

Tecniche di micro e nanofabbricazione

Le problematiche relative allo sviluppo di microscopi con alta risoluzione spaziale è direttamente legata alla capacità di realizzare micro e nanostrutture con tecniche litografiche





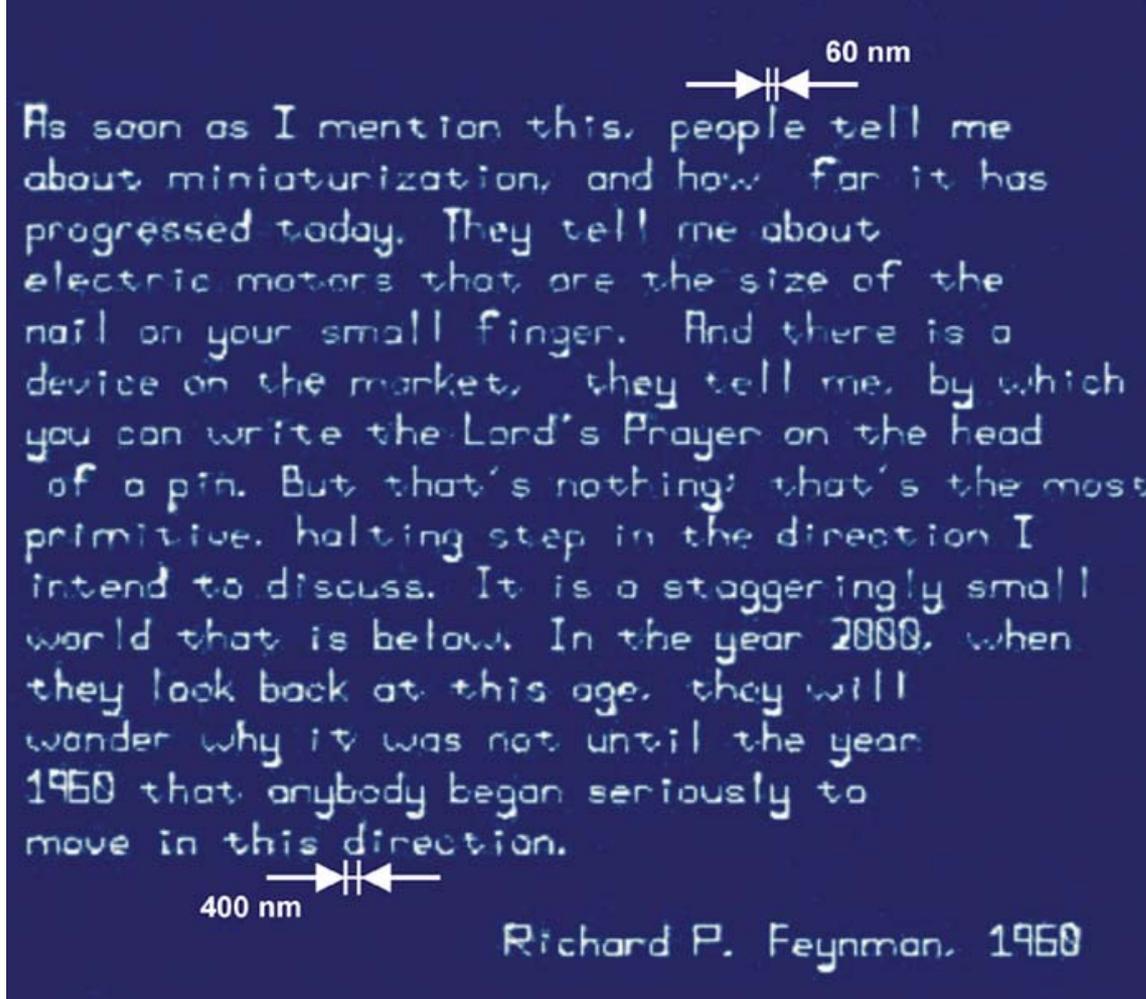
Il primo scienziato a parlare di nanofabbricazione fu Richard Feynman nel 1959, nel seminario “There’s a plenty of room at the bottom”.

Il testo integrale si può trovare al link

<http://www.zyvex.com/nanotech/h/feynman.html>



Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.



Un esempio delle attuali capacità di nanoscrittura: un pezzo del seminario di Feynman, alla scala di riduzione di cui parla.



Perchè la nanofabbricazione?

Una delle più forti spinte alla capacità di realizzare micro e nanostrutture viene dall'elettronica.

Per comprenderne meglio i motivi diamo uno sguardo alla storia dell'elettronica.



Le origini dell'elettronica

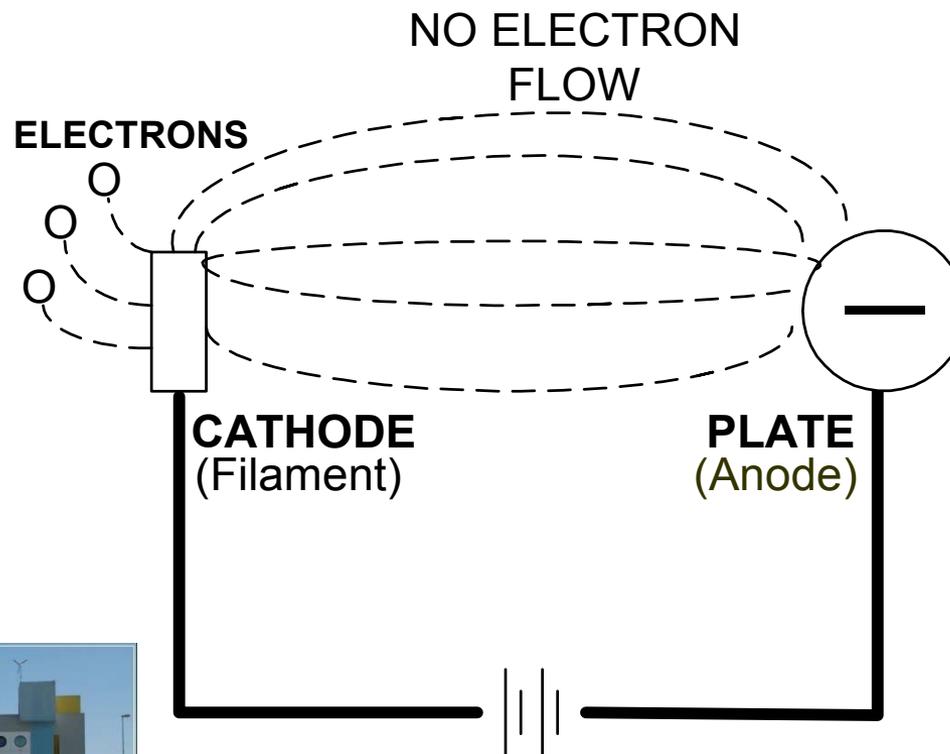


- Nel 1879 Thomas Edison inventa la lampadina.
- Il passaggio di corrente in un filamento sotto-vuoto lo riscalda fino a renderlo luminescente nel visibile
- Nel 1883 Edison scopre che il filamento riscaldato emette elettroni
- Questo effetto diventa noto come “Effetto Edison”



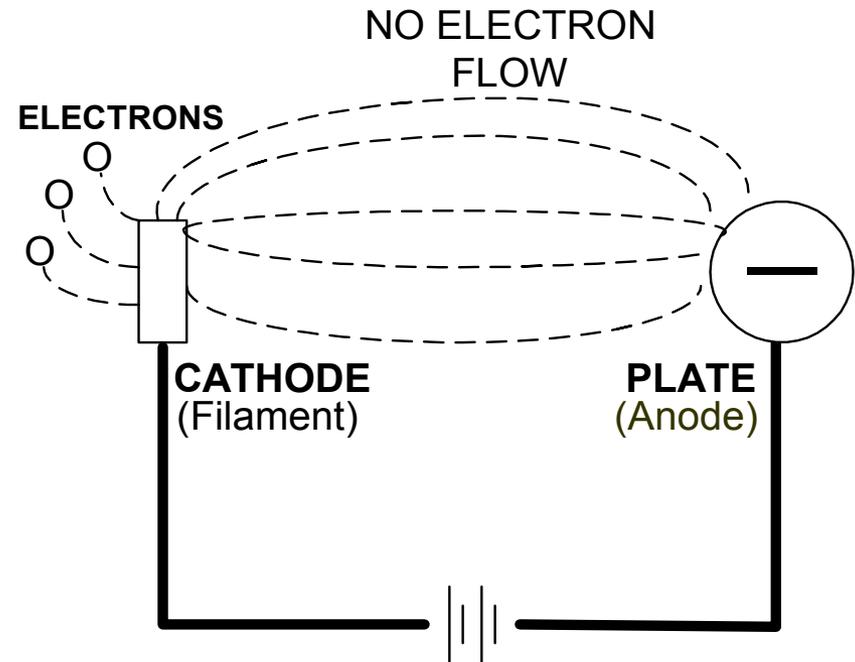
➤ Nel 1904 John Ambrose Fleming dimostra il funzionamento del primo diodo a tubo sotto-vuoto

➤ Il diodo è una lampadina con un secondo elettrodo vicino al filamento.



Come funziona?

- 1) Il filamento, attraversato dalla corrente, emette elettroni per effetto termoelettrico.
- 2) A seconda del segno della d.d.p. tra filamento e secondo elettrodo questi elettroni vengono raccolti, e quindi si ha passaggio di corrente, oppure no.





Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

Applicazioni ai calcolatori



Uno dei 4000 moduli logici dell' IBM 704. Uno dei più potenti calcolatori degli anni '50, capace di eseguire un'addizione in "soli" 16 microsecondi ma.....



Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

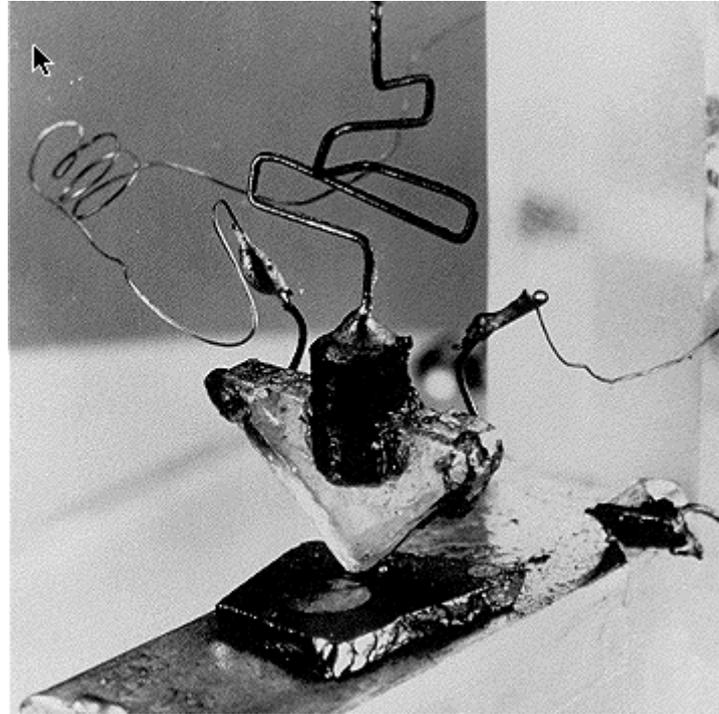
....non esattamente un computer portatile



Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

Nascita dell'elettronica moderna

Nel 1947 un gruppo di ricercatori dei laboratori Bell, inventa il transistor



Il comunicato stampa:

Known as the Transistor, the device works on an entirely new physical principle discovered by the Laboratories in the course of fundamental research into the electrical properties of solids. Although the device is still in the laboratory stage, Bell scientists and engineers expect it may have far-reaching significance in electronics and electrical communication.

Nel 1956 Schokley, Bardeen e Brattain vincono il premio Nobel per la Fisica.



Bardeen farà il bis (l'unico nella storia) nel 1972 per lo sviluppo della Teoria BCS della superconduttività, insieme a Cooper e Schrieffer



Il modo più semplice per aumentare le capacità di calcolo di un chip è realizzare transistor il più piccoli possibile

Come si fa?

- 1) Approccio top-down (lo scalpello): si parte da un materiale “grande” e si “scolpiscono” i dispositivi miniaturizzati
- 2) Approccio bottom-up (il LEGO), si parte da atomi o molecole e li si costringe ad assemblarsi nel modo giusto



Per realizzare i dispositivi l'approccio attualmente utilizzato è la litografia ottica (Approccio Top-Down)

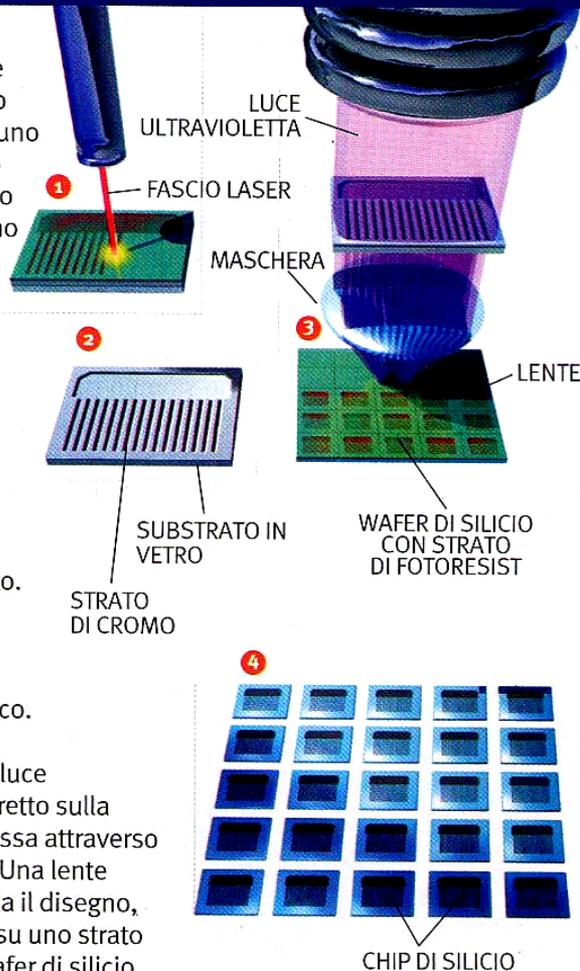
Fotolitografia convenzionale

1 Un fascio laser scrive il disegno del circuito per un microchip su uno strato di un polimero fotosensibile deposto su uno strato di cromo e un substrato di vetro. Le parti di polimero colpite dal fascio possono essere rimosse selettivamente.

2 Le parti esposte di cromo vengono pure rimosse e il resto del polimero viene sciolto. Il risultato è una maschera, l'equivalente di un negativo fotografico.

3 Quando un fascio di luce ultravioletta viene diretto sulla maschera, la luce passa attraverso le lacune del cromo. Una lente rimpicciolisce in scala il disegno, focalizzando la luce su uno strato di fotoresist su un wafer di silicio.

4 Le parti esposte del fotoresist vengono rimosse, permettendo la replicazione del disegno in miniatura sul chip di silicio.



Litografia ottica

*Il limite fisico Limite fisico per scrivere mediante un fascio di luce focalizzato è dato dal **limite di diffrazione** :*

$$\Delta x = 0.61 \frac{\lambda}{n \times \sin \Theta}$$

Nella attuale tecnologia del silicio si usa luce ultravioletta emessa da laser ad eccimeri (KrF). Il limite raggiunto per elementi in commercio è:

$$\Delta x = 90nm$$

Un semplice esempio di fotolitografia ed attacco chimico

Quanti passaggi di tecnologia occorrono per ottenere una semplice incisione su una superficie di silicio?



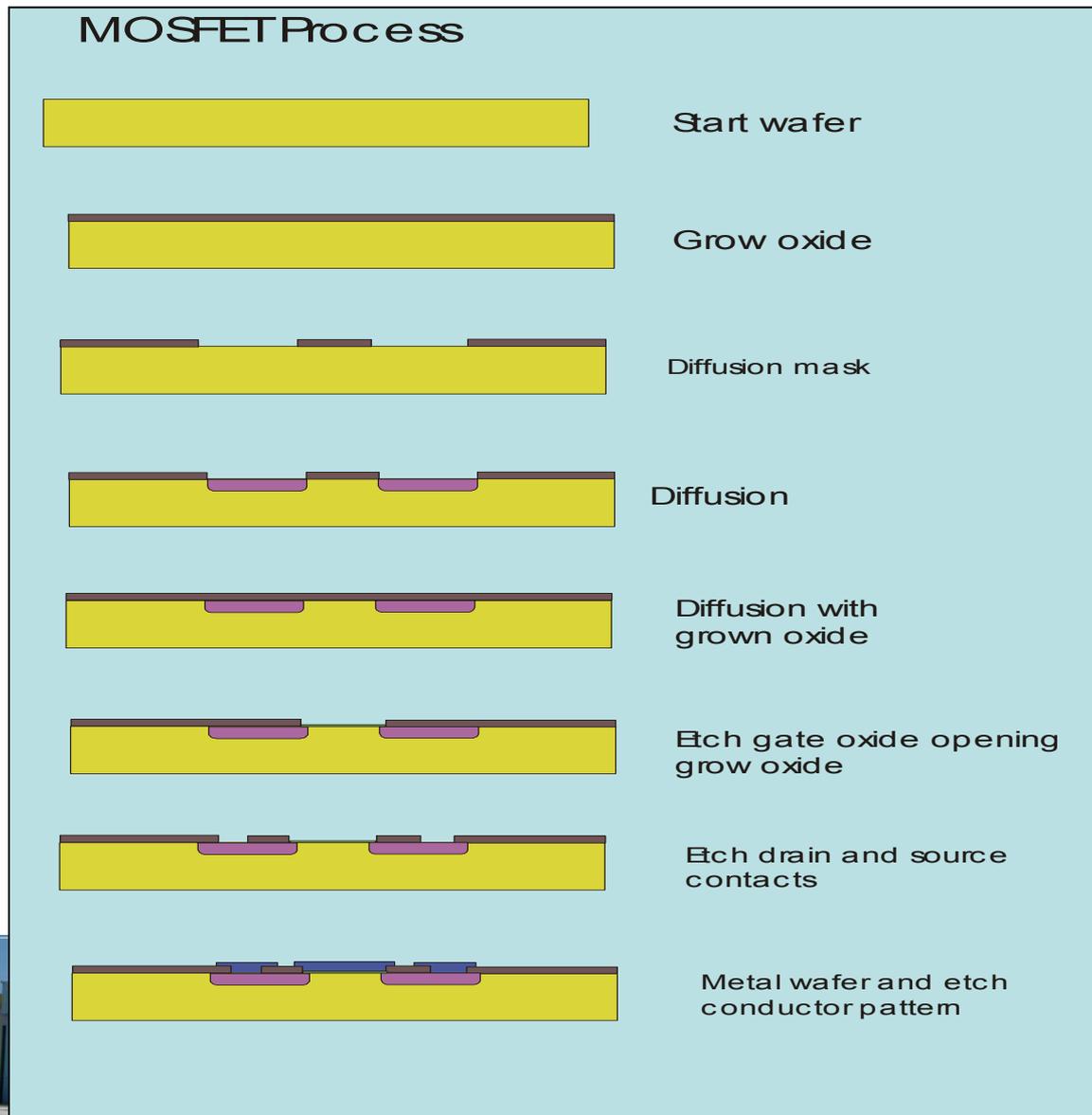
Silicon Etching

A simple movie in nano-format...
© 2002 Saab MicroTech AB



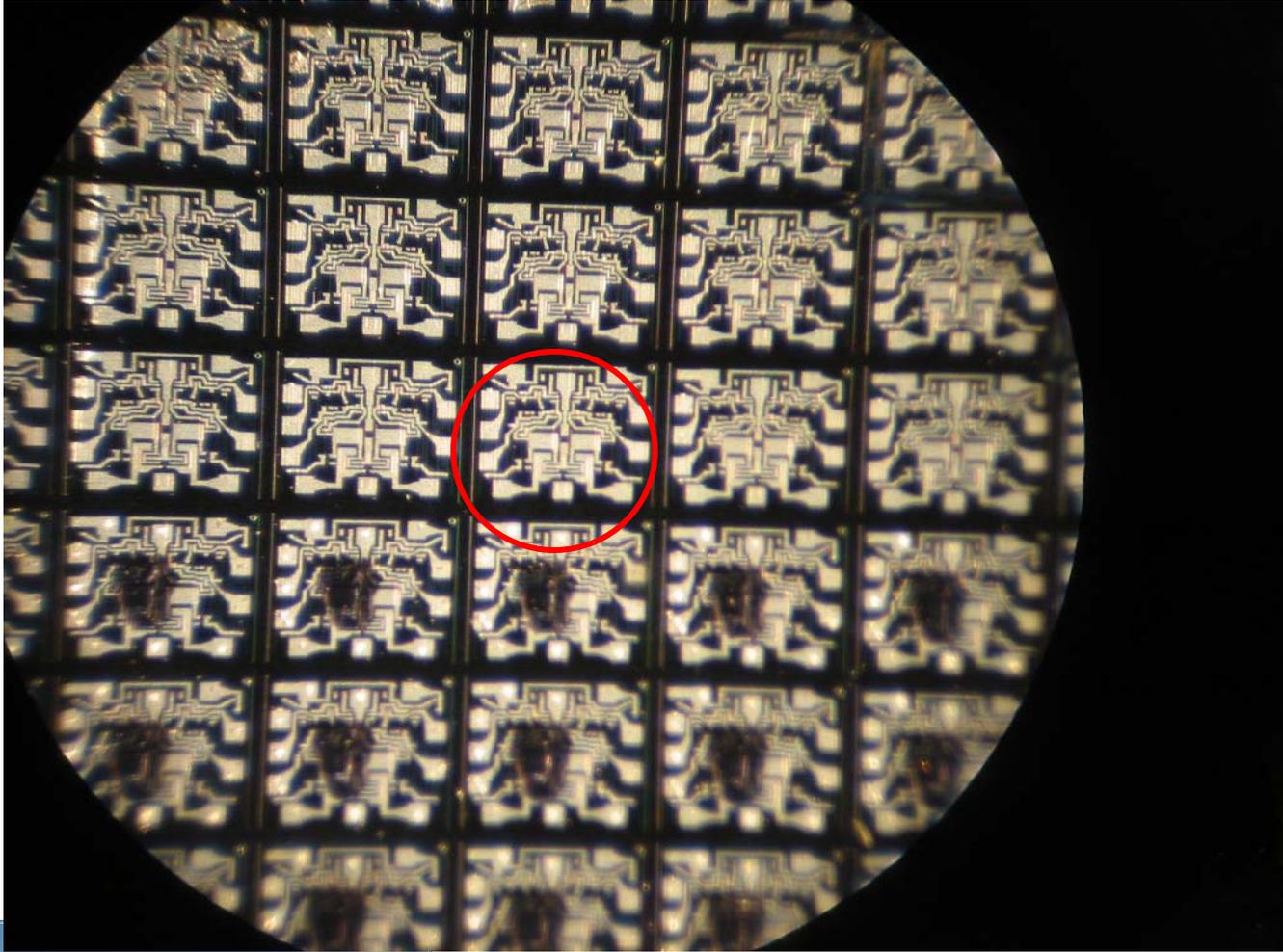
Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

Lo stesso approccio consente di realizzare oggetti più complessi, come transistor FET



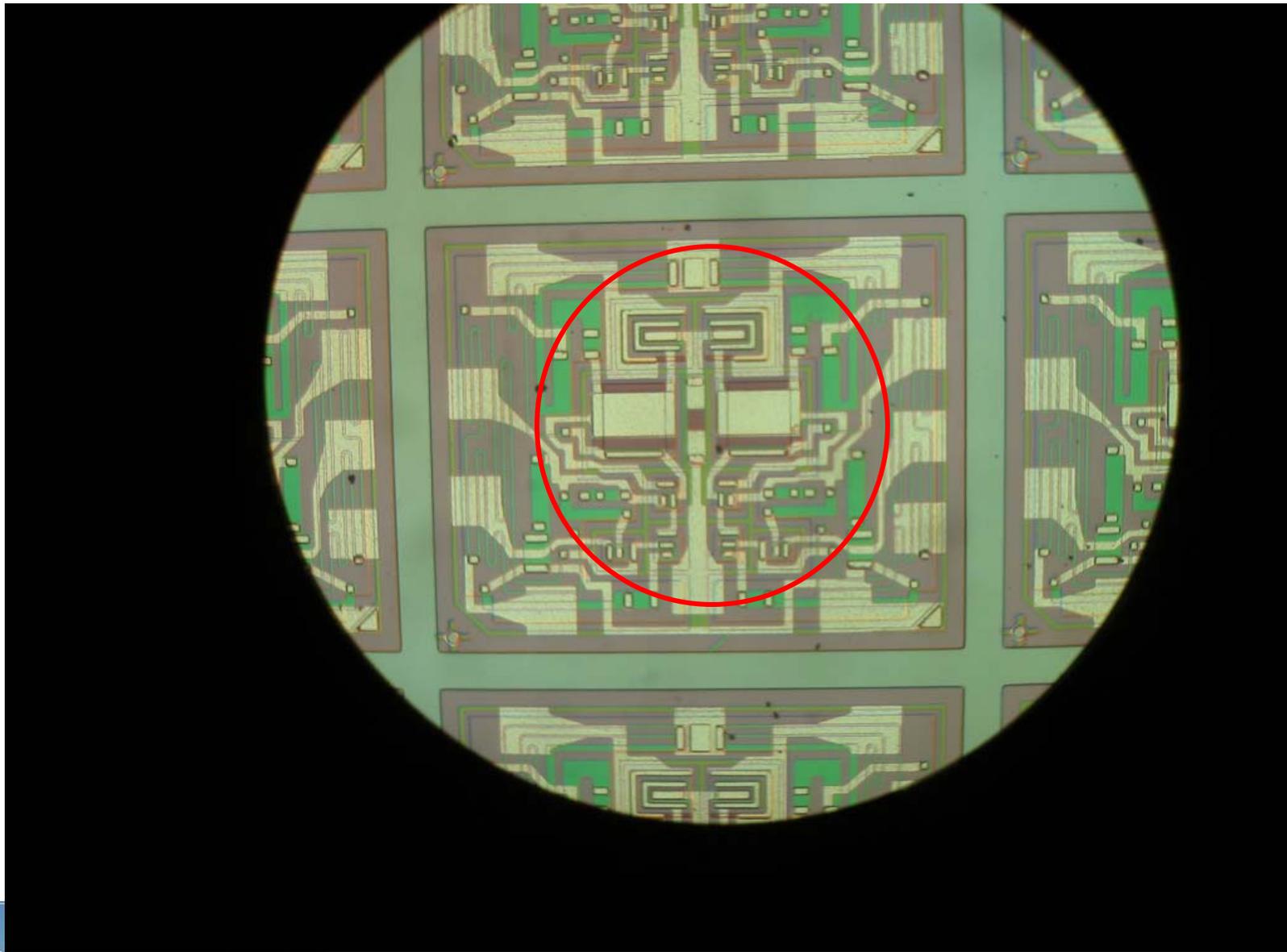
Cross-section
view

Il risultato finale

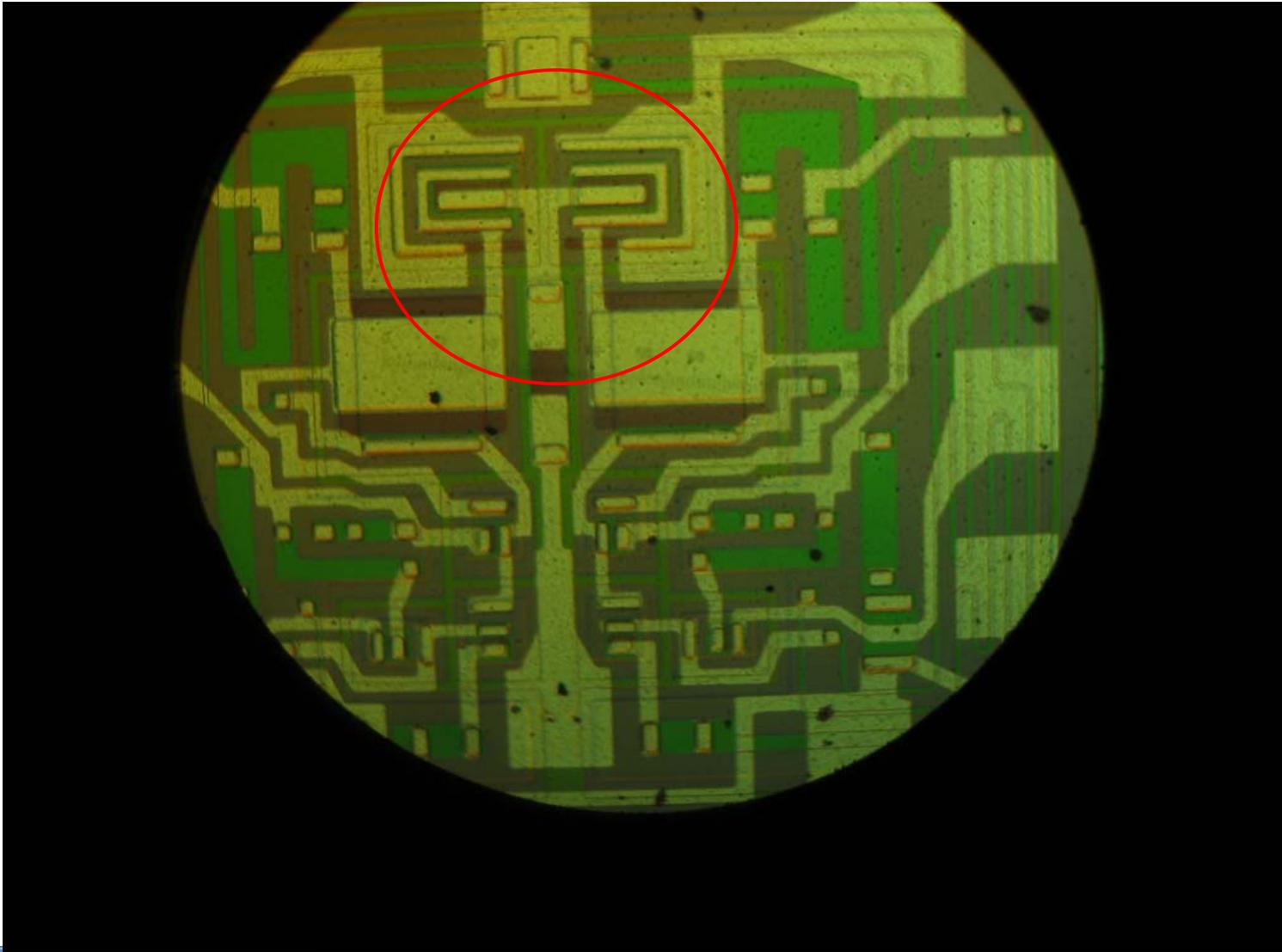


Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

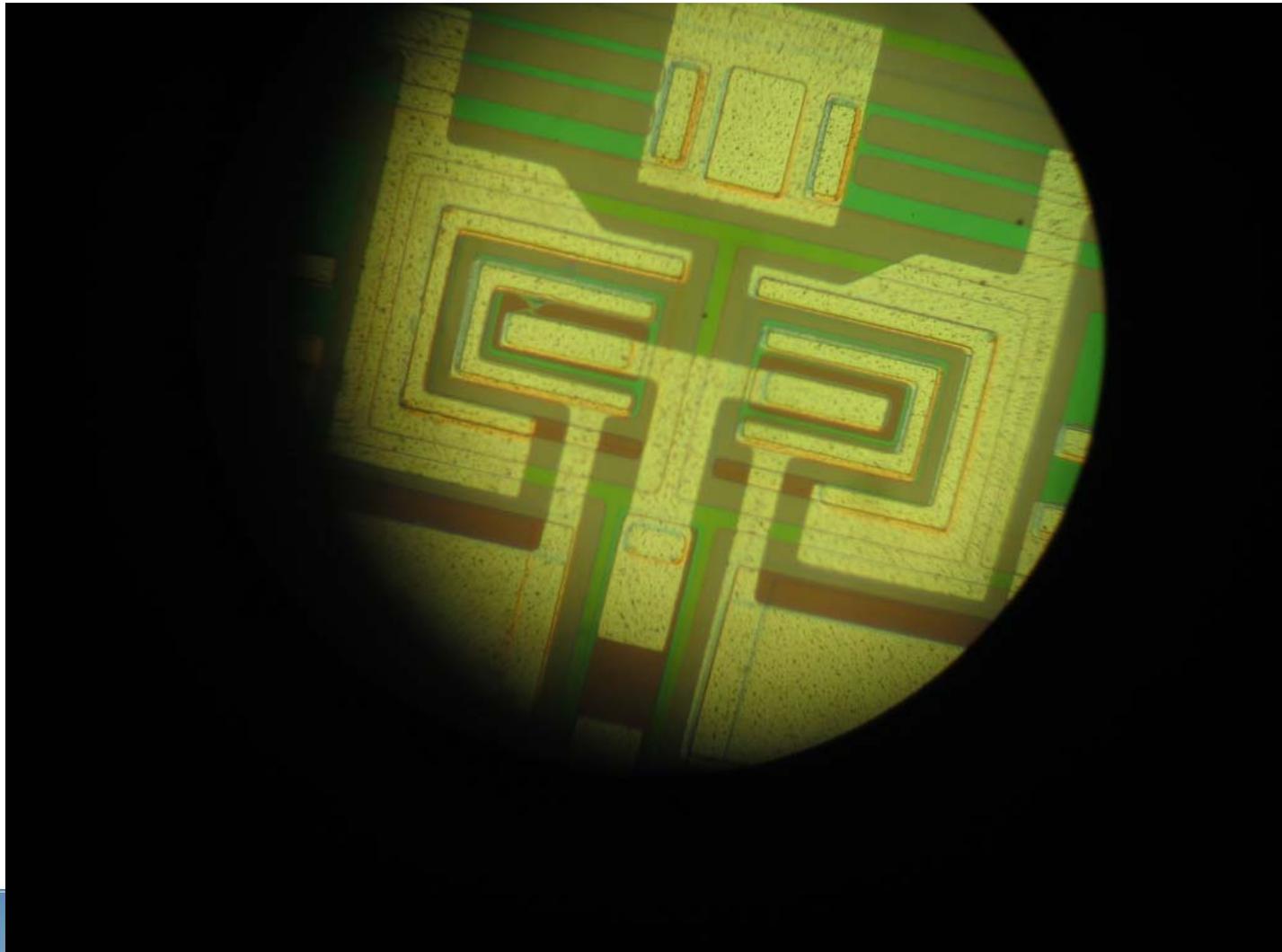




Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

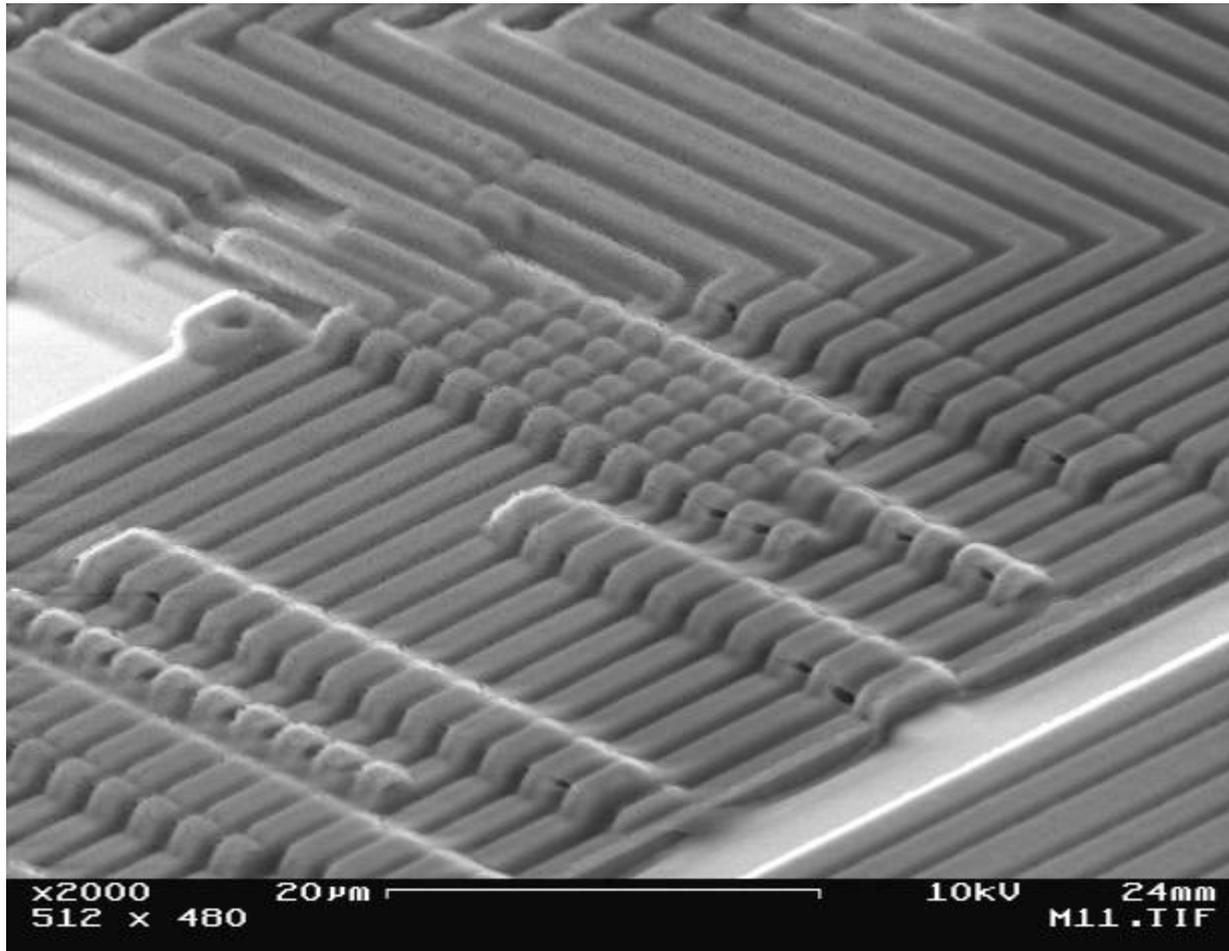


Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.



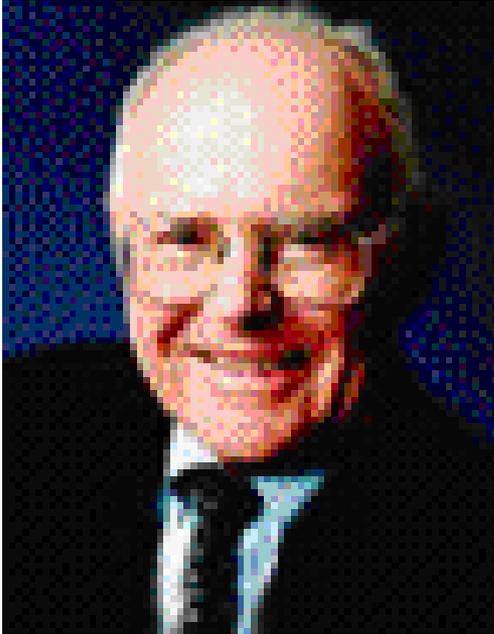
Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

Un esempio l'Intel Pentium



Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

La legge di Moore

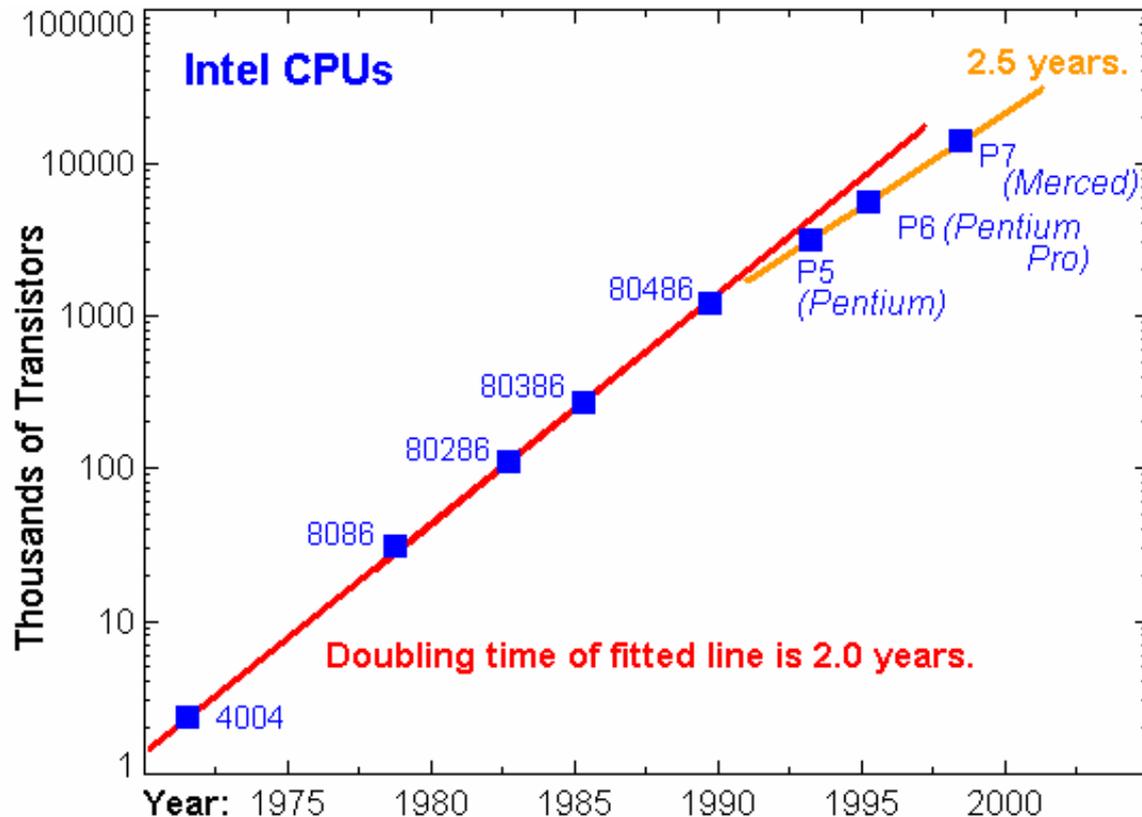


La legge di Moore stabilisce che la densità di transistor su un chip raddoppia ogni 2 anni. Questo aumento di densità, dovuto alla miniaturizzazione dei dispositivi porta ad un aumento delle prestazioni e ad una riduzione dei costi.



Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

Verifica sperimentale della legge di Moore



Confronto tra il numero di transistor sui chip Intel (punti blu) e l'andamento esponenziale previsto dalla legge di Moore (linea rossa).

Dopo il processore 80486 si nota come l'aumento reale del numero di chip abbia iniziato a rallentare, e attualmente raddoppi ogni 2,5 anni (curva arancione)



Il numero di transistor su un chip nel tempo

- 1965.....30
- 1975.....65,000
- 1989.....1,400,000 (486 25MHz)
- 2002.....55,000,000 (P4 2.2GHz)



Quanto costa un transistor?

- Nel 1952, anno di commercializzazione del transistor il costo di ogni dispositivo era 30 \$
- Nel 1965 il prezzo era sceso fino a 5 \$
- Attualmente 1 milione di transistor costano circa 1 \$



Al diminuire delle dimensioni dei transistor abbiamo:

- Maggiore velocità di risposta dei dispositivi, perchè le distanze percorse per diffusione diminuiscono
- Minore potenza dissipata
- Un numero maggiore di transistor per chip, che consente di miniaturizzare i computer a parità di capacità di calcolo, o di aumentare le capacità di calcolo a parità di dimensioni



Fino a quando il tasso di crescita del numero di chip rispetterà la legge di Moore?

- La decrescita delle dimensioni non può procedere all'infinito, perchè su piccola scala la materia è costituita da atomi di dimensioni e a distanza, per quanto piccole, comunque finite.
- Inoltre su piccola scala entrano in gioco processi quantistici.
- La previsione di Moore, di un rallentamento nel 2017, è orrimistica, dato che già adesso il tempo di raddoppio del numero di transistor è aumentato dai 24 mesi della legge di Moore a circa 36 mesi.



Limiti della miniaturizzazione

I punti principali da chiarire:

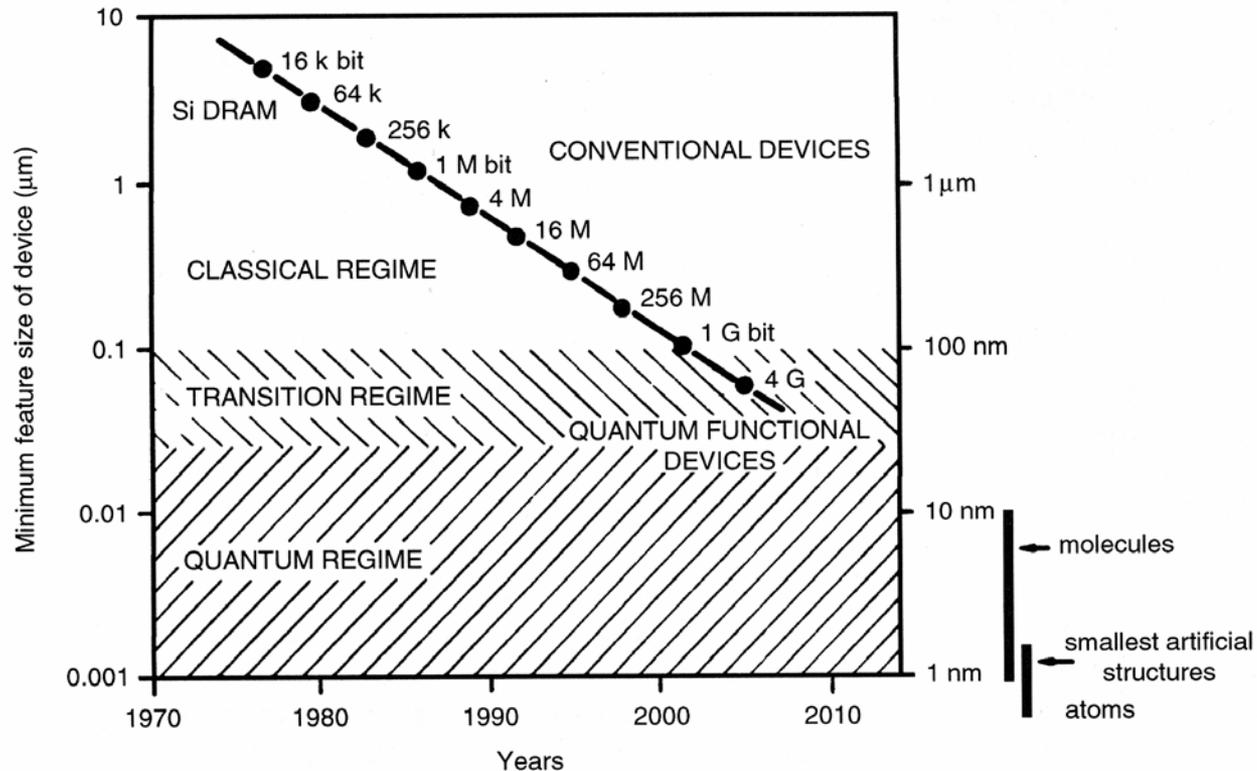
- **Le leggi fisiche pongono dei limiti alla miniaturizzazione?**
Su scala molto piccola compaiono effetti quantistici, e non si possono diminuire le dimensioni al di sotto di quelle atomiche
- **Come si possono usare sistemi nanoscopici per immagazzinare dati**
- **Come si realizzano Nano - macchine**
- **Come si realizzano dispositivi elettronici a scala atomica e molecolare**

LE ABILITA' RICHIESTE:

- ***Scrivere (costruire) su scala atomica***
- ***Leggere (vedere, misurare...interagire) su scala atomica***



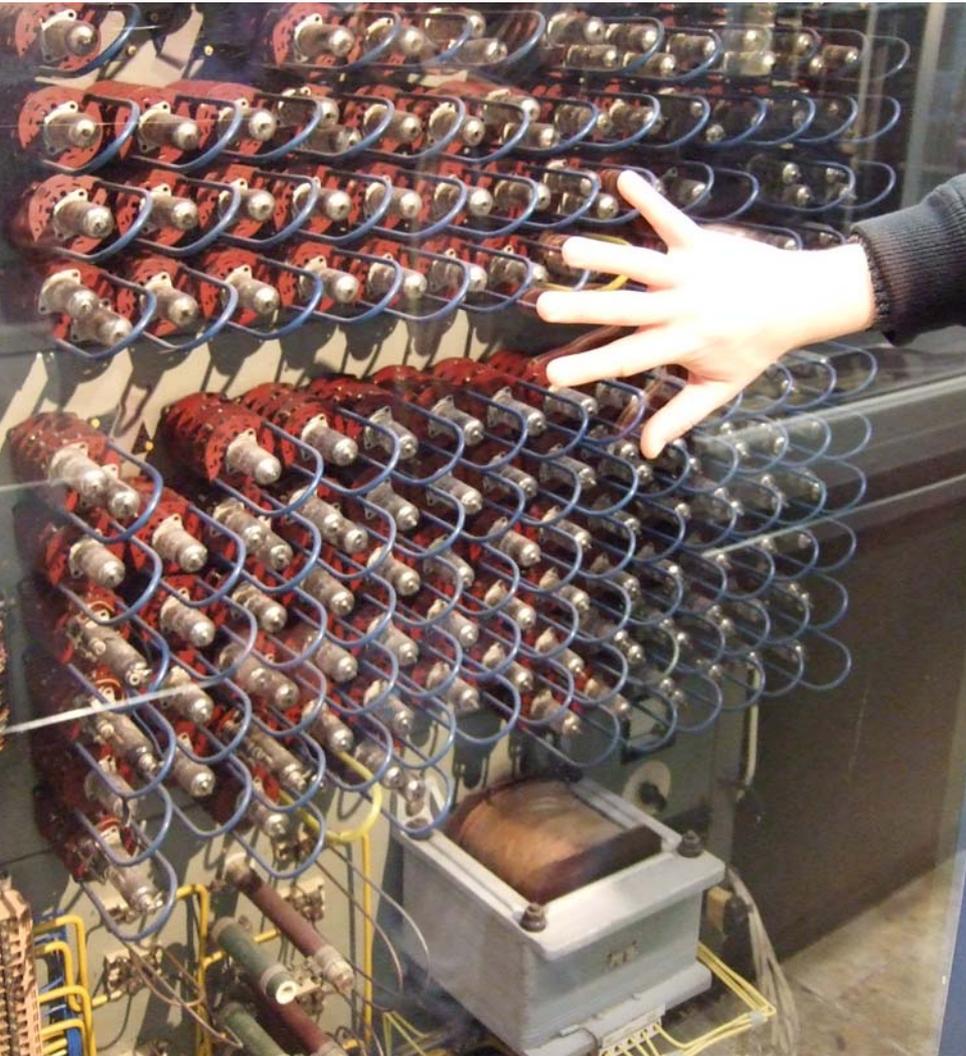
A che punto è arrivata la miniaturizzazione dei transistor



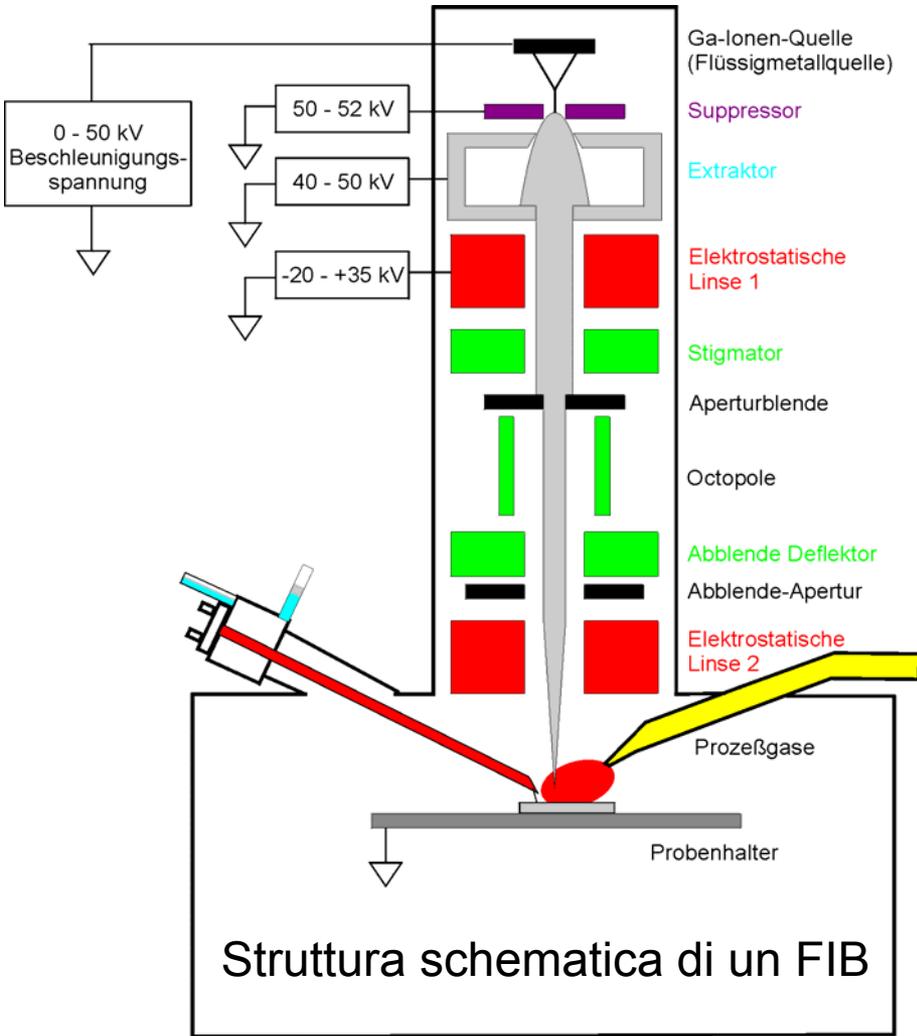
Il grafico riporta l'evoluzione nel tempo delle dimensioni minime dei costituenti di transistor FET. Si può notare dei dispositivi attualmente in commercio (90 nm) non sia molto lontano dalle dimensioni (circa 20-30 nm) per cui gli effetti quantistici diventano dominanti.



130 tubi a vuoto



Come si realizzano nanostrutture



In linea di principio è possibile usare tecniche litografiche per realizzare oggetti di dimensioni minime qualsiasi, a patto che la lunghezza d'onda utilizzata sia sufficientemente piccola.

Per raggiungere il regime dei nanometri non si utilizza radiazione elettromagnetica per scrivere le strutture, perché è difficile avere sorgenti di luce con emissione in questo intervallo spettrale.

Si sfruttano invece le proprietà ondulatorie delle particelle, dotate di lunghezza d'onda di De Broglie che facilmente si può portare a valori nanometrici.

I due sistemi più diffusi di questo tipo usano fasci di elettroni (EBL Electron Beam Lithography) e il FIB (Focused Ion Beam). A parità di energia gli ioni usati dal FIB hanno lunghezze di De Broglie più piccole degli elettroni dell'EBL, avendo massa più grande



Qualche esempio

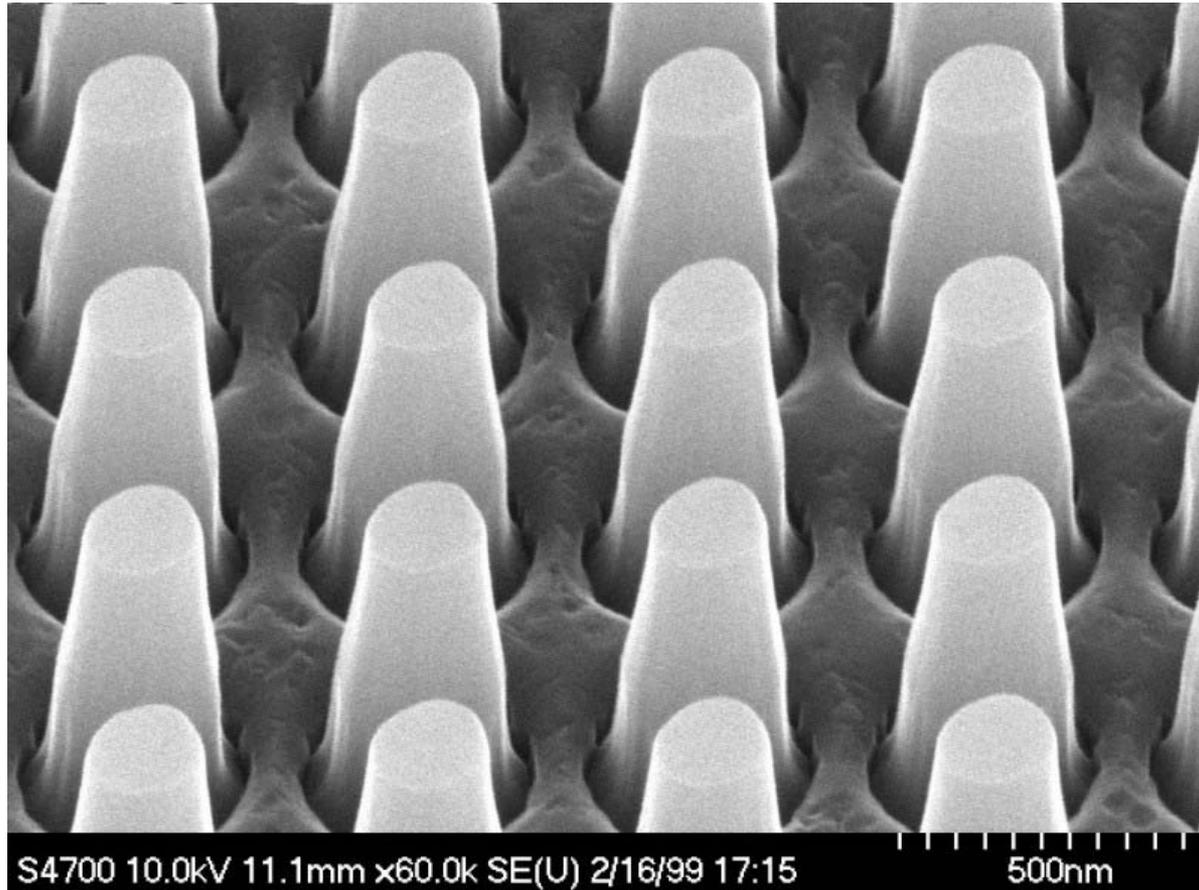
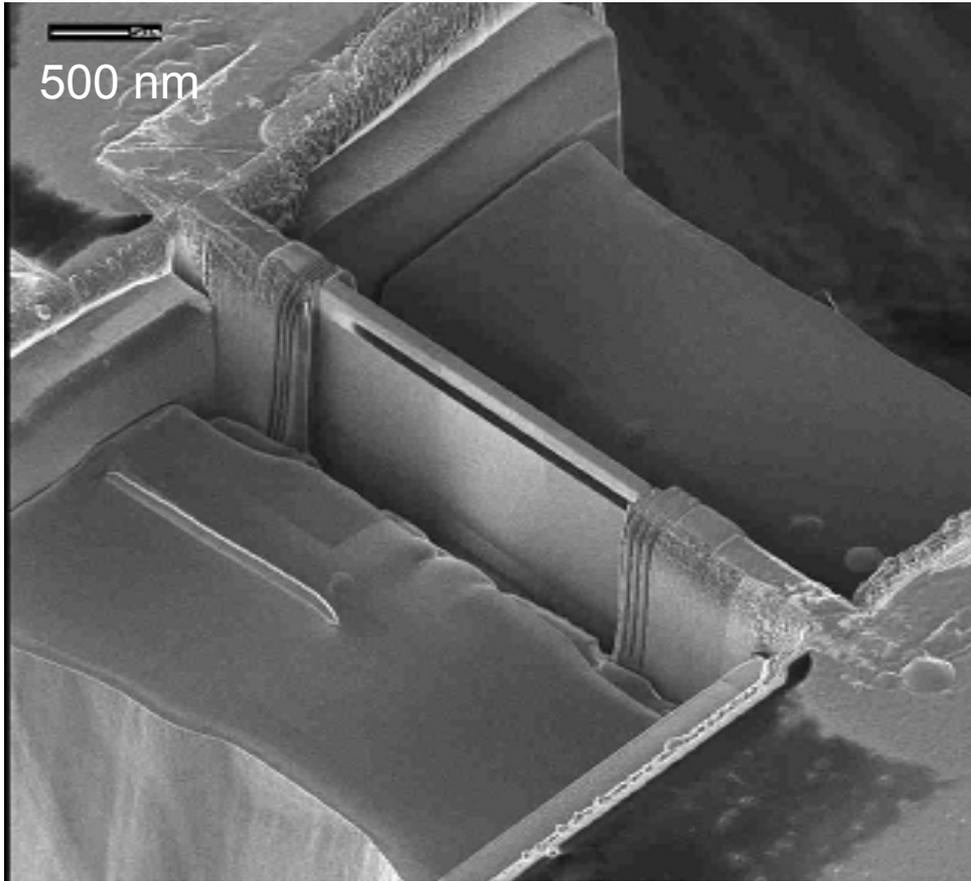


Immagine Nano-colonne di Germanio cresciute su Silicio tramite un FIB.
Si noti il marker delle dimensioni in basso a destra



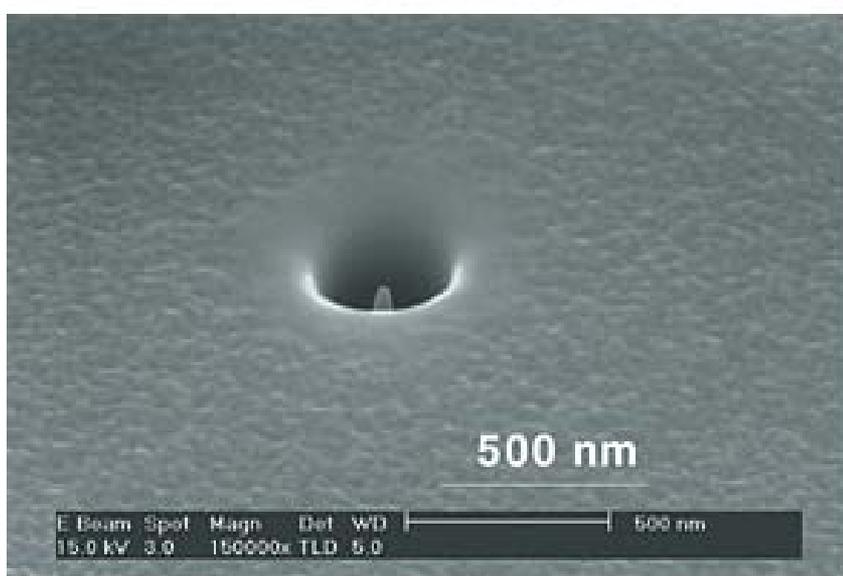
Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.



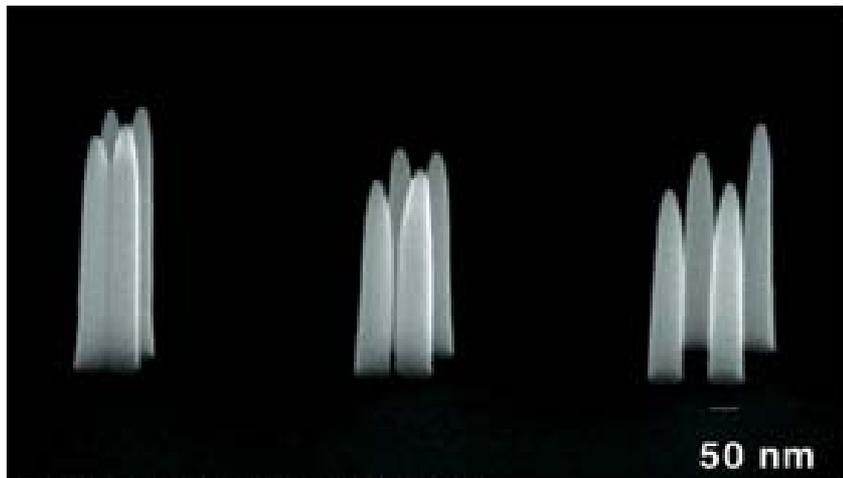
Il FIB può anche essere usato per creare strutture tridimensionali, usando la reattività chimica del fascio di ioni per indurre localmente reazioni chimiche che rimuovano il semiconduttore



Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.



Field emitter fabricated by ion and electron beams



Pt pillars fabricated by electron beam

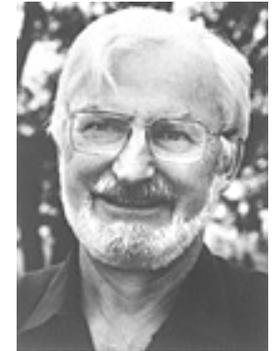
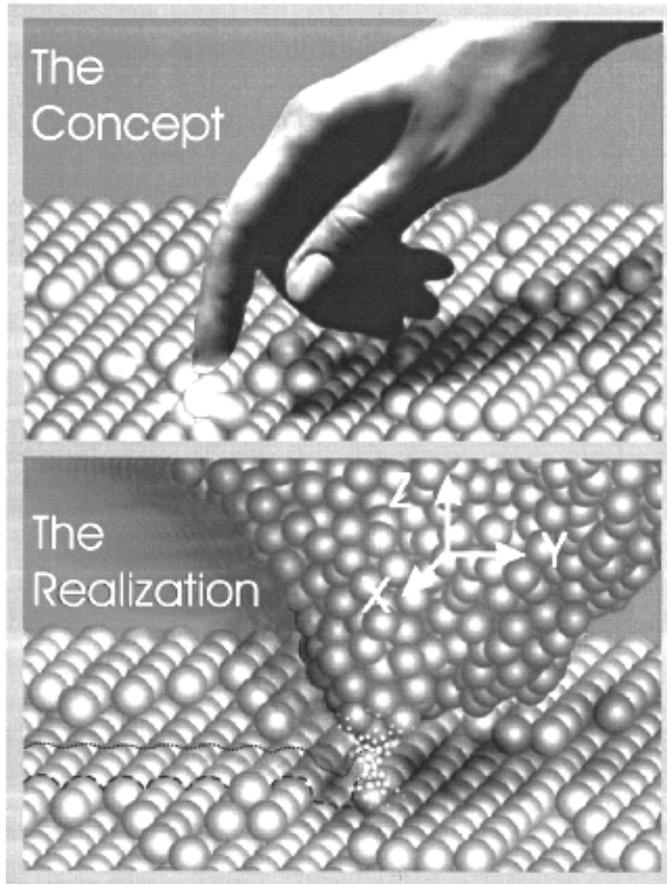
Altro esempio dei risultati ottenibili sfruttando la possibilità di indurre reazioni chimiche locali.

In questo caso il FIB combinato con un EBL è stato usato per creare un foro di circa 200 nm di diametro, all'interno del quale è stato fatto crescere una nanocolonna di Platino di circa 50 nm di diametro.

Nanostrutture di questo tipo sono degli efficienti emettitori di elettroni con diverse possibili applicazioni



Un approccio alternativo



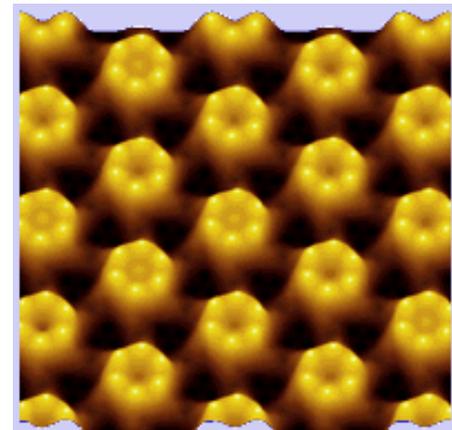
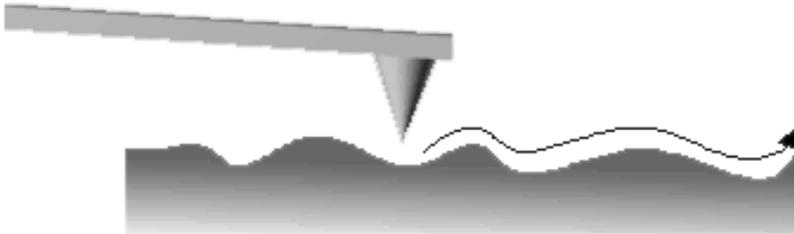
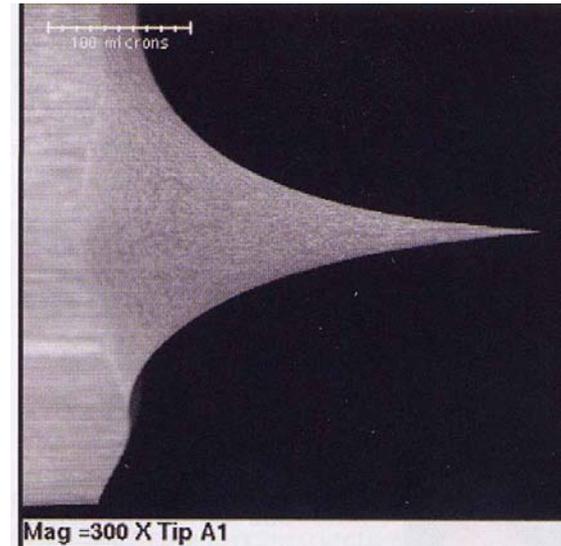
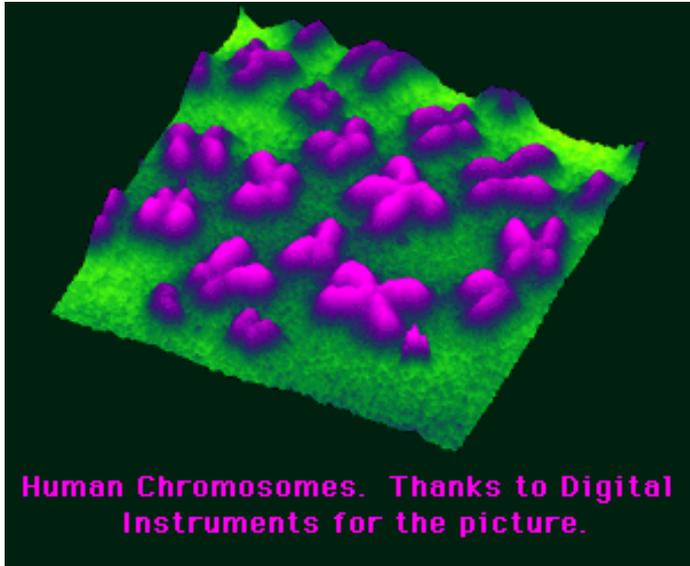
Negli ultimi anni sono state proposte e dimostrate tecniche di litografia radicalmente differenti. Tra queste merita di essere ricordata la litografia tramite Microscopio a Forza Atomica (AFM). Questo strumento, inventato da Gerd Binnig e Heinrich Rohrer nel 1971 (Nobel per la fisica nel 1986) sfrutta la debole interazione di Van der Waals tra una punta assottigliata ed una superficie per misurarne la morfologia. Dato

che l'interazione di Van der Waals dipende dalla sesta potenza della distanza tra punta e campione, se tale distanza è dell'ordine del nanometro lo strumento è sensibile a variazioni morfologiche su scala atomica.



Esempi di misure ottenibili con un AFM

Punta di un microscopio AFM



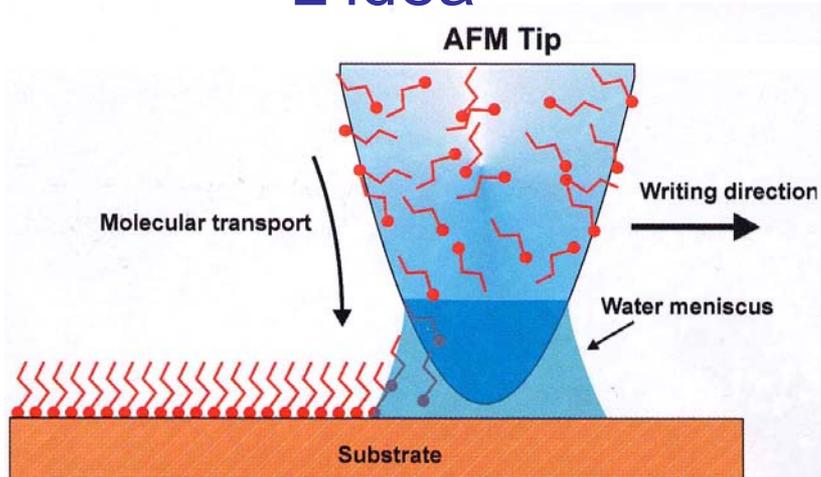
Protein surface layer of D. Radiodurans. Courtesy of Digital Instruments.



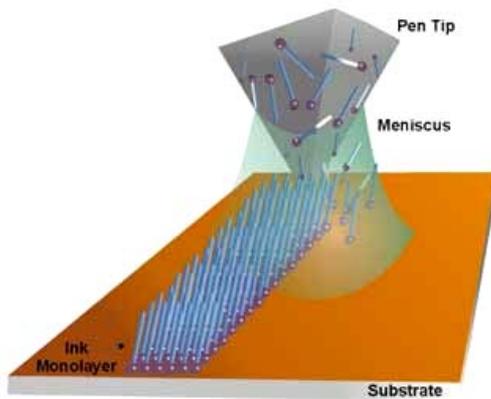
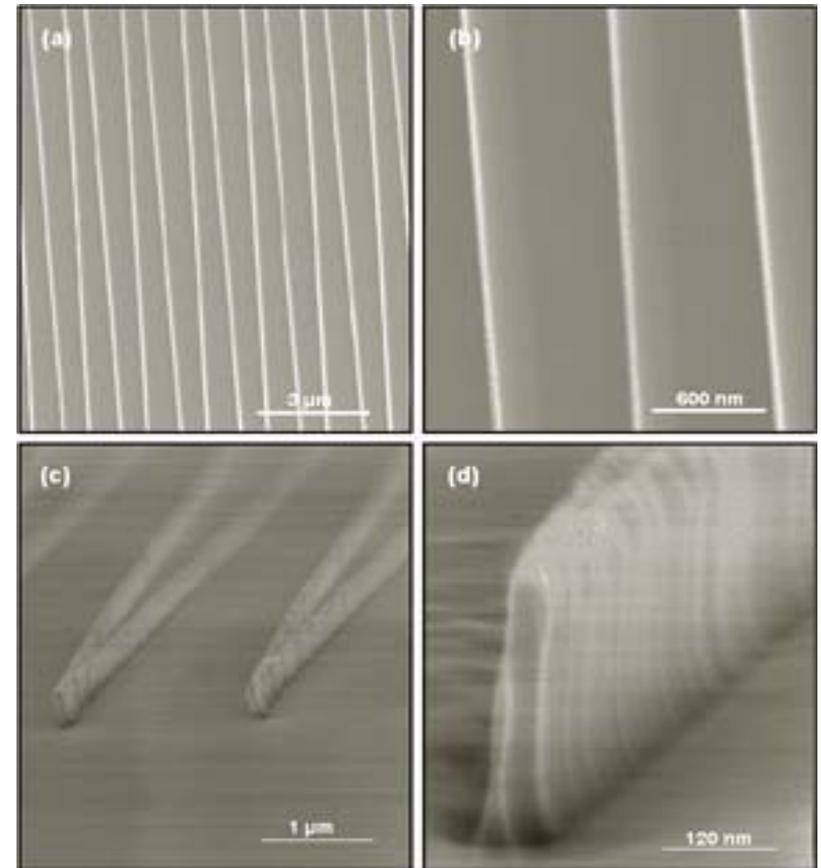
Applicazione dell'AFM alla litografia

La punta dell'AFM può essere usata per depositare con grande risoluzione linee di "inchiostri" fatti con molecole, con un ruolo analogo a quello del fotoresist nella litografia tradizionale. L'idea è simile a quella che fa funzionare una penna biro, però in questo caso le linee che si scrivono sono larghe pochi nanometri

L'idea



I risultati

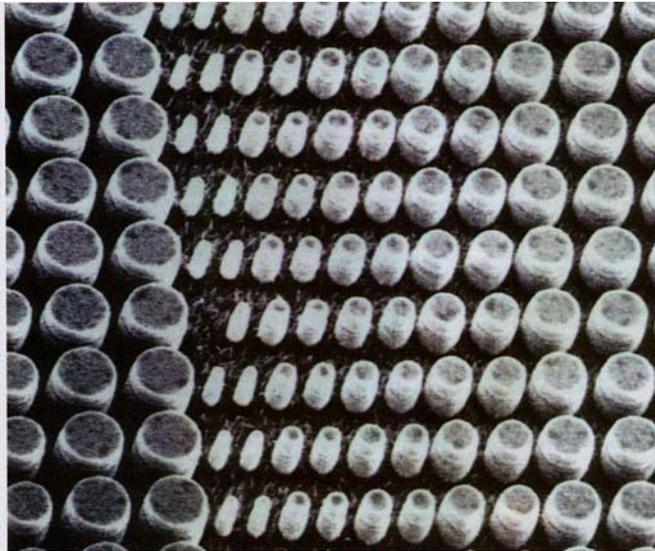


Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

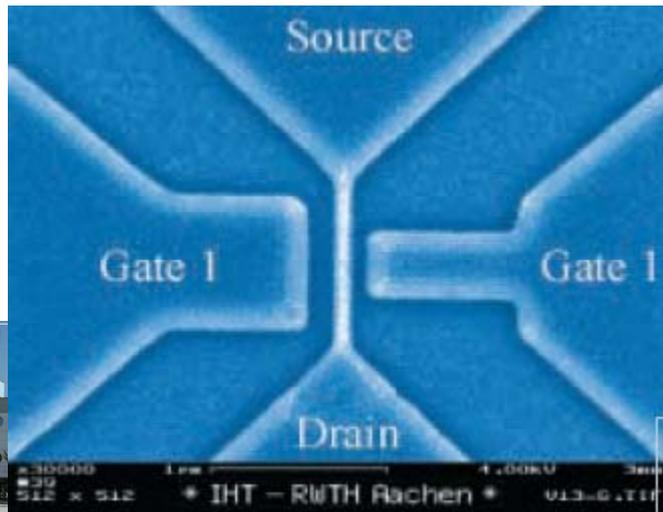


Altri esempi di micro e nanofabbricazione

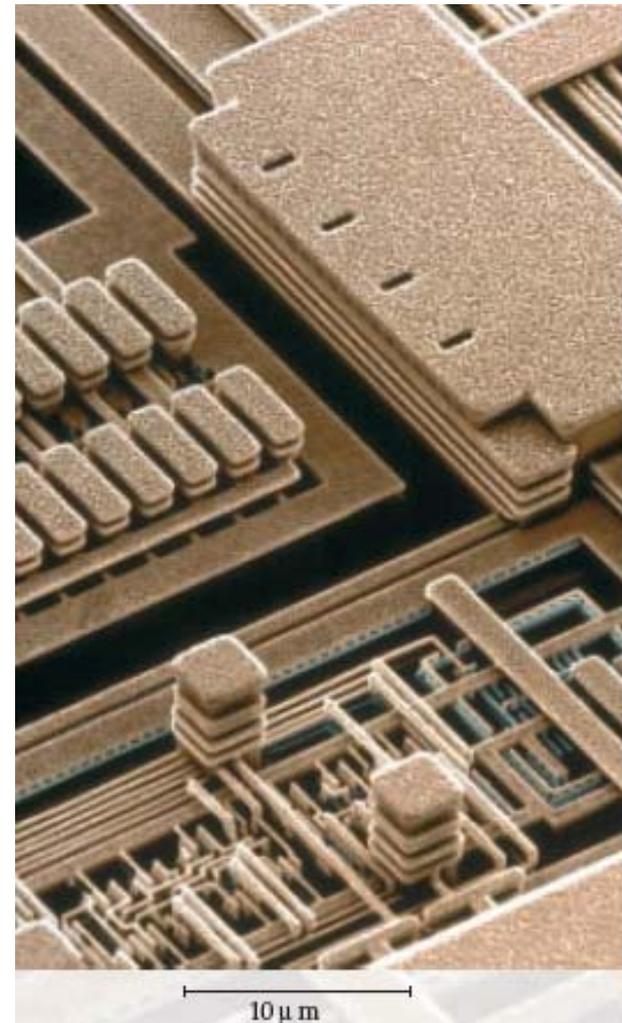
Scacchiera di microlaser



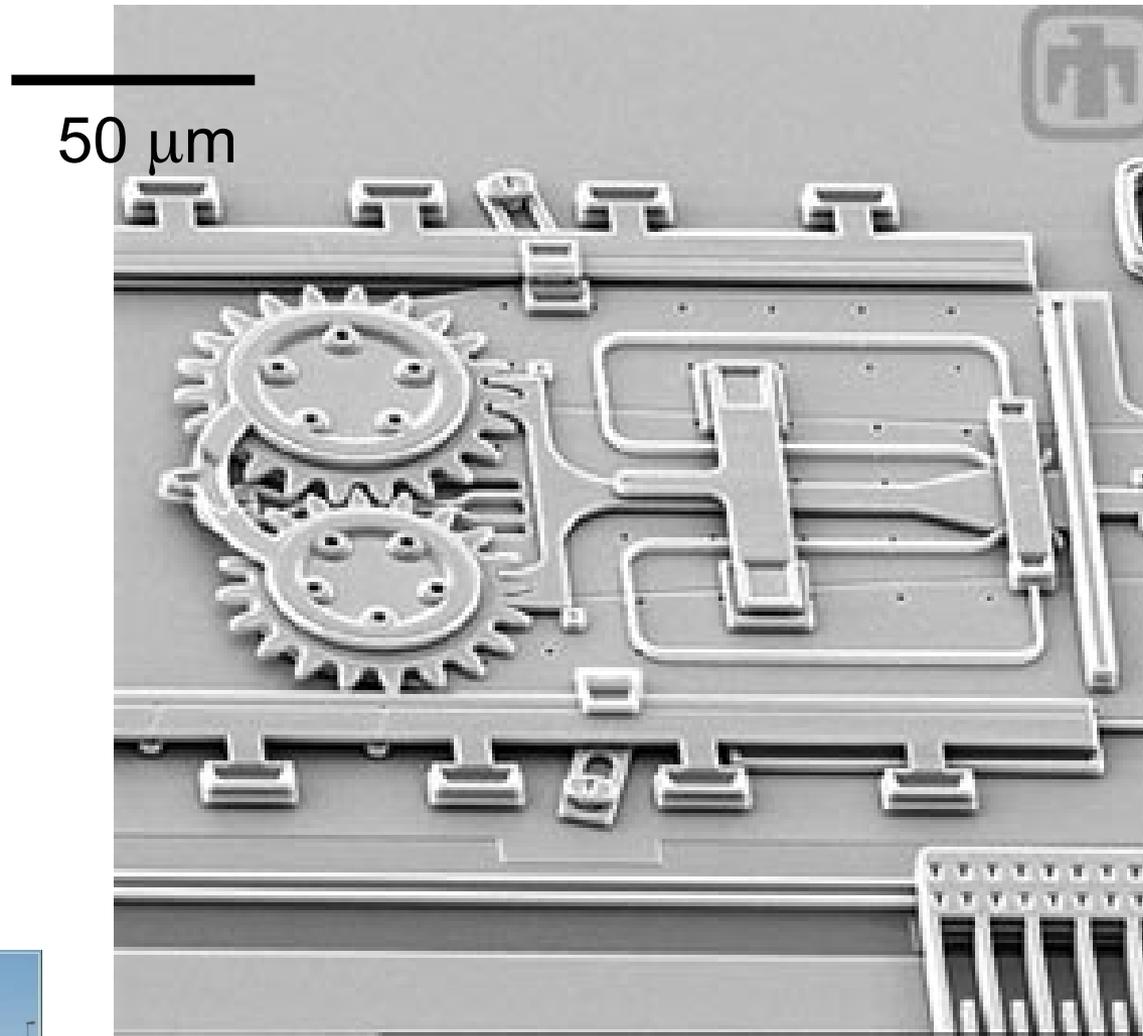
Un FET

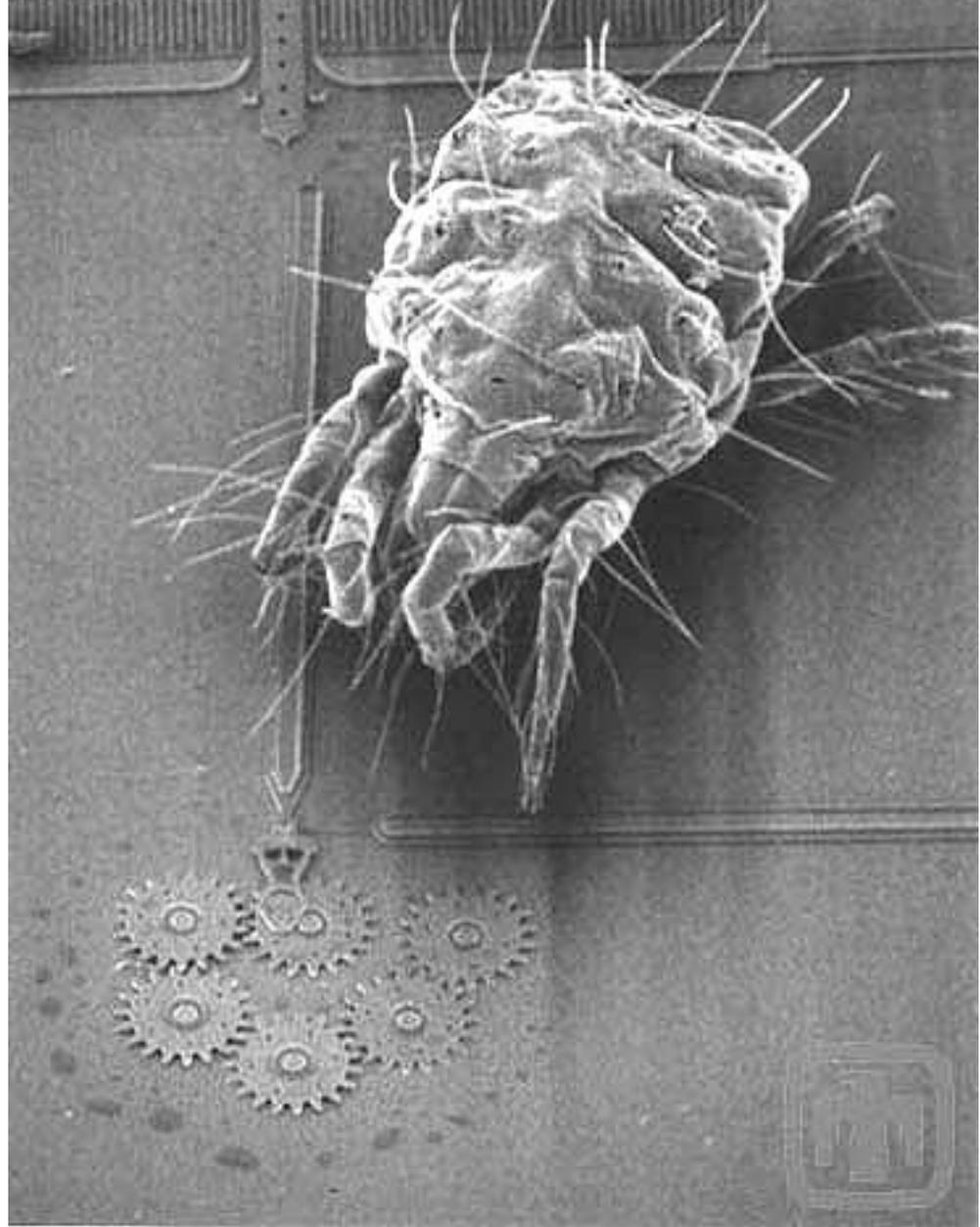


Microchip 3D

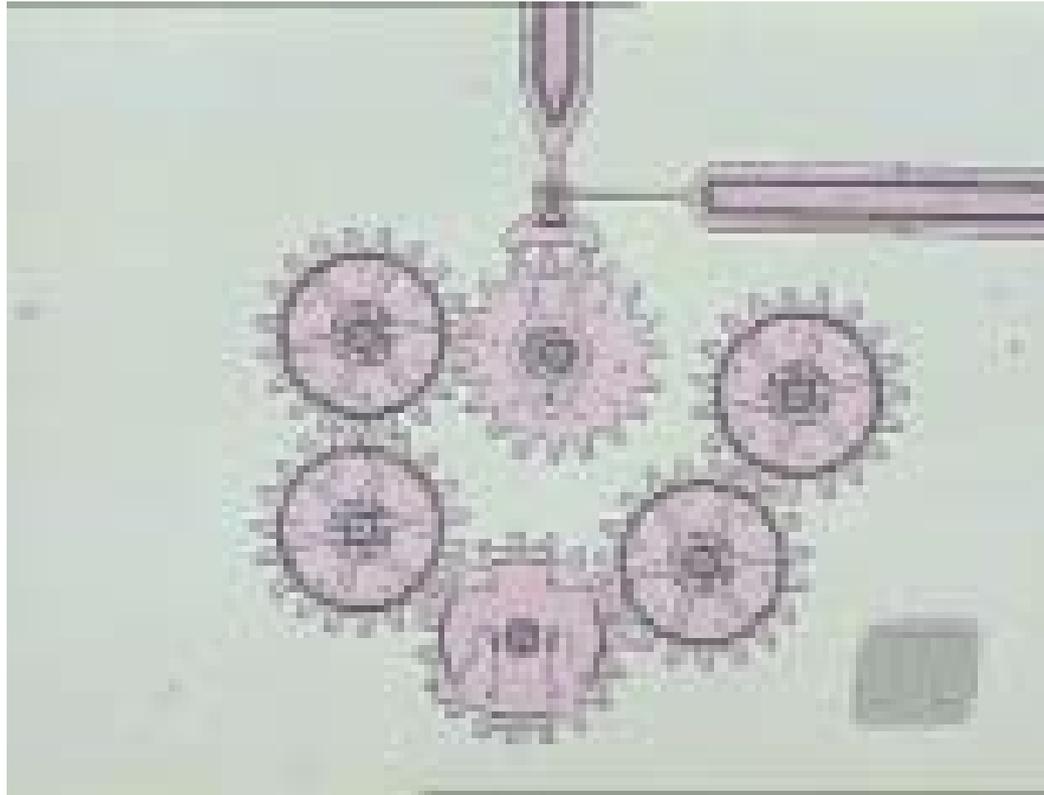


Esempi di fabbricazione di dispositivi meccanici micrometrici (Micromachining)





Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

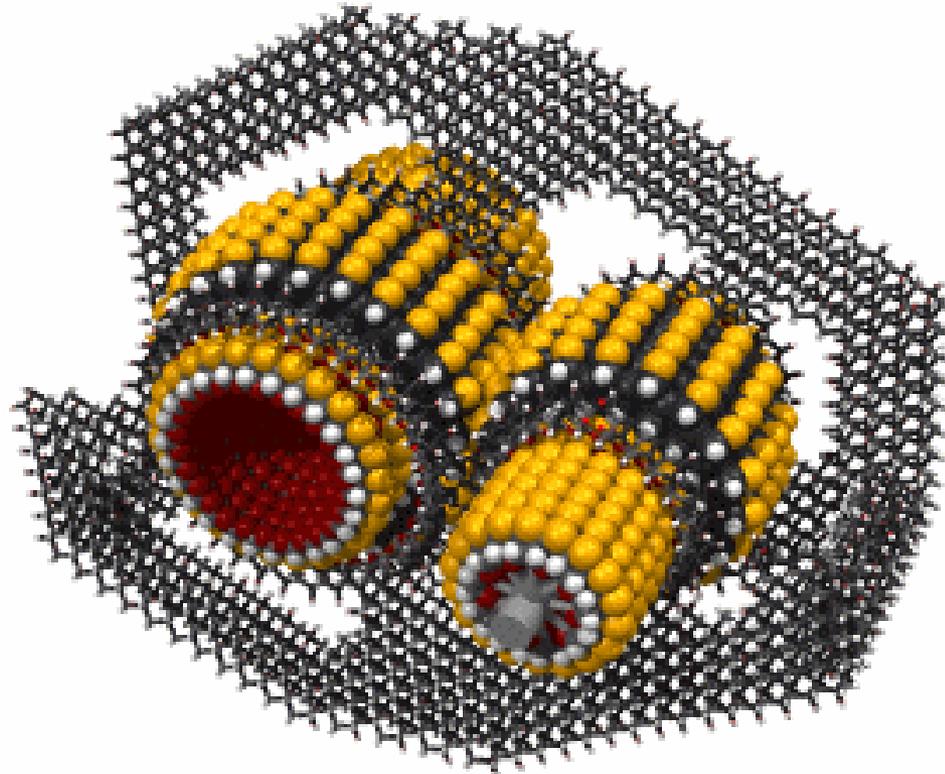


Altri esempi ed applicazioni si possono trovare sul sito www.sandia.gov



Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.

Approccio Bottom Up Costruzione di nanomacchine

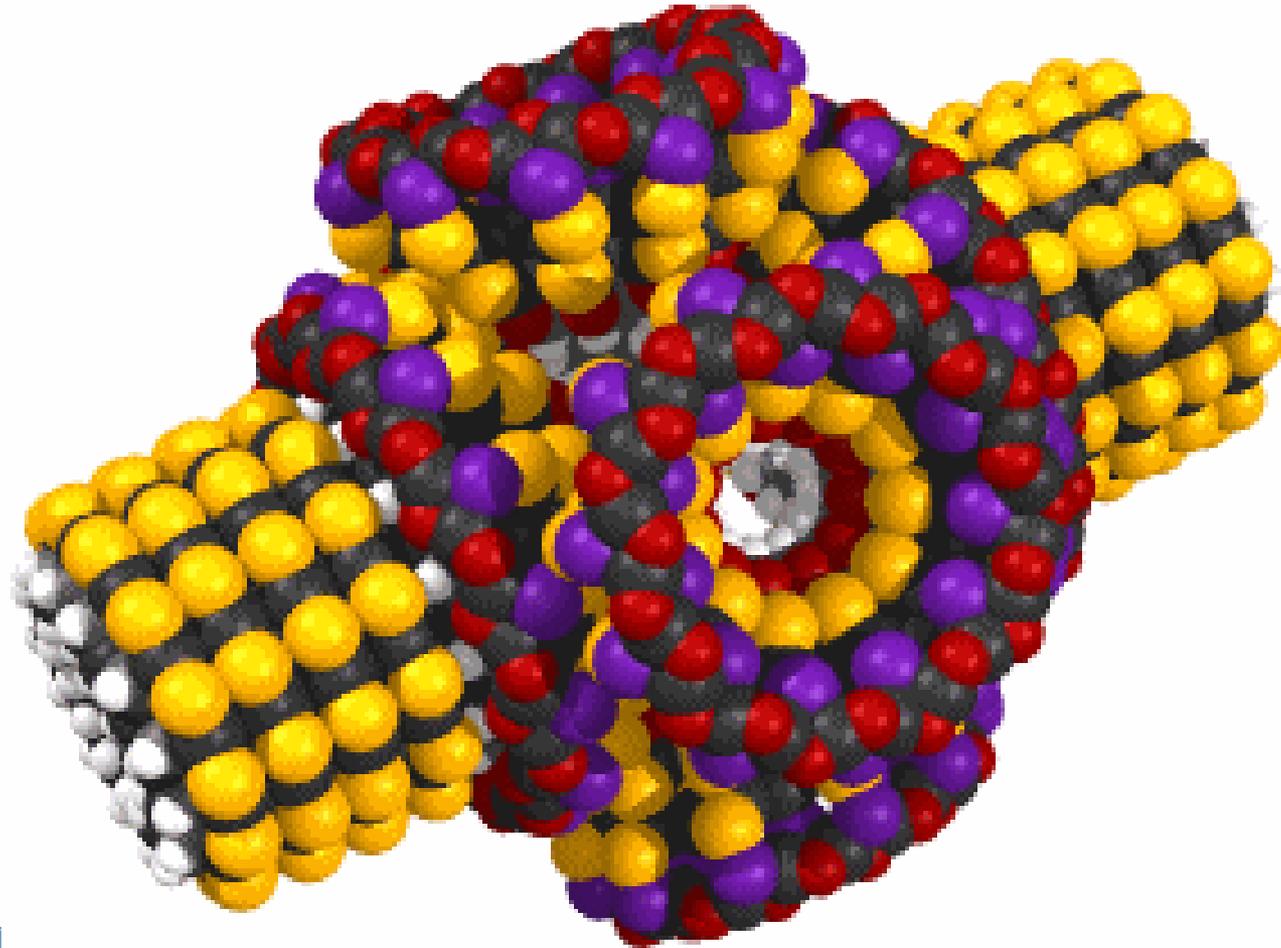


Un nano-riduttore di velocità, ogni sfera rappresenta un atomo.

Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.



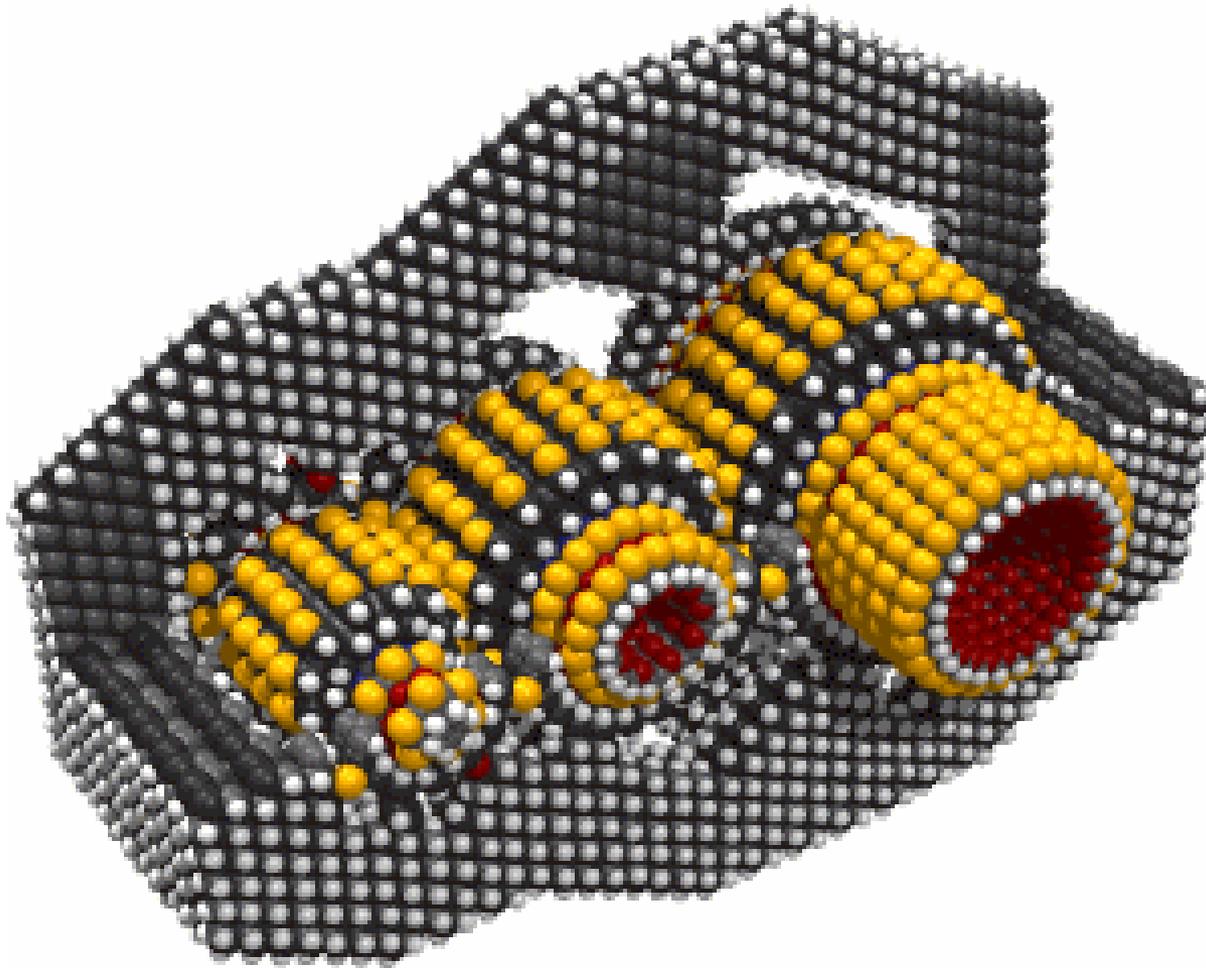
Un nano-differenziale



Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.



Un nano-riduttore di velocità a tre assi



Per ulteriori esempi www.imm.org

Marco Anni Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione Università del Salento, Lecce.



Nano-elevator

