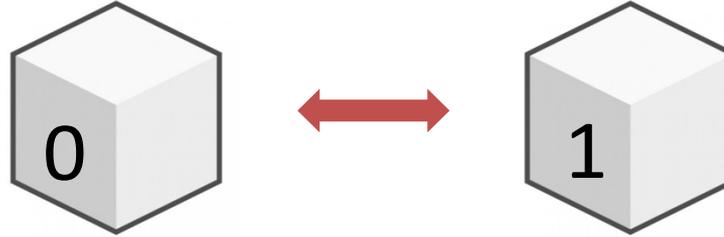
MEMS **RF CMOS** **Image sensors**

III-V semiconductors **Tunnel FET** **2D semiconductors**

Spintronics **Quantum computing** **Memristor**

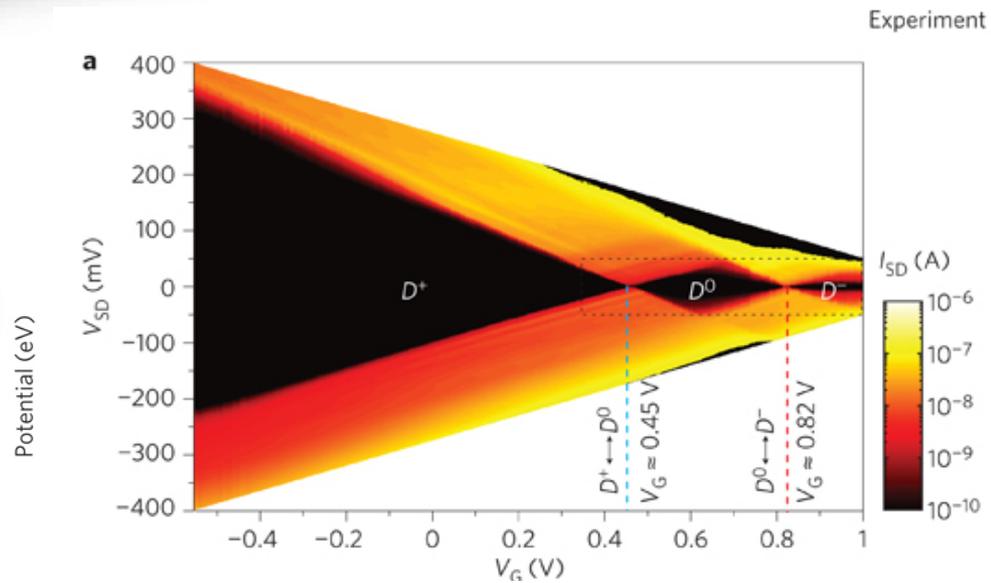
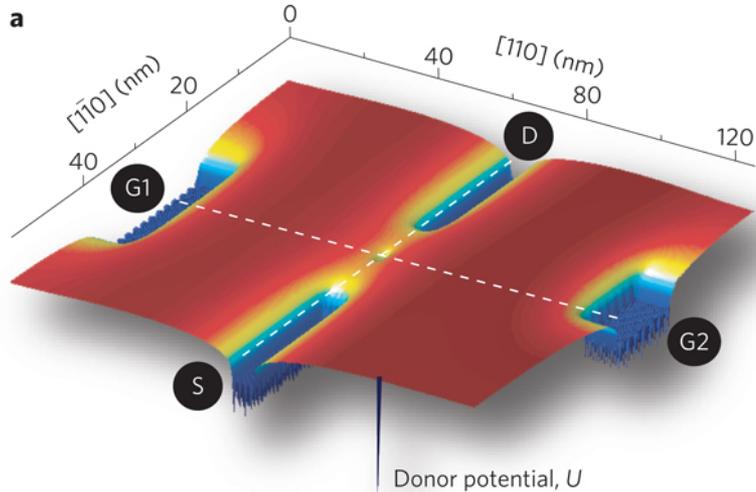
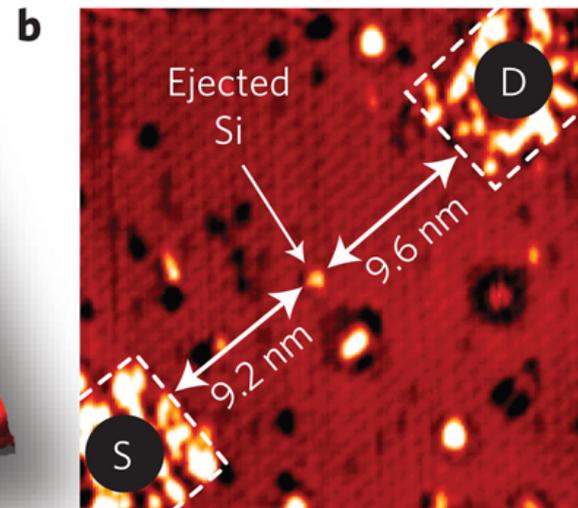
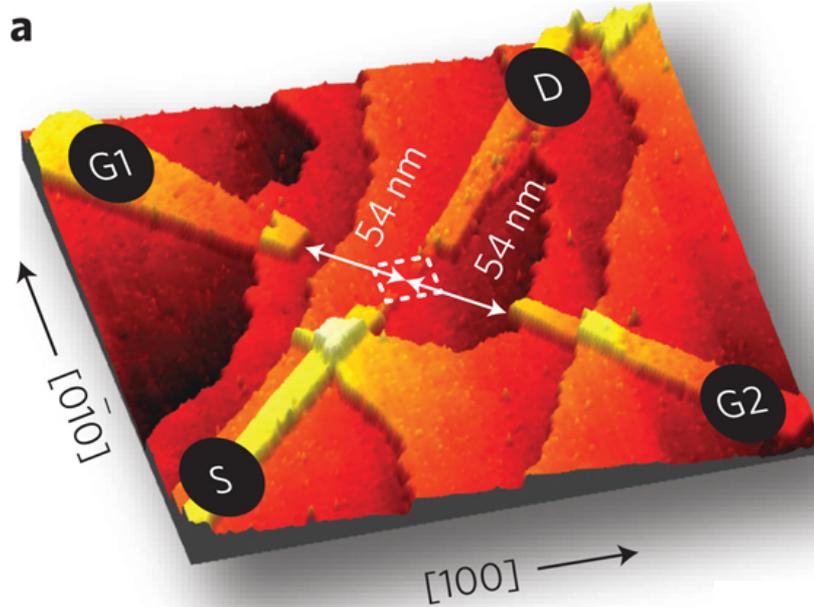
Classical bit and quantum bit

- Classical bit: elemental piece of information for Boolean logic. A bit can be in either of 2 states, 0 or 1

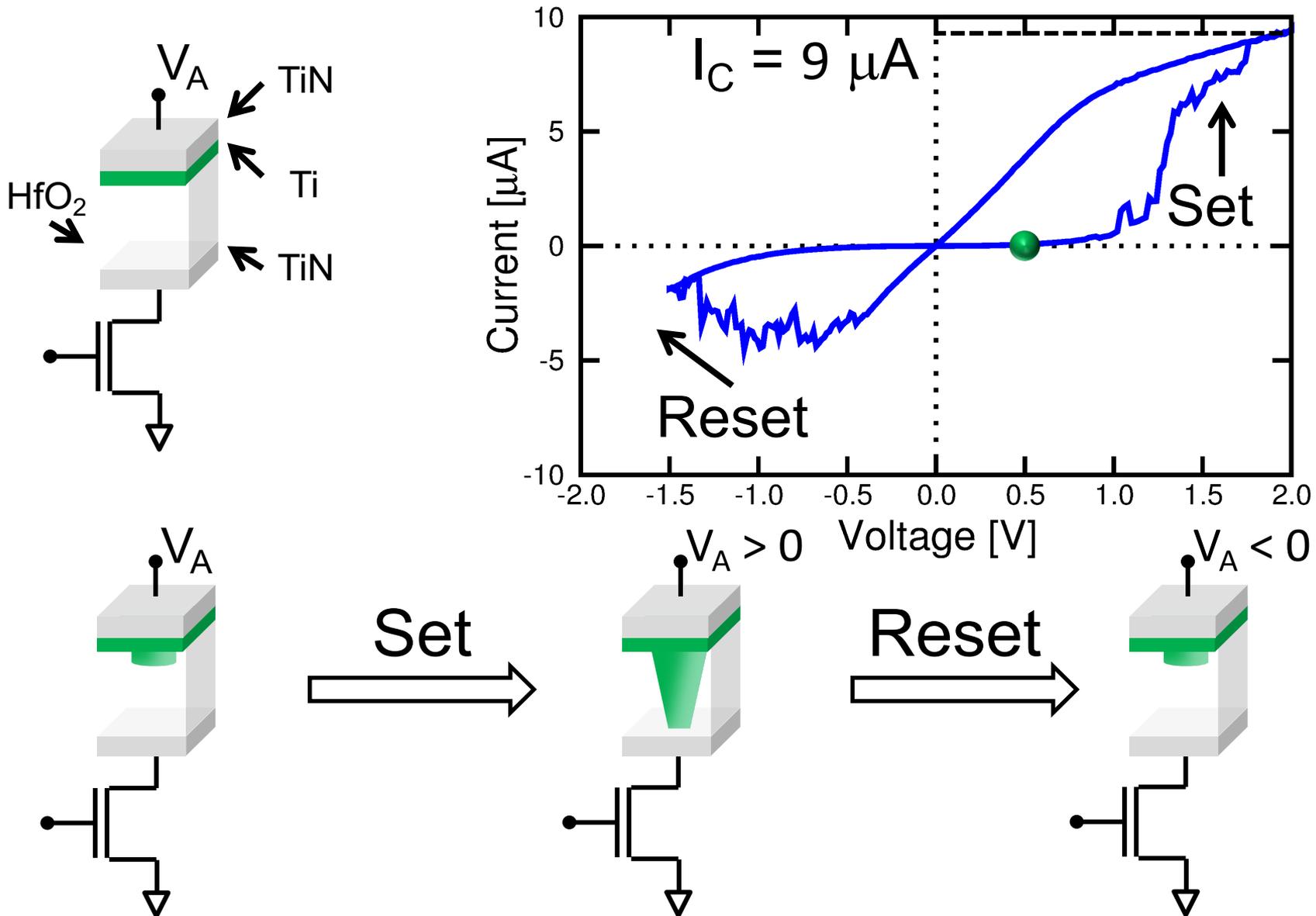


- Quantum bit, or qubit: elemental piece of information $|\psi\rangle$ in quantum computing (QC). It can be in:
 - *basis* state $|0\rangle$ or $|1\rangle$,
 - *pure* state = superposition of basis states $|0\rangle$ and $|1\rangle$
$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$
- α, β = complex numbers
- $|\psi\rangle$ = ket in Dirac notation
- The number of variables described by n qubits is 2^n
- Complexity is reduced exponentially by QC

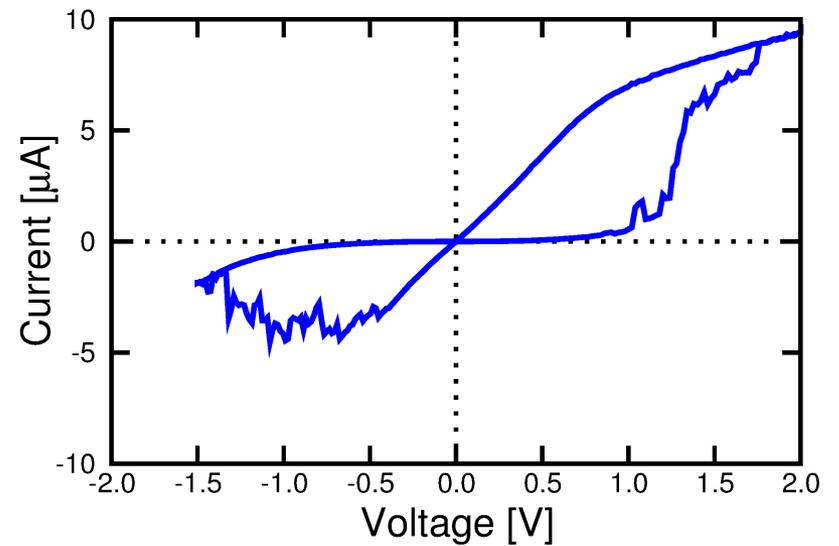
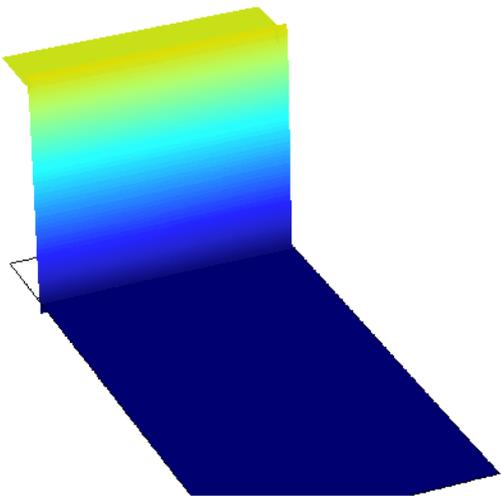
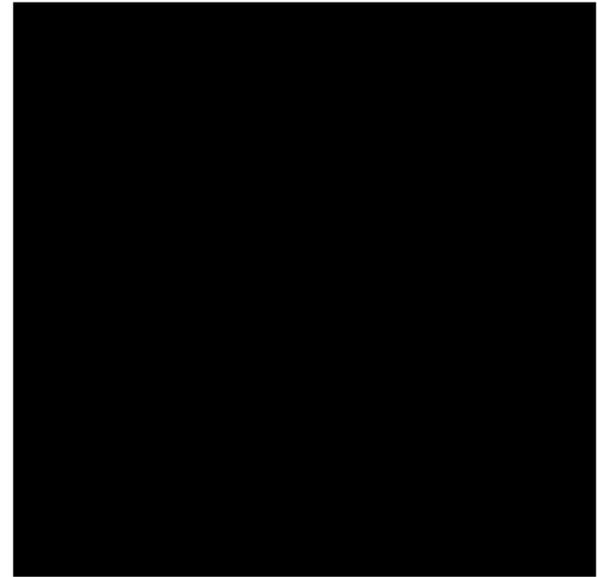
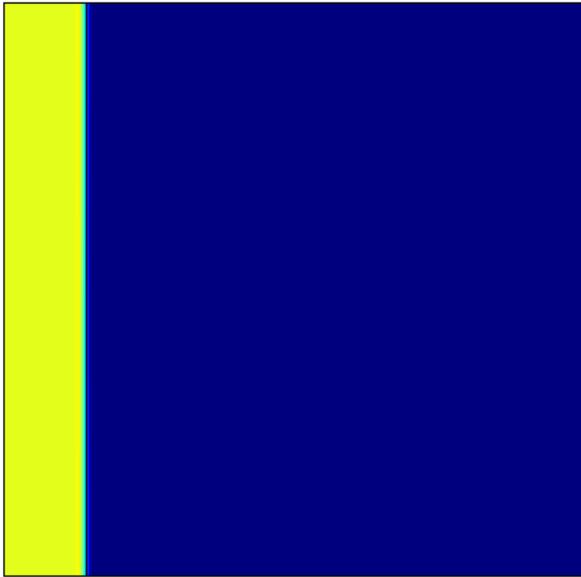
Single-atom transistor



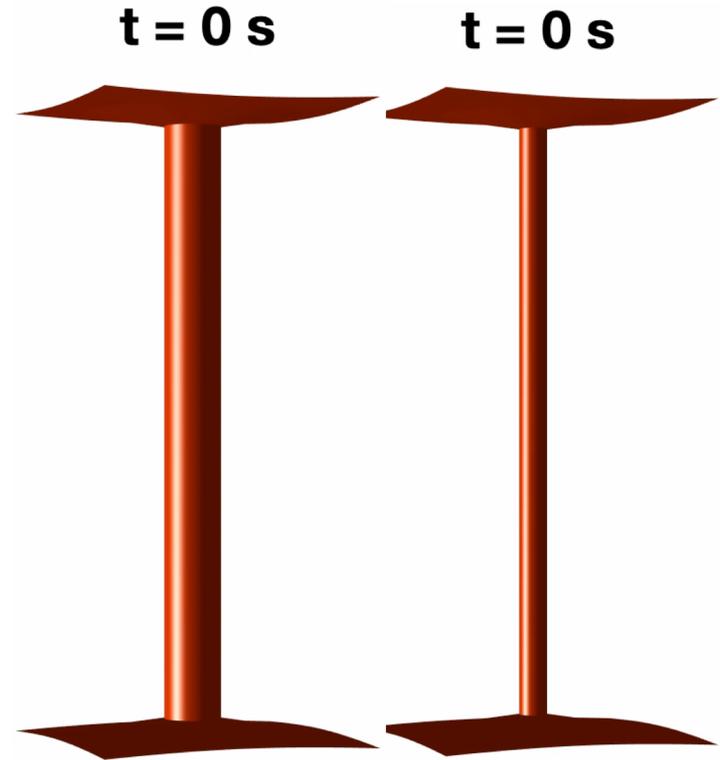
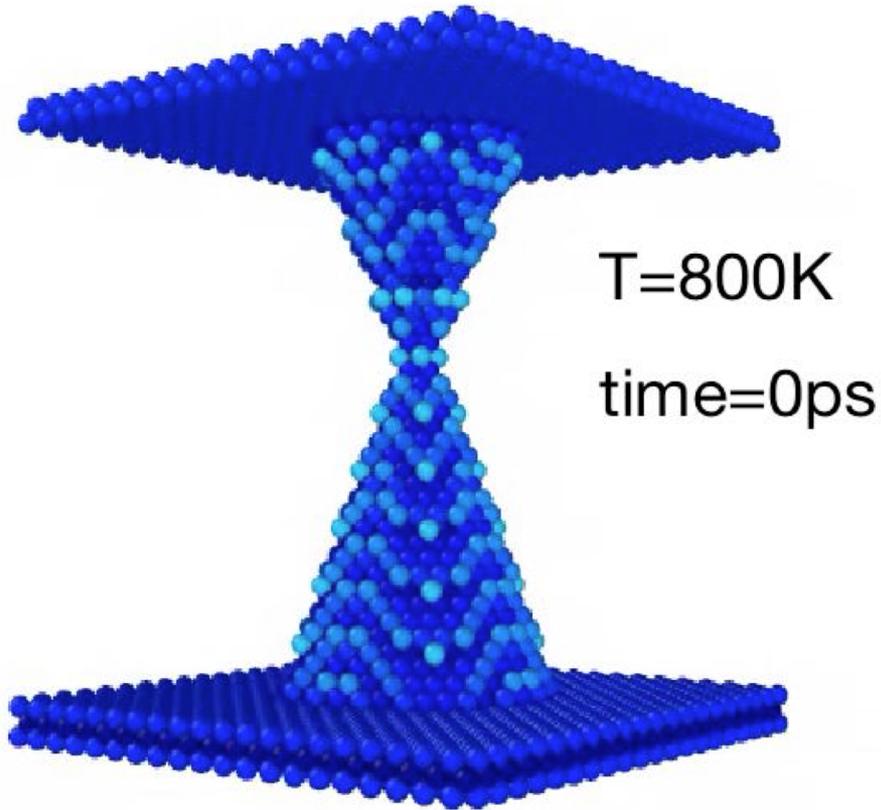
Beyond CMOS: il memristor



Modeling ion migration



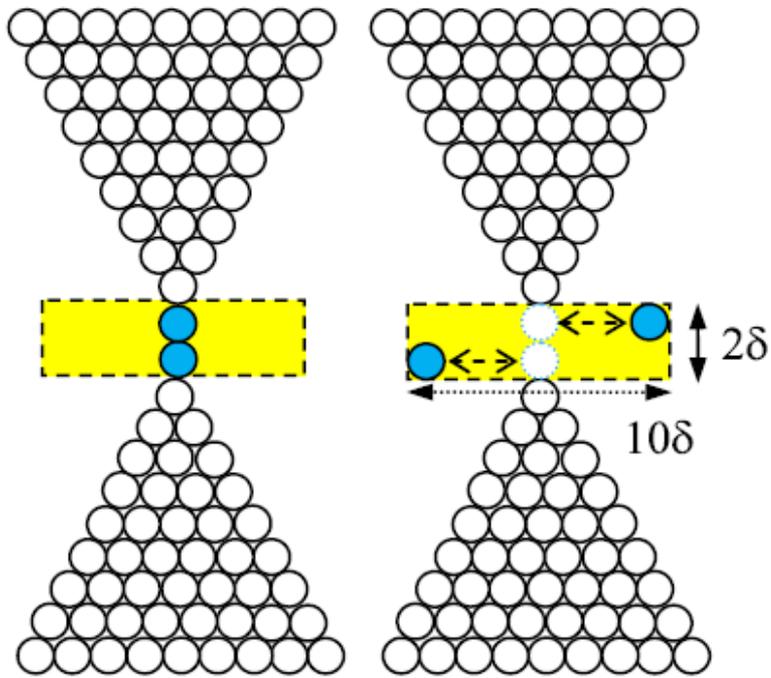
Modeling surface diffusion



Molecular dynamics simulation tool: LAMMPS (<https://lammmps.sandia.gov/>)

W. Wang, et al., Nature Comm. 10:81 (2019)

Scaling del memristor



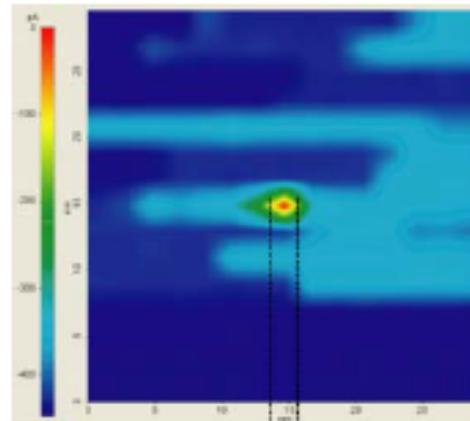
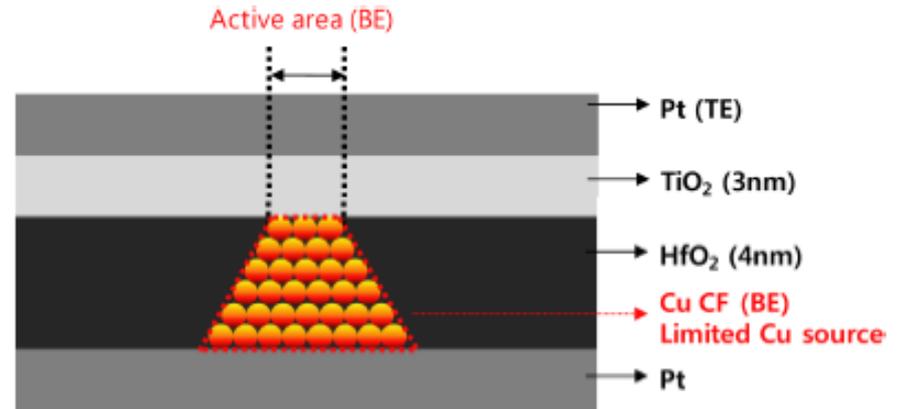
ON

$$\delta = 0.26 \text{ nm}$$

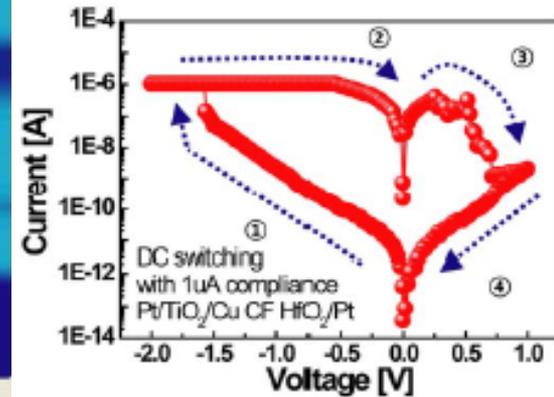
$$F = 10\delta = 2.6 \text{ nm}$$

OFF

V. V. Zhirnov, et al.,
Nanotech. 22 (2011)



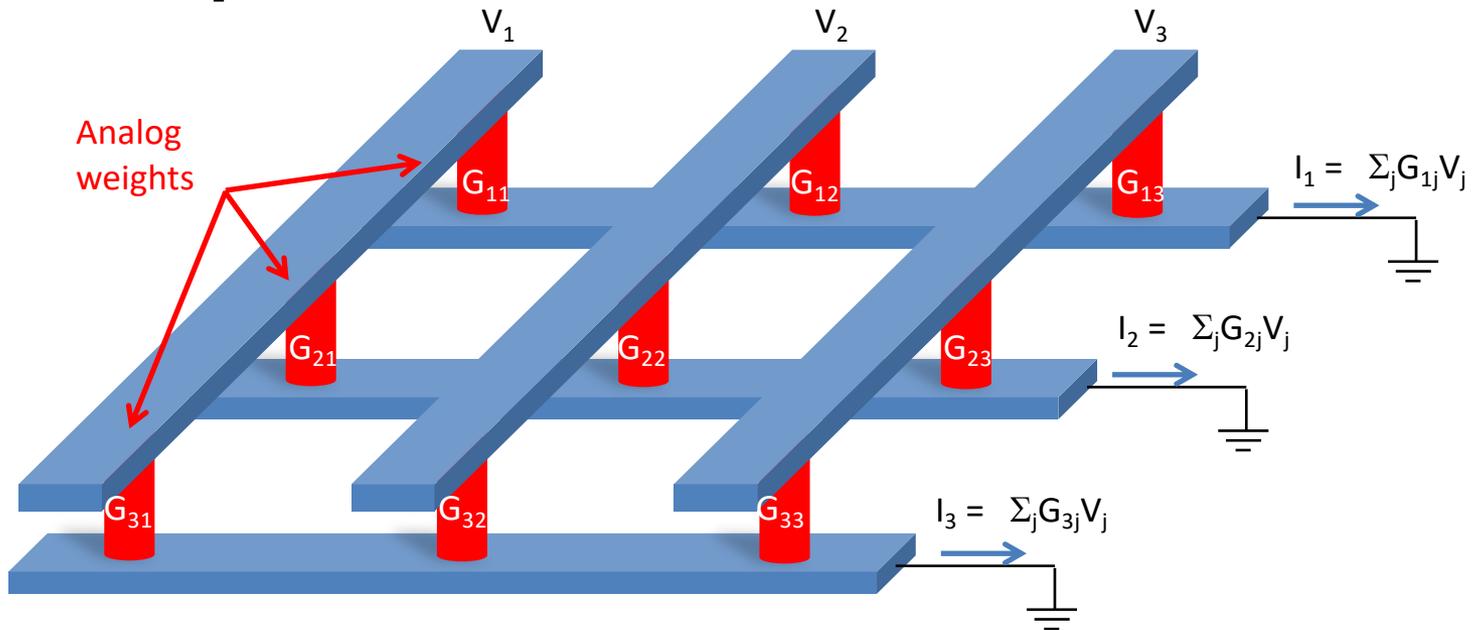
2~3nm



DC switching
with 1uA compliance
Pt/TiO₂/Cu CF HfO₂/Pt

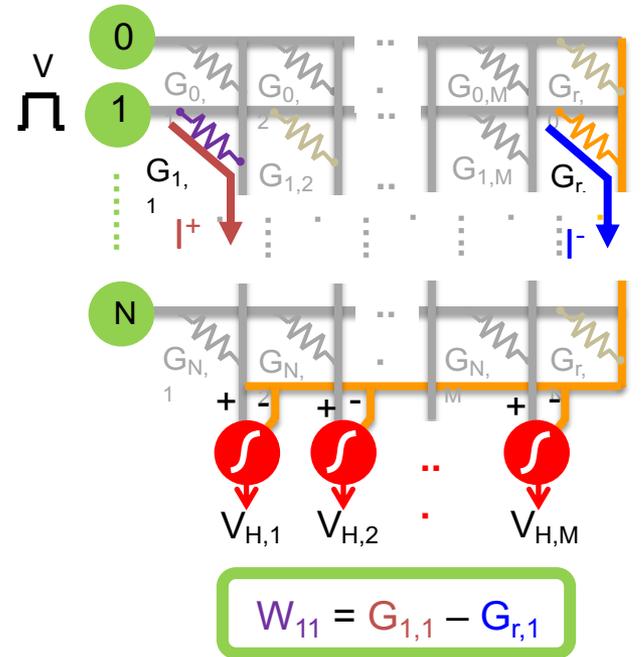
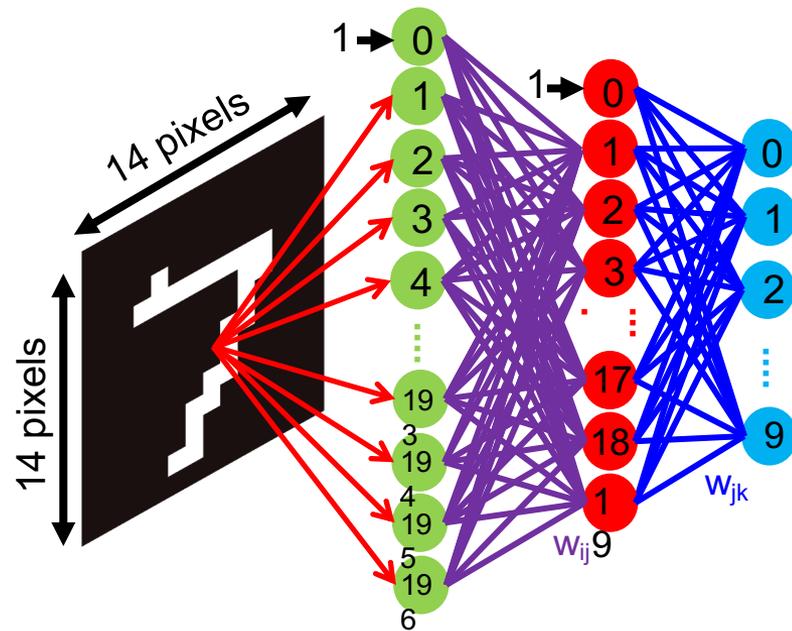
J. Park, et al.,
IEDM Tech. Dig. 63 (2011)

Moltiplicazione matrice-vettore



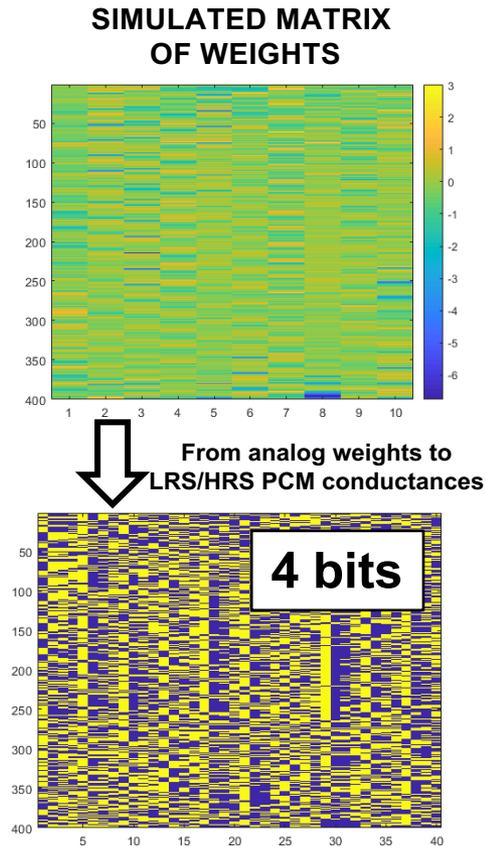
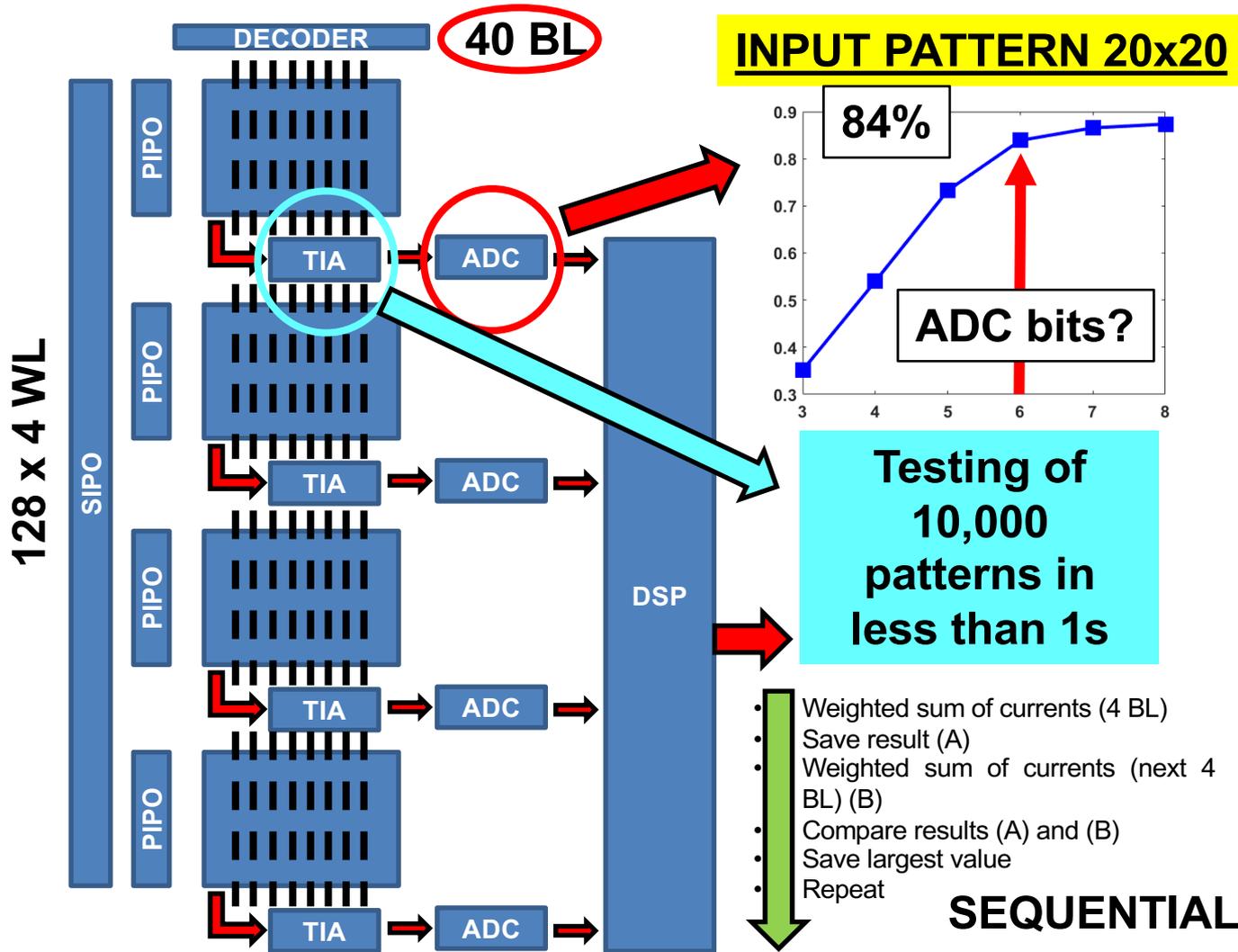
- $I = GV$, dove:
 - G = matrice delle conduttanze
 - V = vettore tensioni
 - I = vettore correnti
- Applicazioni:
 - Elaborazione di segnali (discrete Fourier transform)
 - Reti neurali (G = pesi sinaptici, V = segnali neuronali input)

Acceleratori di reti neurali

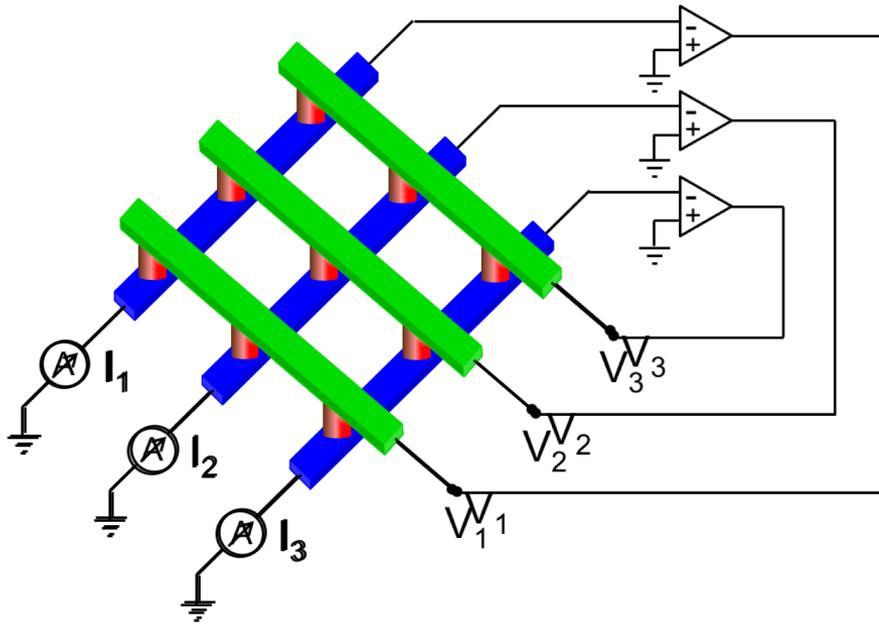


V. Milo, et al., APL Materials 7, 081120 (2019)

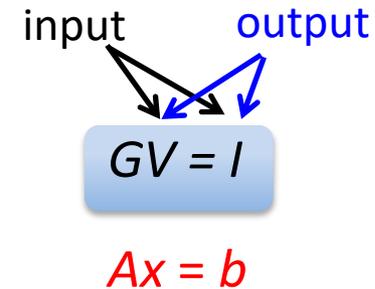
Circuiti integrati per le reti neurali



Solutore di sistemi lineari di equazioni



- Crosspoint array: physical MVM
- Operational amplifiers: negative feedback + virtual ground

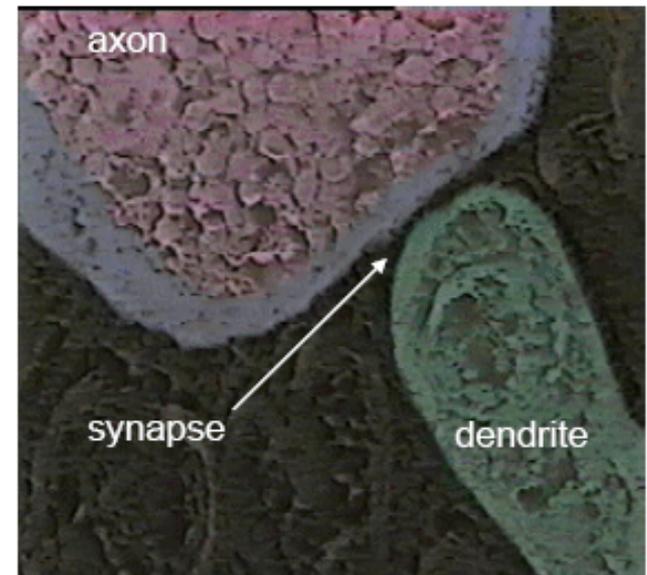
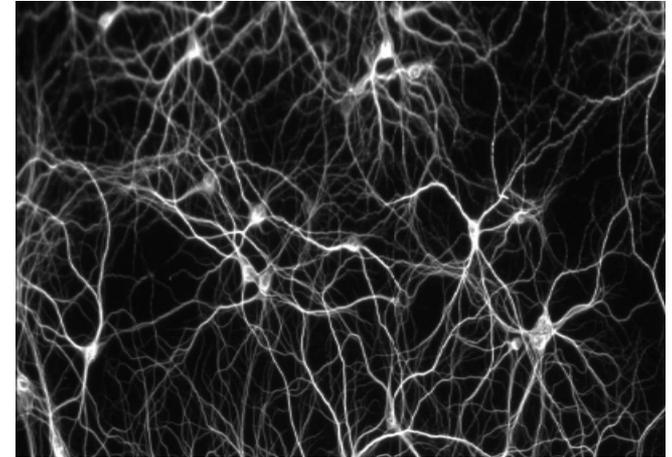


Z. Sun, *et al.*, PNAS 116, 4123 (2019)

- Lo stesso concetto può essere esteso a:
 - inversione di matrice
 - Calcolo di autovettore
 - Equazioni differenziali
 - Regressioni lineari e logistiche

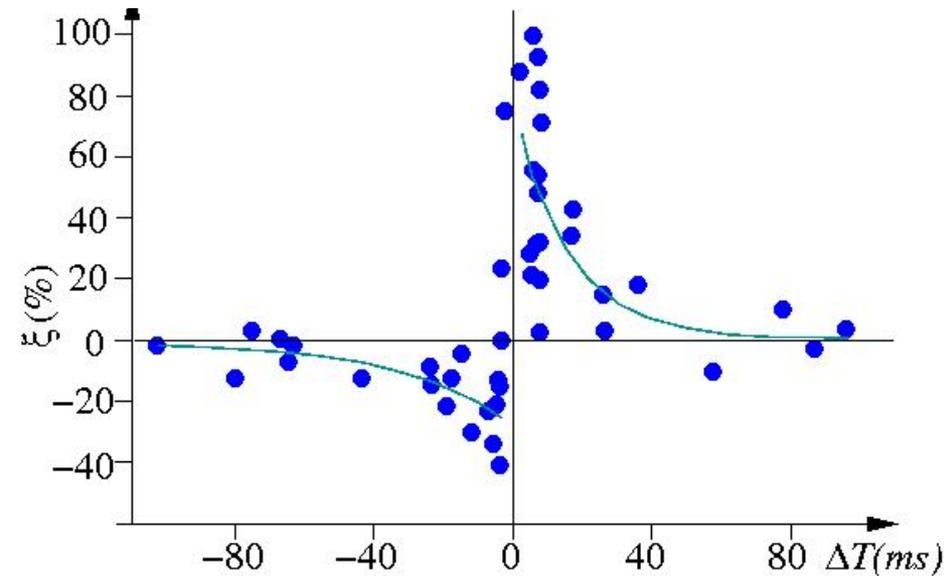
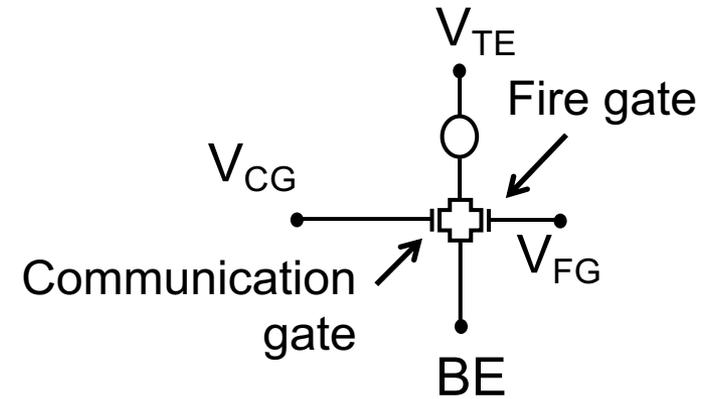
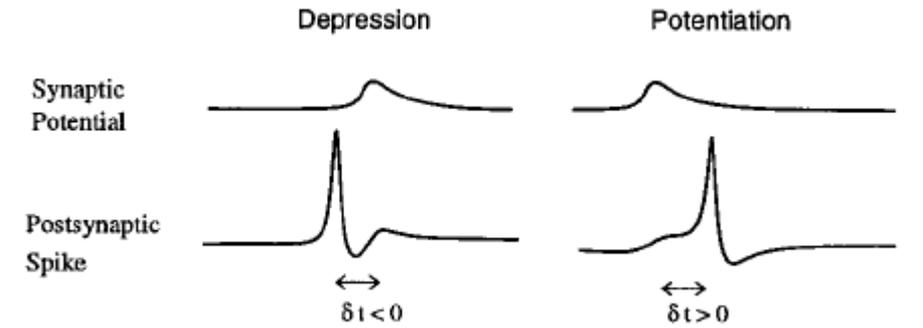
Calcolo neuromorfico

- Neuromorphic architectures aim at replicating cognitive behaviors (learning, recognition, decision making)
- Density in the human cortex
 - Cells = 10^7 cm^{-2}
 - Synapses = 10^{11} cm^{-2} (10^4 average connectivity)

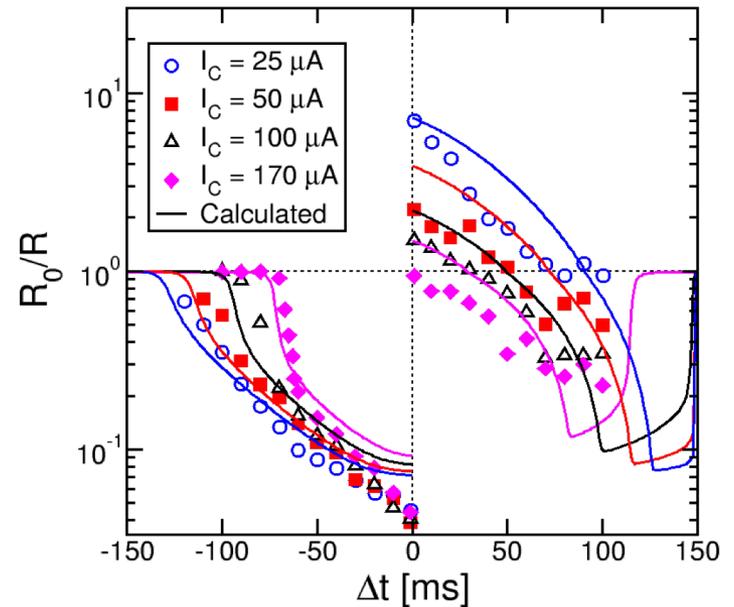


In vivo	In silico
Neuron	CMOS
Axons/dendrites	Interconnect
Synapses	RRAM/memristors

Spike-timing dependent plasticity (STDP)

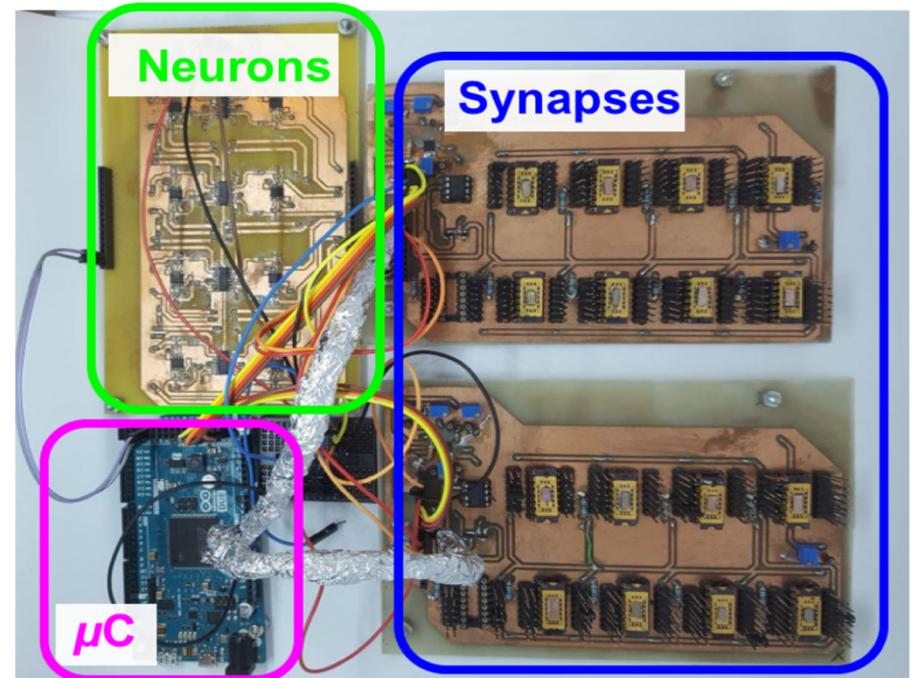
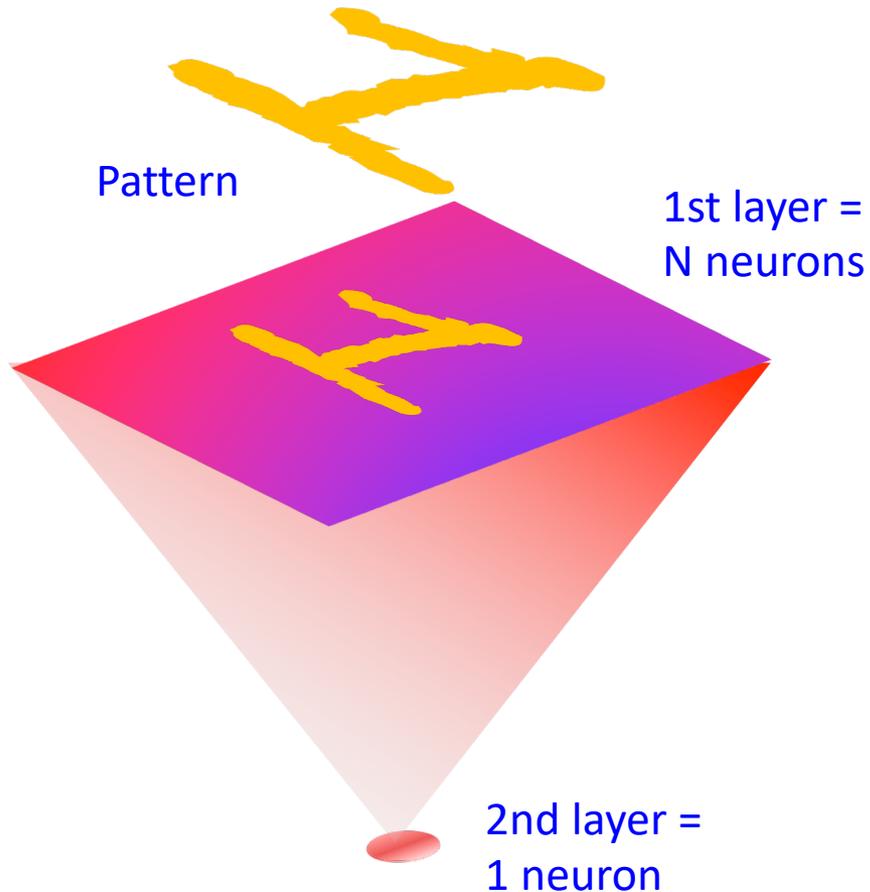


G.-Q. Bi and M.-M. Poo,
J. Neuroscience 18, 1998



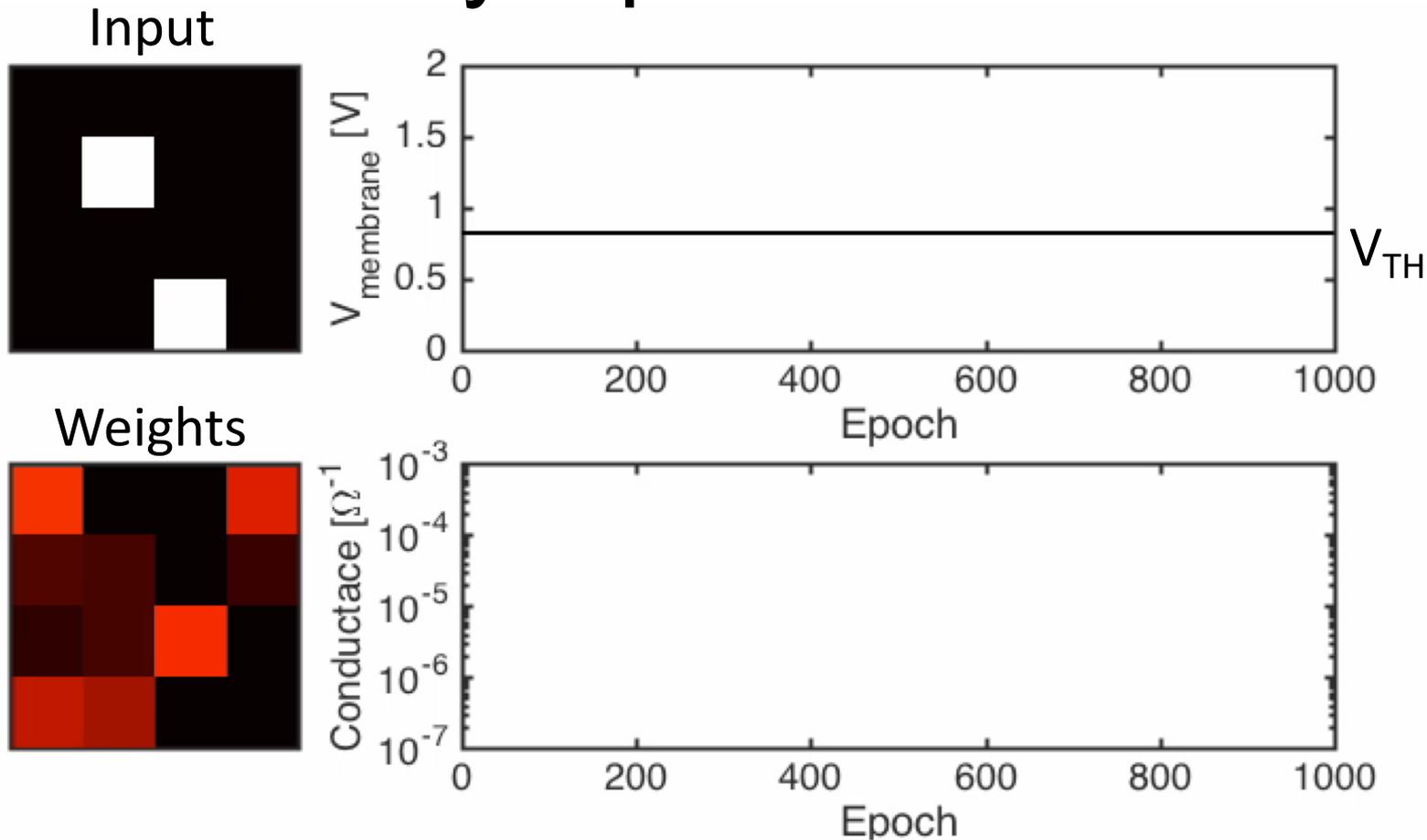
S. Ambrogio, et al.,
IEEE Trans. Electron Devices (2016)

A memristive perceptron

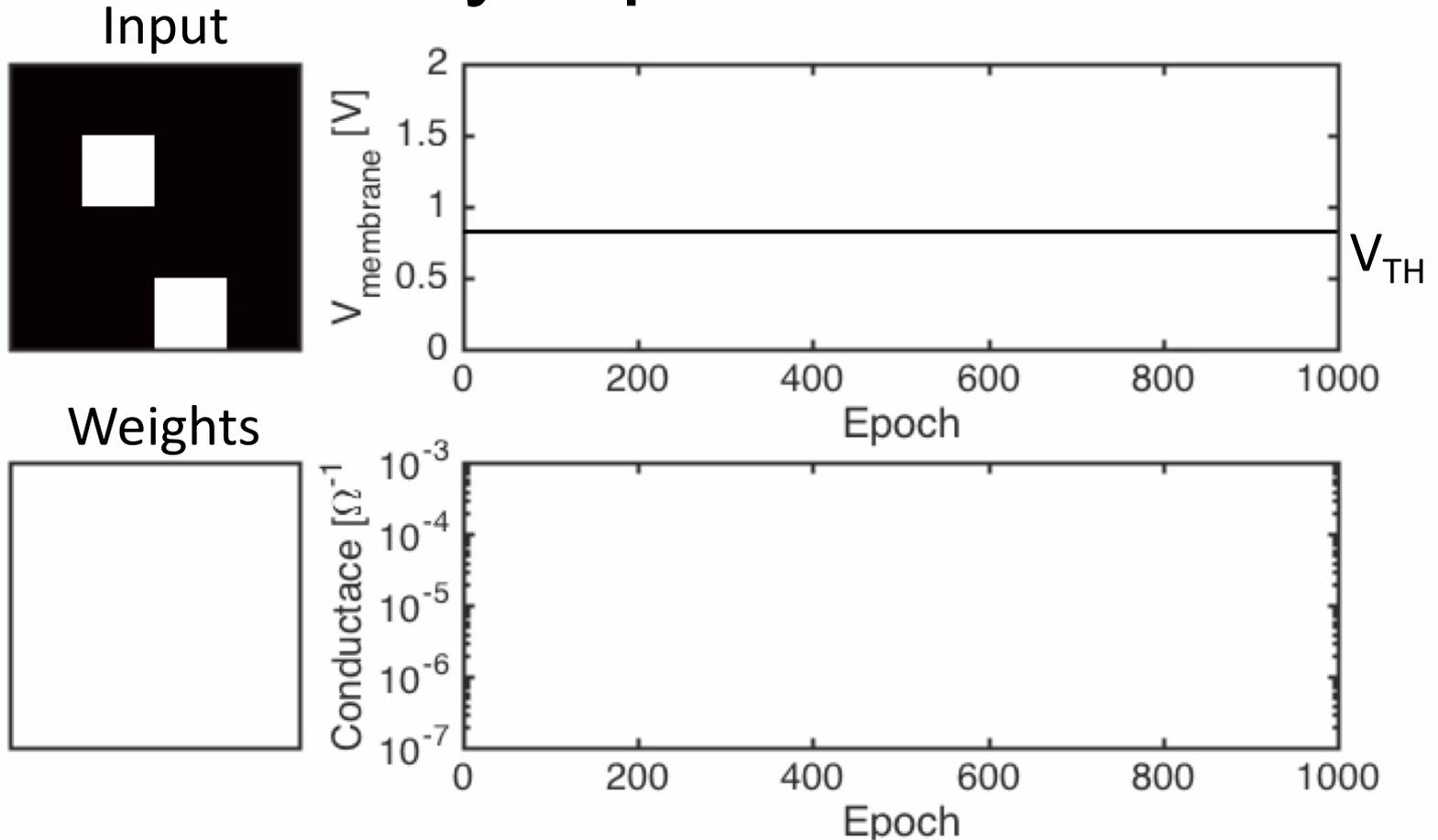


□ Unsupervised learning of simple patterns by STDP in hardware

Pattern learning from HRS synapses



Pattern learning from LRS synapses



Conclusioni

- I dispositivi elettronici richiedono la presenza di diversi materiali con diverse funzioni, i semiconduttori a giocare il ruolo di materiali attivi
- Per capire le proprietà uniche dei semiconduttori, i fondamenti della fisica quantistica e dello stato solido sono necessari
- La crescita esponenziale prevista da Moore non continuerà per sempre. Servono innovazioni di fisica/materiali/architetture → ruolo abilitante dell'elettronica dello stato solido