

International Summer School CSR 2025, Lecce 14-19 Luglio 2025

«Forme del Rischio, Intelligenza Artificiale e Limiti del Diritto»

Rischio Tecnologico e IA nella Tecnologia dei Semiconduttori

Prof. Nicola Lovergine

Dip. di Ingegneria dell'Innovazione

Università del Salento



**UNIVERSITÀ
DEL SALENTO**

Mercoledì 16.07.2025, 9:00–11:00

PARTE I

- **I MATERIALI SEMICONDUCTORI (una storia di Nobel)**
- **APPLICAZIONI (il futuro è NANO!)**
- **TECNOLOGIE DI SINTESI/FABBRICAZIONE**
- **COMPETENZE RICHIESTE & FIGURE PROFESSIONALI**
- ***Il Laboratorio di «Fisica e Tecnologia dei Semiconduttori»***

PARTE II

- **INNOVAZIONE NEI SEMICONDUCTORI**
 - ☐ Il Ciclo «Naturale» dell'Innovazione
 - ☐ Dalla Ricerca alla Produzione: Attività di R&D & Fasi di Sviluppo
 - ☐ Fabbricazione, Performance & Costi: Il Difficile Equilibrio
- **IL RISCHIO DELL'INNOVAZIONE NEI SEMICONDUCTORI**
 - ☐ Rischio Intrinseco: «la sopravvivenza del più forte» – Case Study I
 - ☐ Rischio Metodologico: «troppa fiducia fa male» – Case Study II

PARTE III

- **RUOLO DELLA IA NELLA MITIGAZIONE DEL RISCHIO**
 - ☐ Accelerare le Fasi dell'Innovazione attraverso la IA
 - ☐ Primi Esempi
 - ☐ Le Figure Professionali del Futuro
- ***CONSIDERAZIONI FINALI: Il ruolo dell'Università nel settore***





PARTE I

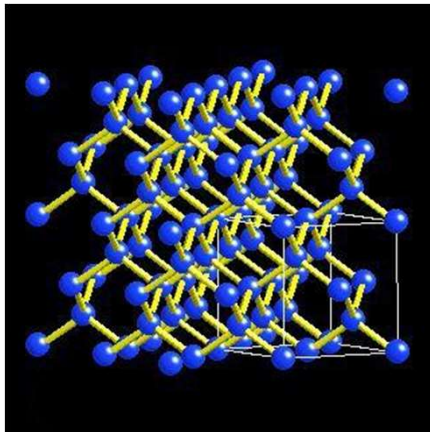
Semiconduttori, Applicazioni e Tecnologie

I SEMICONDUTTORI sono alla base della tecnologia elettronica ed optoelettronica:

- **Proprietà elettroniche differenti da quelle dei metalli e degli isolanti**
- **Buona/ottima capacità di assorbire o emettere luce**
- **Materiali inorganici in forma cristallina (per lo più)**

DEFINIZIONE DI CRISTALLO

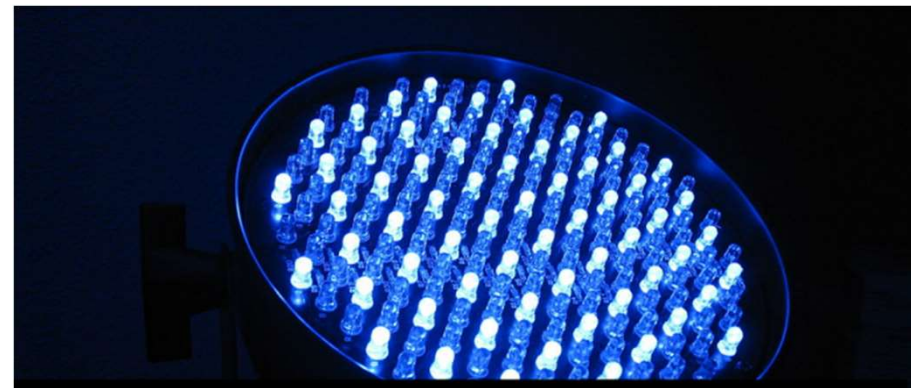
Solido con ***disposizione periodica & ordinata degli atomi*** costituenti a formare una struttura reticolare, che rispetta specifiche ***proprietà di simmetria***



Si cristallino
(struttura del diamante)

EMISSIONE DI LUCE

Un semiconduttore emette luce tramite un fenomeno chiamato ***elettroluminescenza***



Array di LED a base di GaN
con emissione nel blu-UV

Semiconduttori Inorganici Elementari

PERIODIC CHART OF THE ELEMENTS

INERT
GASES

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	INERT GASES		
1 H 1.00797														1 H 1.00797	2 He 4.0026		
3 Li 6.939	4 Be 9.0122										5 B 10.811	6 C 12.0112	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.183	
11 Na 22.9898	12 Mg 24.312										13 Al 26.9815	14 Si 28.086	15 P 30.9738	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
19 K 39.102	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.90	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.71	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.22	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (99)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4	47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30
55 Cs 132.905	56 Ba 137.34	*57 La 138.91	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	†89 Ac (227)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)									

Gruppo IV

Numbers in parenthesis are mass numbers of most stable or most common isotope.

Atomic weights corrected to conform to the 1963 values of the Commission on Atomic Weights.

The group designations used here are the former Chemical Abstract Service numbers.

* Lanthanide Series

58 Ce 140.12	59 Pr 140.907	60 Nd 144.24	61 Pm (147)	62 Sm 150.35	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.924	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
--------------------	---------------------	--------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	--------------------	--------------------

† Actinide Series

90 Th 232.038	91 Pa (231)	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (249)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (256)	103 Lr (257)
---------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Semiconduttori Inorganici Composti

PERIODIC CHART OF THE ELEMENTS

IA

IIA

IIIB

IVB

VB

VIB

VII B

VIII

IB

IIB

IIIA

IVA

VA

VIA

VIIA

INERT GASES

1 H 1.00797															1 H 1.00797	2 He 4.0026	
3 Li 6.939	4 Be 9.0122															9 F 18.9984	10 Ne 20.183
11 Na 22.9898	12 Mg 24.312															17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.102	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.90	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.71	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.22	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (99)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4	47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30
55 Cs 132.905	56 Ba 137.34	*57 La 138.91	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	†89 Ac (227)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)									

FAMIGLIE

{

IV-IV

II-VI

III-V (III-N)

FAMIGLIE

IV-IV

II-VI

III-V (III-N)

Numbers in parenthesis are mass numbers of most stable or most common isotope.

Atomic weights corrected to conform to the 1963 values of the Commission on Atomic Weights.

The group designations used here are the former Chemical Abstract Service numbers.

* Lanthanide Series

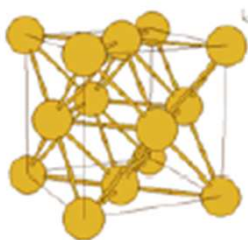
58 Ce 140.12	59 Pr 140.907	60 Nd 144.24	61 Pm (147)	62 Sm 150.35	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.924	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
--------------------	---------------------	--------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	--------------------	--------------------

† Actinide Series

90 Th 232.038	91 Pa (231)	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (249)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (256)	103 Lr (257)
---------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

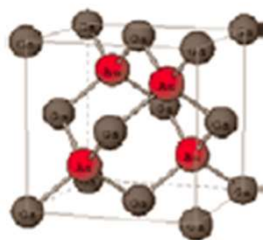
Esempi di Materiali Semiconduttori

Ge



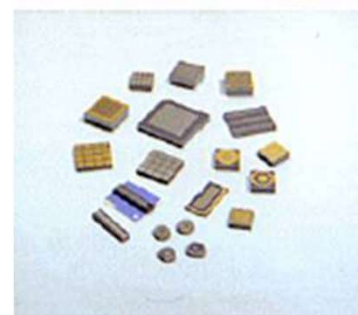
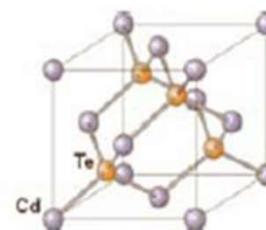
- $Z = 32$
- $\delta = 5.32 \text{ g/cm}^3$
- $E_{\text{gap}} = 0.74 \text{ eV}$
- $E_{\text{eh}} = 2.98 \text{ eV}$

GaAs



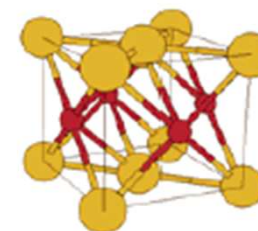
- $Z = 31-33$
- $\delta = 5.32 \text{ g/cm}^3$
- $E_{\text{gap}} = 1.42 \text{ eV}$
- $E_{\text{eh}} = 4.35 \text{ eV}$

CdTe-CdZnTe



- $Z = 48-52$
- $\delta = 6.06 \text{ g/cm}^3$
- $E_{\text{gap}} = 1.46 \text{ eV}$
- $E_{\text{eh}} = 4.43 \text{ eV}$

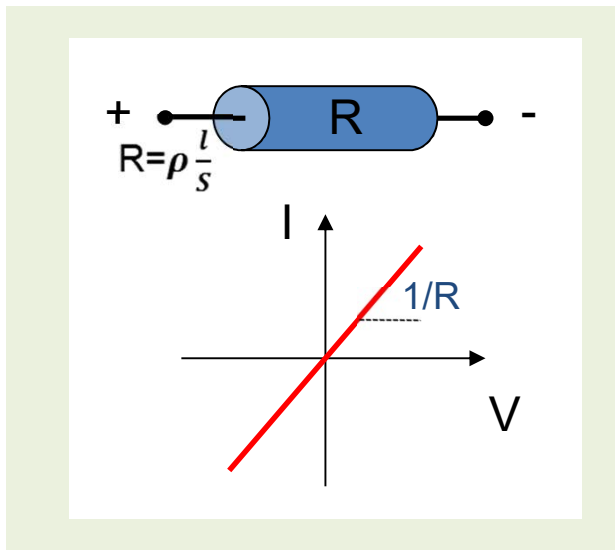
HgI₂



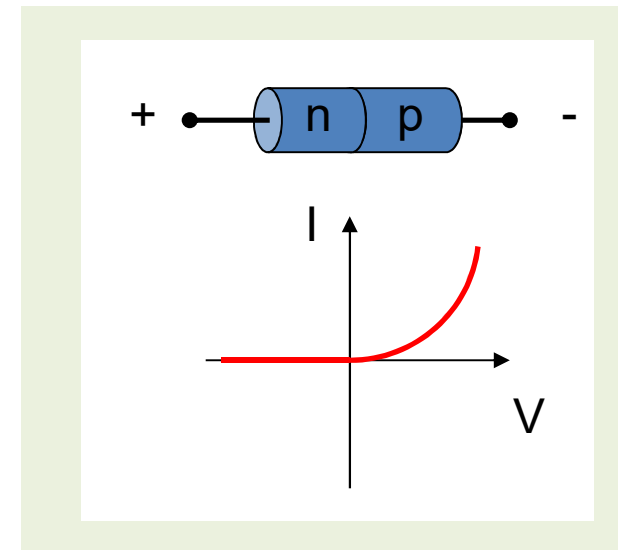
- $Z = 80-53$
- $\delta = 6.30 \text{ g/cm}^3$
- $E_{\text{gap}} = 2.13 \text{ eV}$
- $E_{\text{eh}} = 4.22 \text{ eV}$

A cosa servono i semiconduttori?

- Fabbricazione di dispositivi quali **diodi** e **transistor**, sia come componenti discreti, che in circuiti integrati (**micro-processori**)



**Comportamento Ohmico
(RESISTORE)**

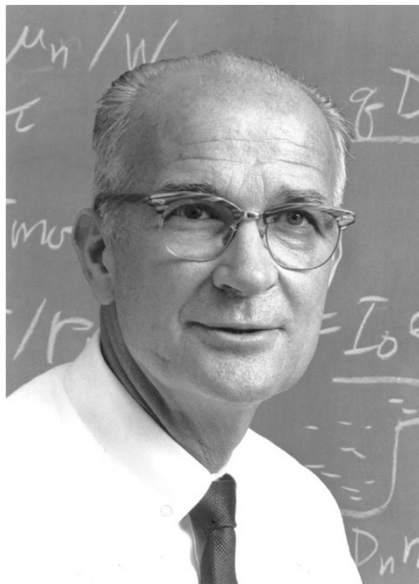


**Comportamento rettificante
(**DIODO**)**

- Fabbricazione di dispositivi in grado di emettere (**LED, diodi laser**) oppure assorbire (**fotodiodi, celle solari**) la luce E MOLTO ALTRO !!

I semiconduttori in MICROELETTRONICA

UN PO' DI STORIA: il primo ***transistor a semiconduttori*** basato su Germanio è stato realizzato nel 1948 da *William Shockley*, *Walter Brattain* e *John Bardeen* presso i Bell Labs (USA). Nel 1956, i tre ricercatori furono insigniti del **Premio Nobel per la Fisica** *«per le loro ricerche sui semiconduttori e per la scoperta dell'effetto transistor»*



William Shockley



John Bardeen



Walter Brattain

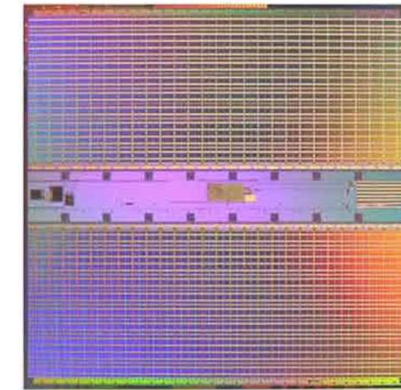


Il primo transistor

MICRO-ELETTRONICA

DISPOSITIVI CON SEGNALE DI INGRESSO ED USCITA
TOTALMENTE ELETTRICO (corrente o tensione)

Diodi, Transistor, Generatori T.E.



OPTO-ELETTRONICA

DISPOSITIVI IN GRADO DI ASSORBIRE
O EMETTERE LUCE (segnale elettrico o ottico)

LED, Diodi Laser, Celle Solari, ecc.

SENSORISTICA

DISPOSITIVI RIVELATORI DI RADIAZIONI, GAS,
TEMPERATURA, ecc.

Termistori, Detector, ecc.



Esempio I : MICROELETTRONICA

CIRCUITI INTEGRATI basati su Si (a partire dagli anni '70):

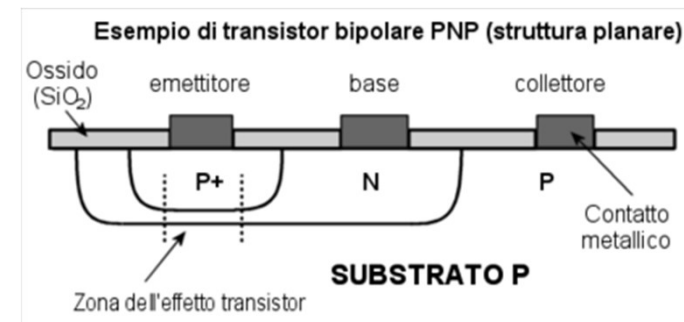
Un circuito integrato (o **micro-chip**) è un circuito elettronico miniaturizzato realizzato su un opportuno substrato (di norma Si) che può essere contenere fino a parecchie **centinaia di milioni di componenti elettronici elementari** (transistor, diodi, condensatori,)



*Federico Faggin,
INTEL
(Tecnologia MOS)*

TRANSISTOR: dispositivo elettronico a tre terminali con funzioni di:

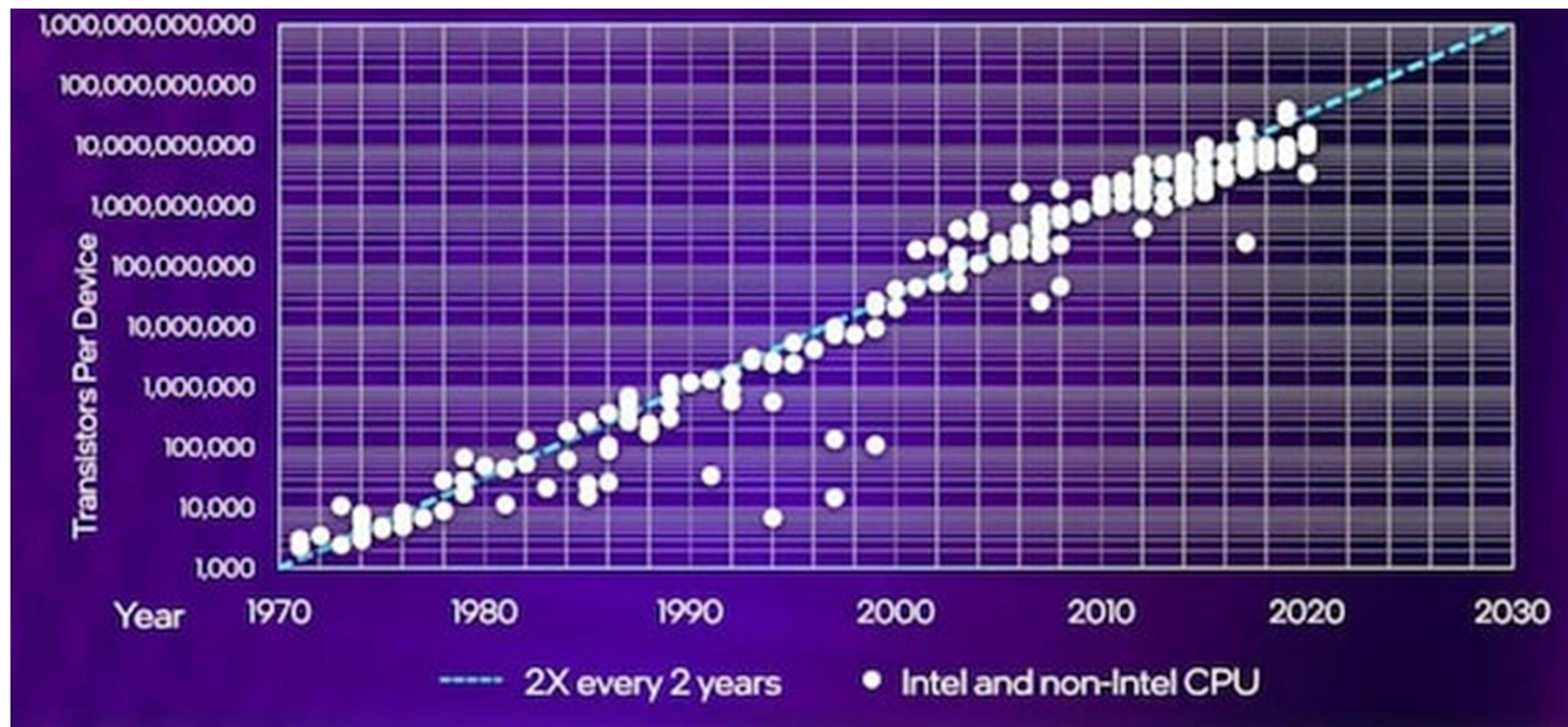
- **Amplificazione** (corrente/tensione)
- **Interruttore** (on/off) di un segnale di corrente/tensione



Esempio I : MICROELETTRONICA

Legge di Moore: (osservazione empirica)

«il numero di transistor su un circuito integrato (o chip) raddoppia approssimativamente ogni due anni, mantenendo un costo di produzione relativamente costante»



Esempio II : OPTOELETTRONICA

LED (Light Emitting Diode): diodo emettitore di luce spontanea

Vantaggi rispetto alle lampadine a filamento:

- minori consumi, più lunga durata
- maggiore robustezza e compattezza
- minori dimensioni e risposta più veloce

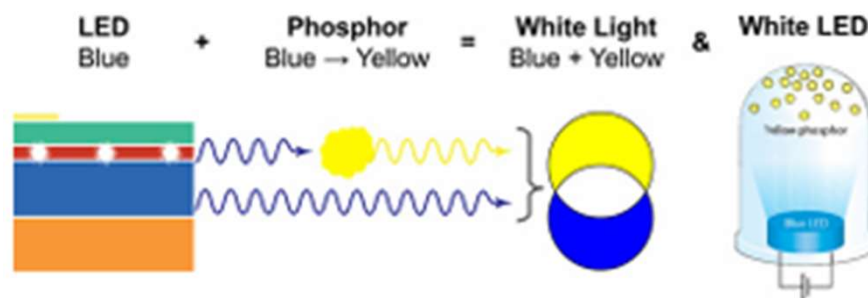
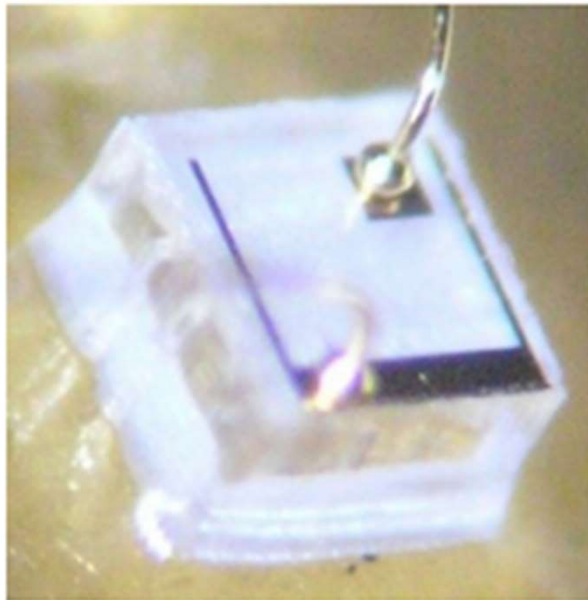
White-LED (illuminazione)

- Combinazione dei colori primari **RGB**
- LED rossi e gialli disponibili dagli anni '70
- LED con emissione nel BLU disponibili solo da partire dalla fine degli anni '90

*Nuova tecnologia LED basata su GaN
(emissione nel blu/UV) a partire dal 1995*



I semiconduttori per l'OPTOELETTRONICA BLU-UV (la rivoluzione degli anni 2000)



Shuji Nakamura

Nobel Prize in Physics 2014

*“for the invention of **efficient blue light-emitting diodes** which has enabled **bright and energy-saving white light sources**”*

Esempio II : OPTOELETTRONICA

SETTORE AUTO



Luci frontali



ILLUMINAZIONE

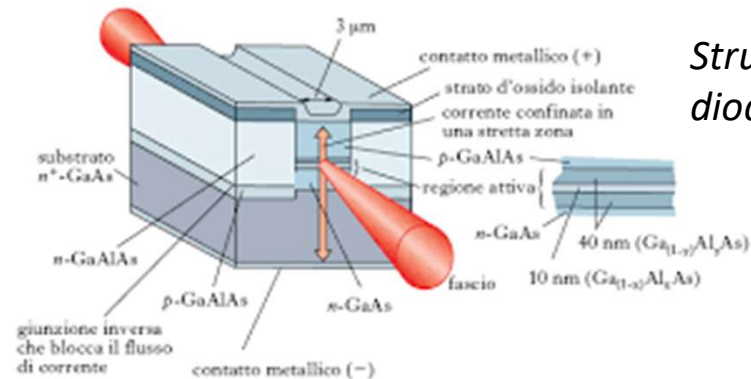


DISPLAY A COLORI (back-light)



Telefonia mobile, pc, laptop, tv, ecc.

Esempio II : OPTOELETTRONICA



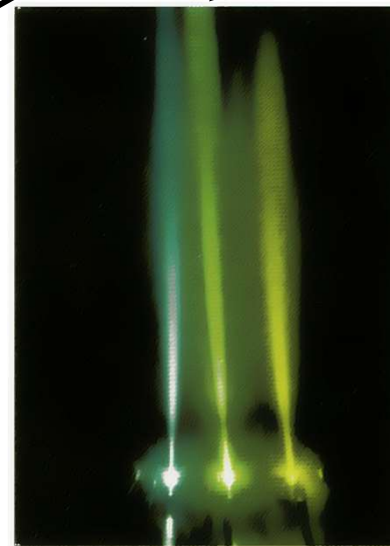
Struttura di un
diodo laser IR

Diodi Laser
nel **Blu**, **Verde**, **Rosso**, & **IR**



Lettori di CD/DVD

870 nm → Standard
440 nm → Blue-Ray



560 nm
Proiettori

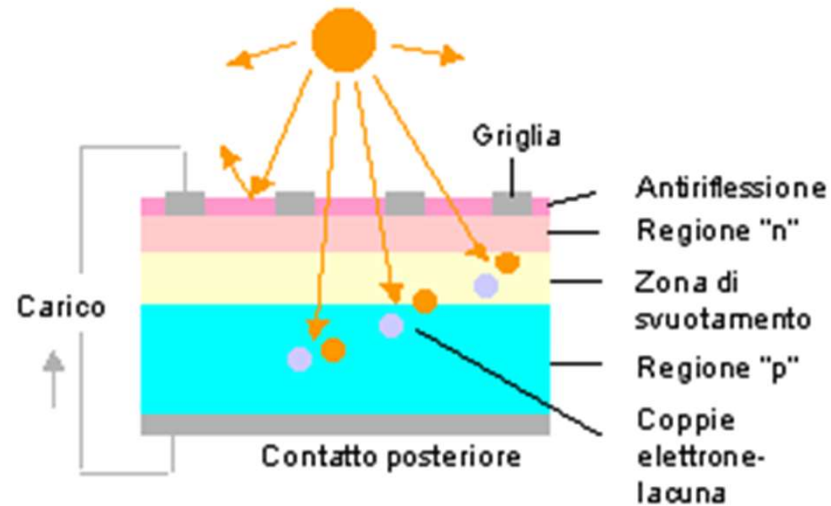
TLC
in fibra ottica
1.5 μm

Esempio III : FOTOVOLTAICO

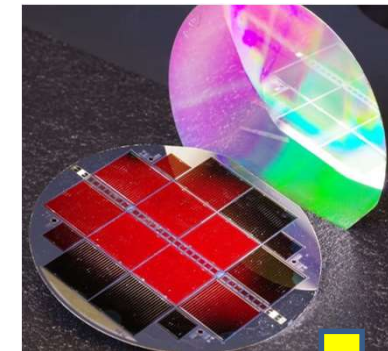
Cella FV di Si



Pannelli FV (uso terrestre)

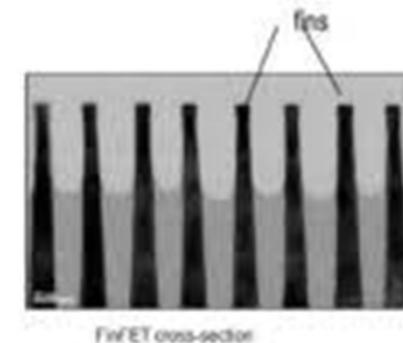
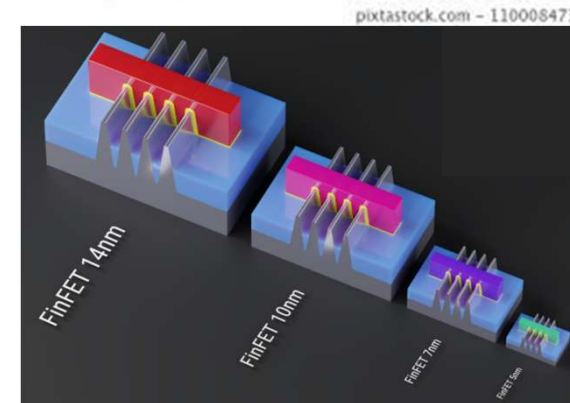
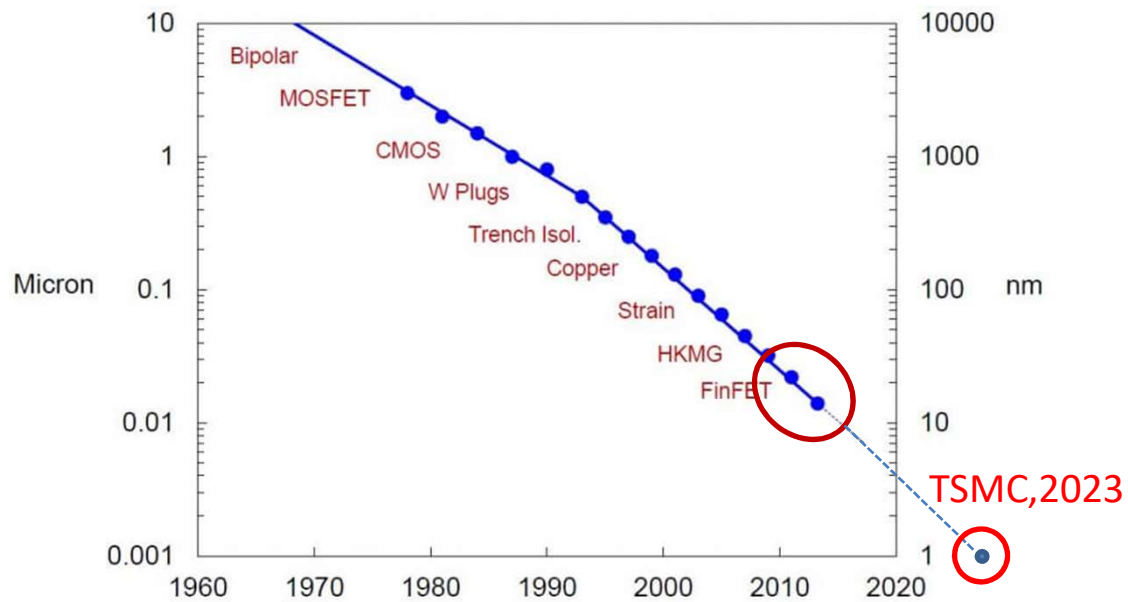


Cella FV di III-V



Pannelli FV (uso spaziale)

DIMENSIONI DEI TRANSISTOR NEI CHIP



RIDUZIONE DELLE DIMENSIONI DEI TRANSISTOR:

- **Più densi**
- **Più veloci**
- **Più efficienti (meno energivori)**

APPLICAZIONI dei S.C. (SEMPRE PIU' NANO!)

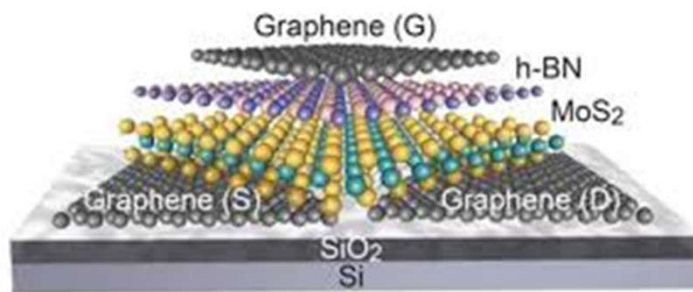
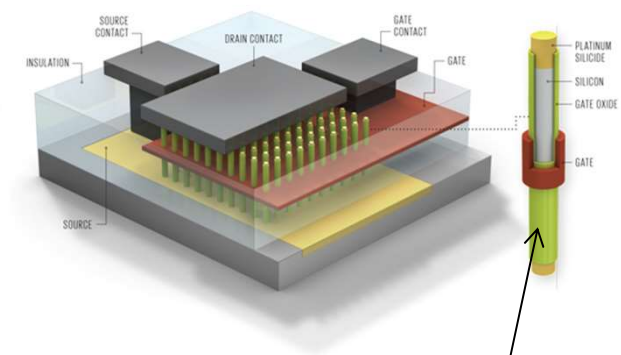


UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

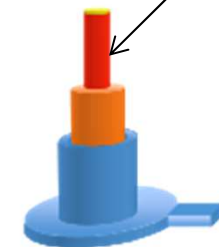
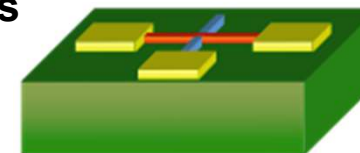
IL PROSSIMO FUTURO: MATERIALI ALLA NANOSCALA !

Riduzione delle dimensioni e maggior densità →

Type	Bulk	FinFET	Nano-sheet	2D-TMD	Nano-wire	CNT
Structure						
L_{MIN}^* (nm)	25-30	2.5-3 W_{FIN}	2.5 T_{CH}	2.5 T_{CH}	1.5 d_W	1.5 d_{CNT}



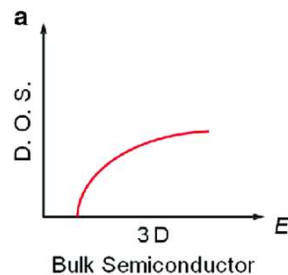
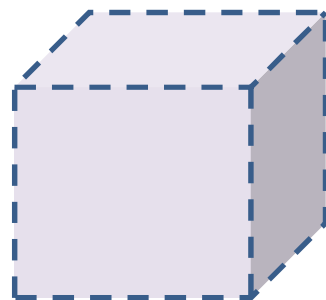
Crossed and vertical NW FETs



Nanowire

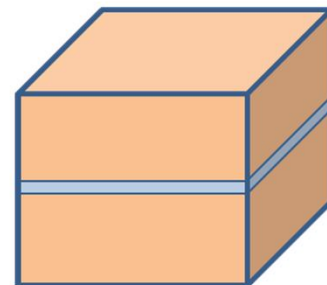
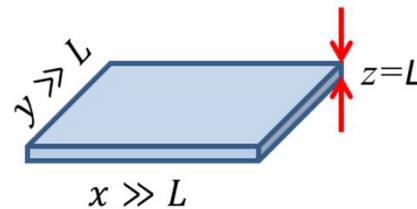
NANO-CRYSTAL: A semiconductor crystal having a *reduced-dimensionality*
($L, L', L'', L''' \sim$ De Broglie wavelength for electrons/phonons)

BULK CRYSTAL

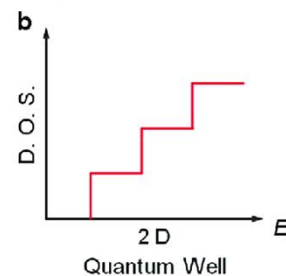


(DOS: Density of States)

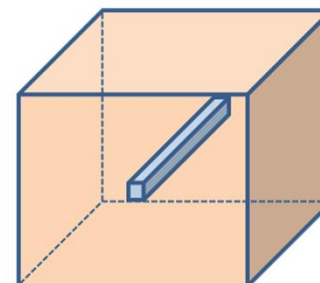
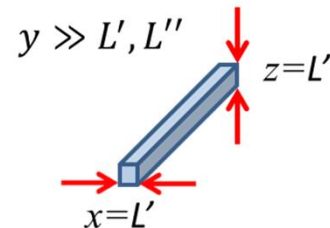
**2D nanocrystal
(nanosheet)**



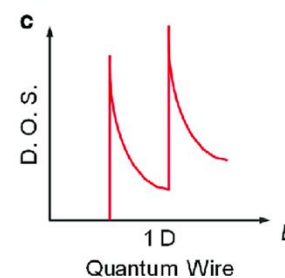
Quantum Well



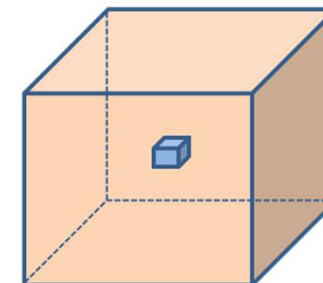
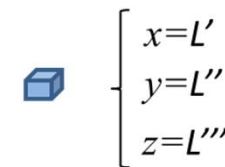
**1D nanocrystal
(nanowire)**



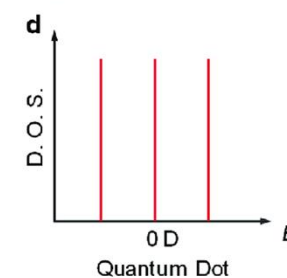
Quantum Wire



**0D nanocrystal
(nanoparticle)**

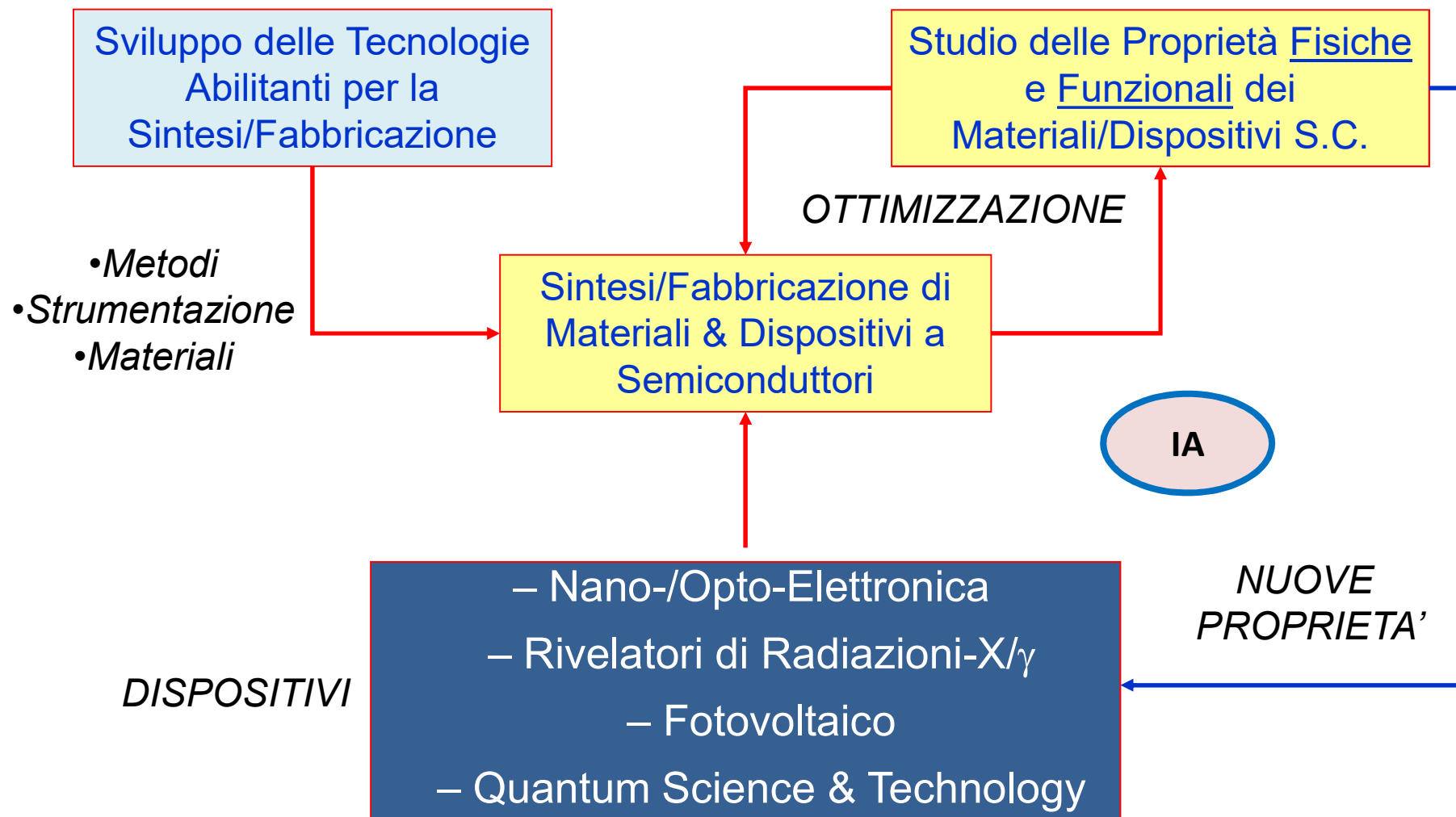


Quantum Dot



QUANTUM CONFINEMENT

IL CICLO di R&D (INNOVAZIONE ATTRAVERSO LA CONOSCENZA)



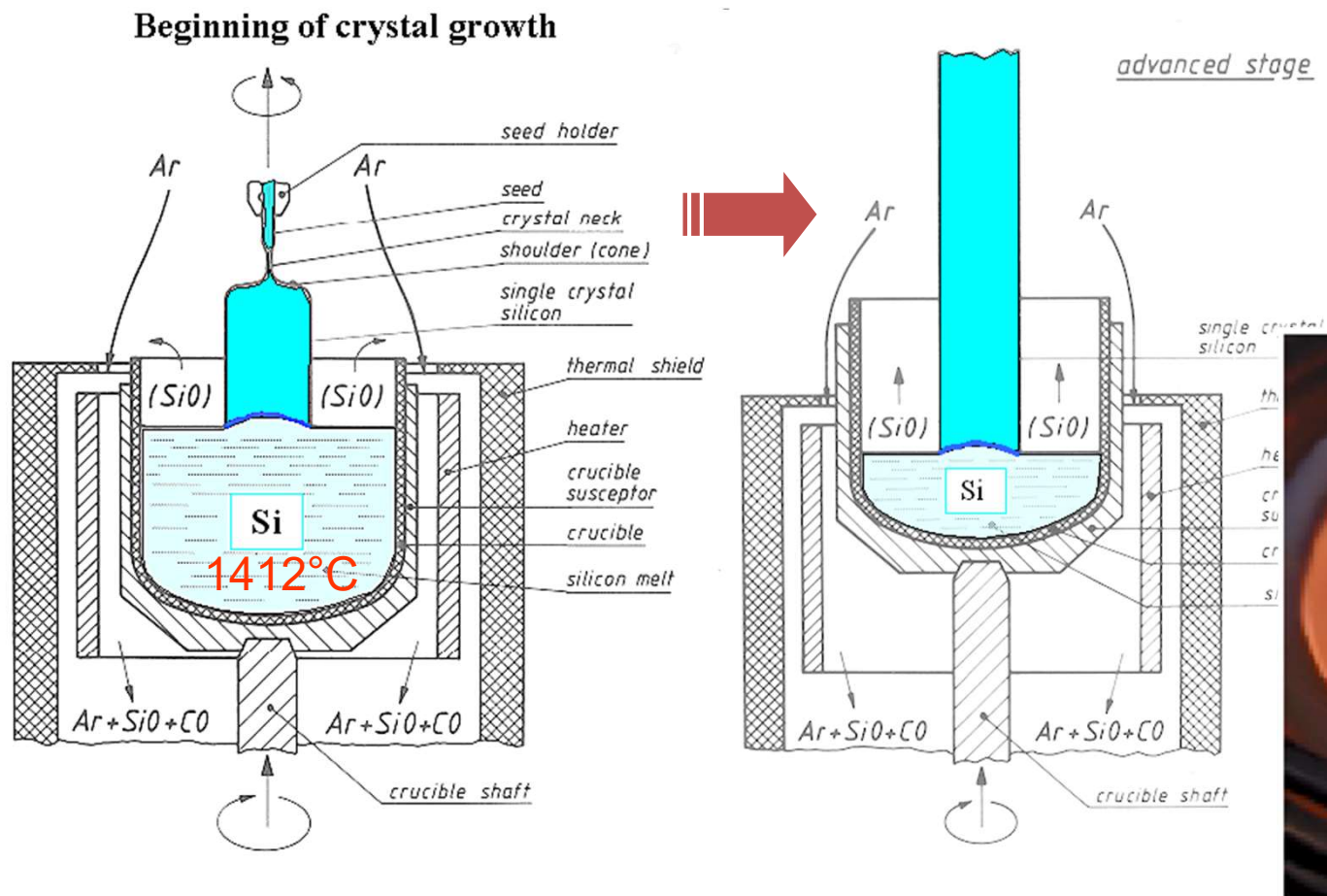
Sintesi/Fabbricazione di Cristalli Semiconduttori

La tecnologia cambia secondo la 'dimensione' richiesta

- Cristalli di volume (3D)
 - Peso: 100 g ÷ 100 kg o più
- Strati 'sottili' cristallini (*epistrati*) (2D)
 - Spessore: 100 nm ÷ 100 μ m
- *Nanocristalli* (2D, 1D, 0D)
 - 1, 2 o 3 delle loro dimensioni < 100 nm

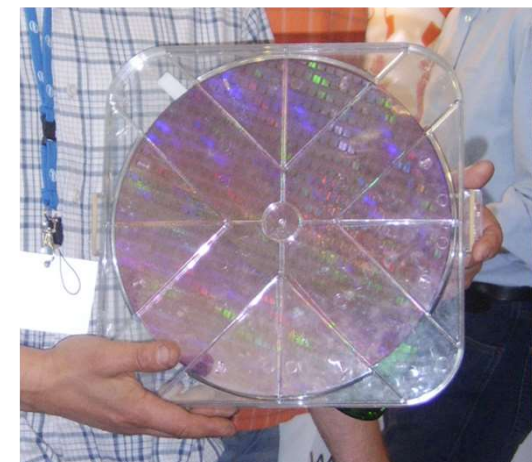
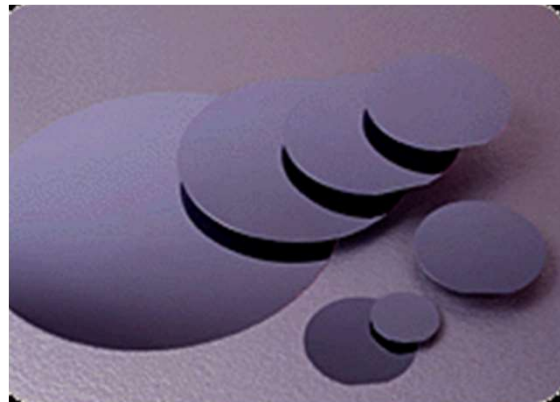
Metodi di Crescita di Cristalli di Volume

CRESCITA DAL 'FUSO' per TIRAGGIO



Cristalli di Volume (3D)

Si

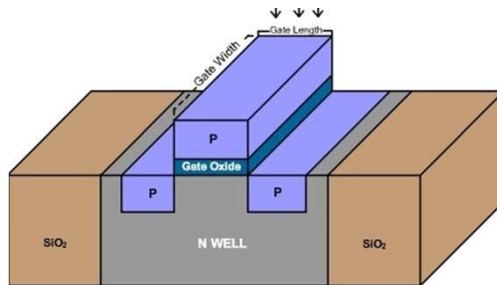


LINGOTTO DI Si-mc

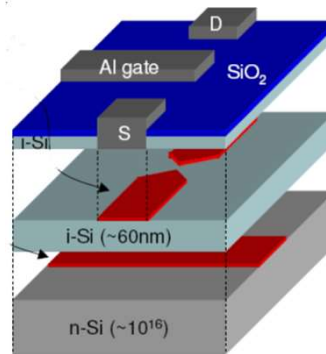
Strati 'sottili' cristallini (epistrati) (2D)

Si MICRO-ELECTRONICS

HOMOEPITAXY



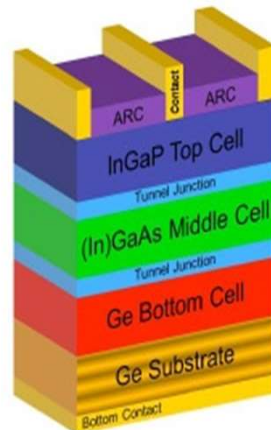
PNP Transistor



HIGH-EFFICIENCY PHOTOVOLTAICS

HOMO- & HETERO-EPITAXY

Ge & III-Vs



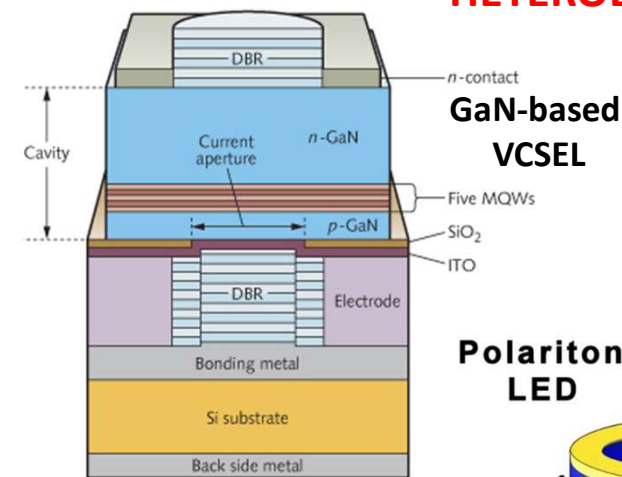
TJ Cell

MONOLITHIC APPROACH

III-Vs

COMPOUND S.C. PHOTONICS

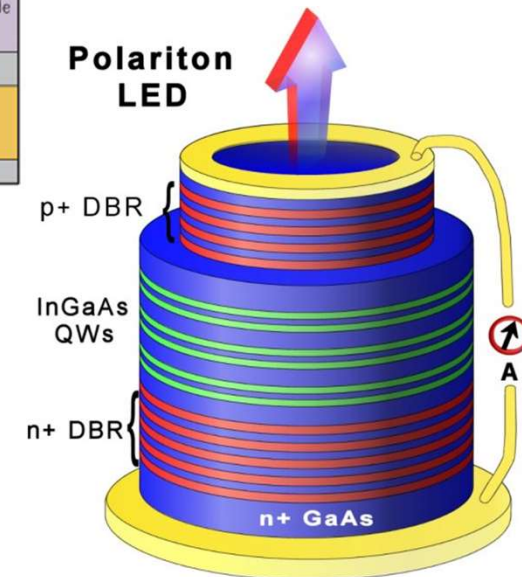
HETEROEPITAXY



GaN-based
VCSEL

III-Ns

Polariton LED



Nature **453**, 372-375 (2008)

Esempio di Struttura Epitassiale

**STRATI SPESSI DI CdTe SU GaAs
PER LA FABBRICAZIONE DI
RIVELATORI DI RADIAZIONE-X
(ENERGIA 1-100 keV)**

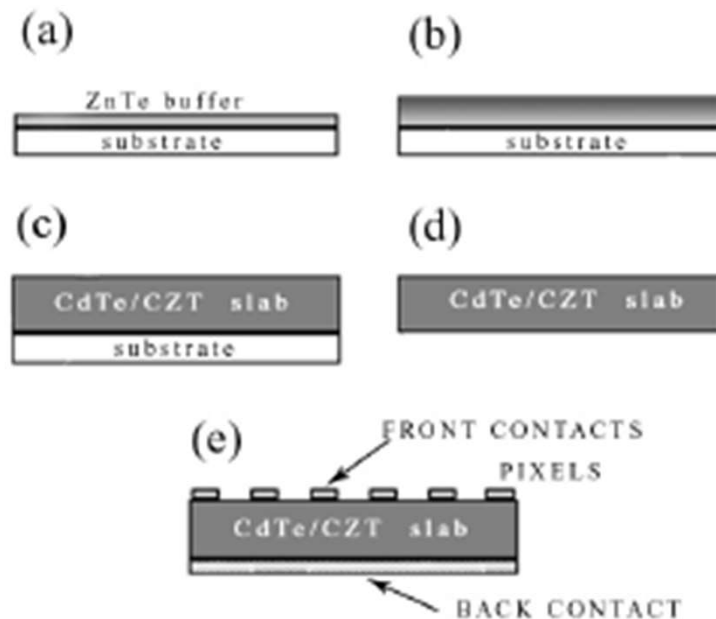
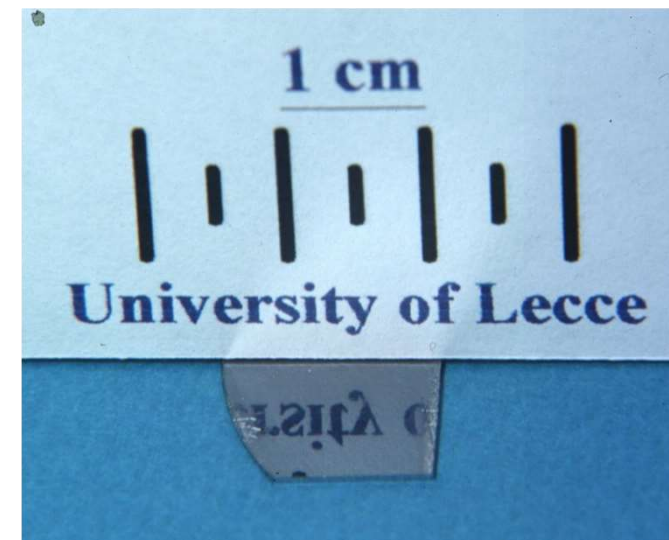
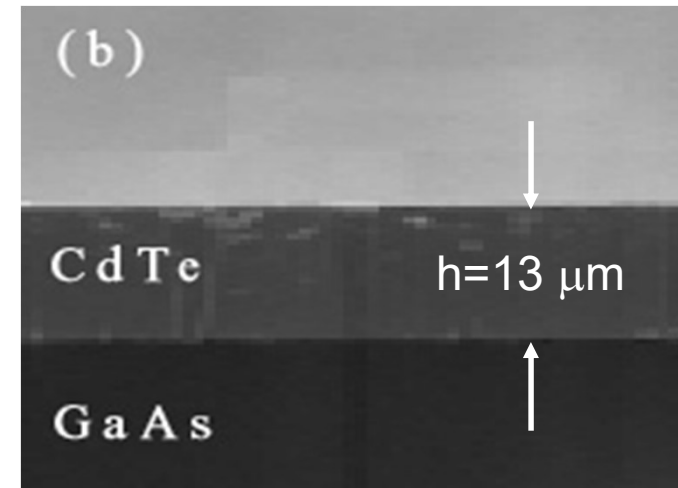


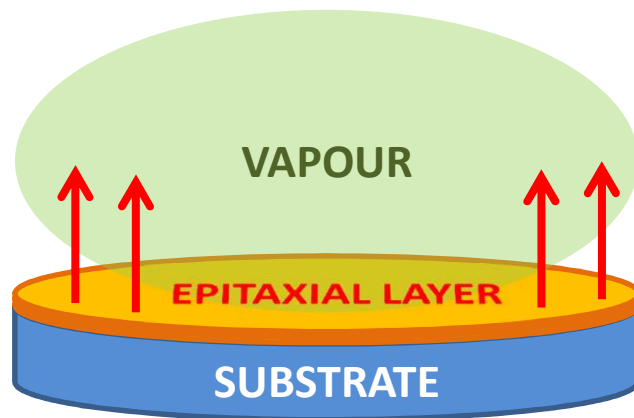
Fig. 1. Schematic of CdTe/CZT epitaxial detector fabrication steps: (a) Growth of the ZnTe buffer layer by MOVPE; (b) H_2T -VPE nucleation of the CdTe/CZT layer and alloying with buffer; (c) growth of thick epitaxial CdTe/CZT slab; (d) substrate removal by mechano-chemical thinning and etching; (e) deposition of planar back contact and pixellated front contacts.



Strati 'sottili' cristallini (epistrati) (2D)

EPITASSIA DA FASE VAPORE (VPE)

ORIENTED CRYSTAL GROWTH BASED ON THE PHASE TRANSITION



VAPOUR = NUTRIENT PHASE

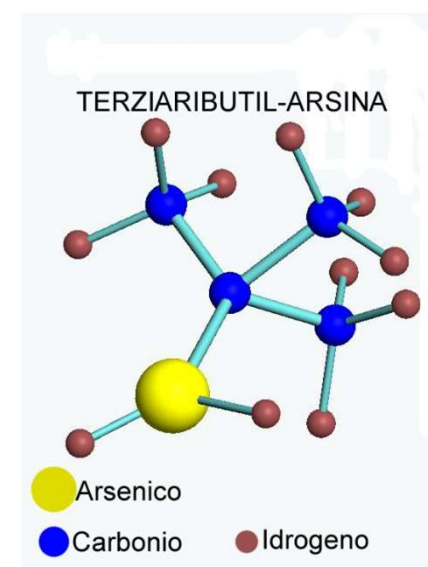
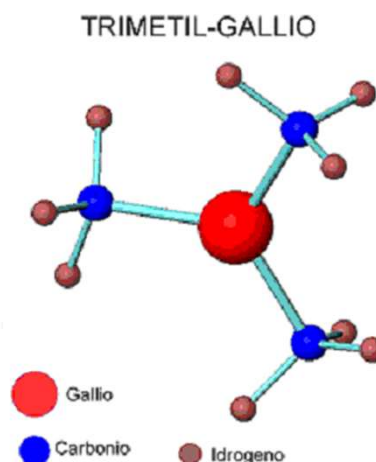
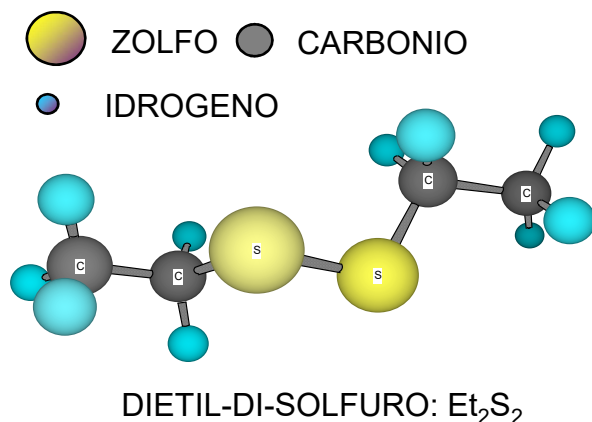
EPILAYER = GROWING CRYSTAL

SUBSTRATE = SEED

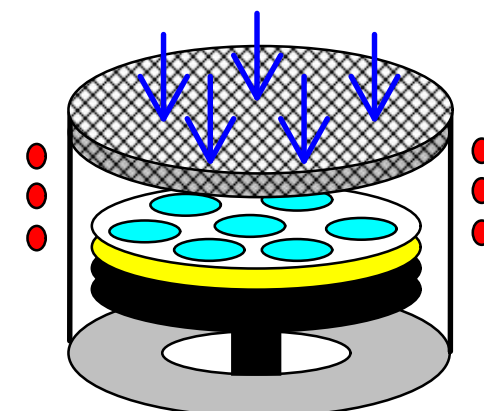
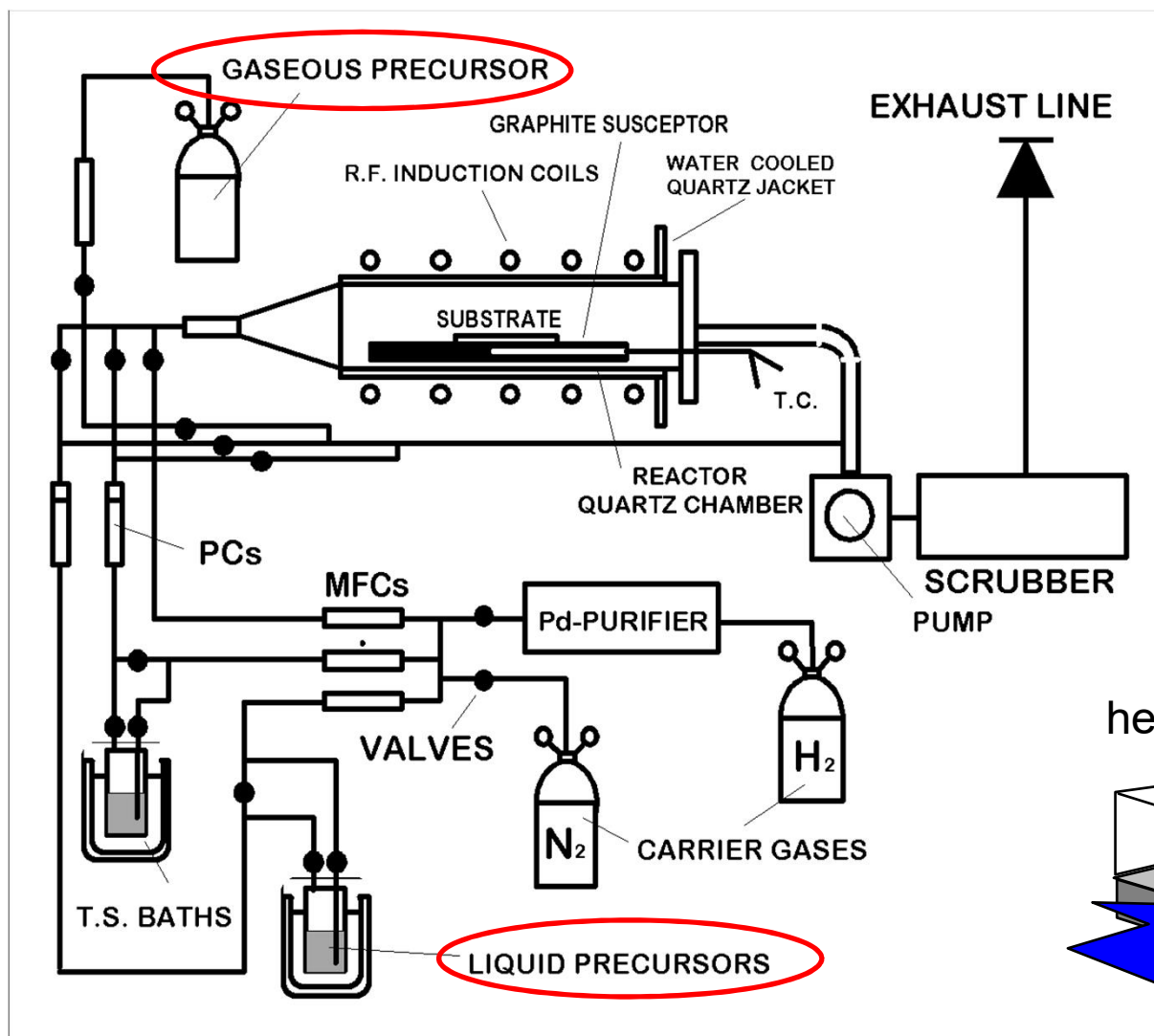
VAPOUR PHASE CONTAINS ALL **ATOMIC SPECIES** CONSTITUTING THE EPILAYER
CHEMICALLY BOUND INTO SPECIFIC **PRECURSORS MOLECULES** (*REAGENTS*)

Strati 'sottili' cristallini (epistrati) (2D)

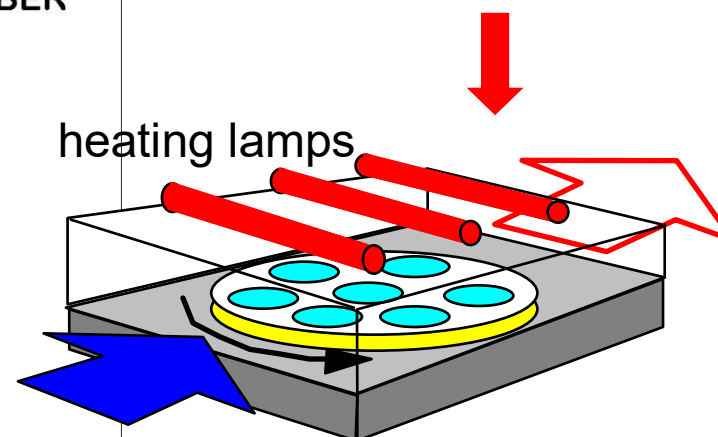
EPITASSIA DA FASE VAPORE (VPE)



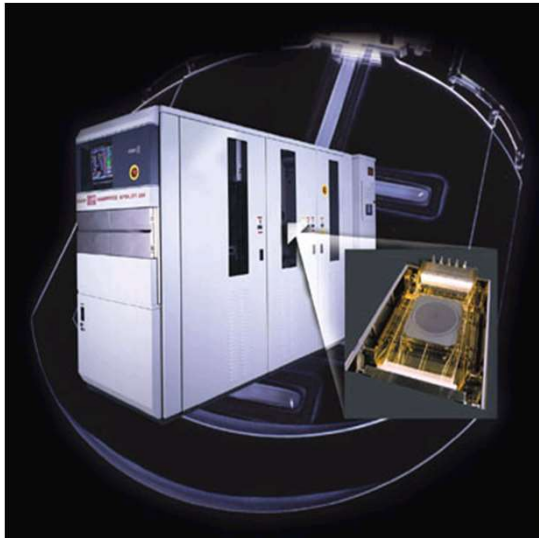
Schema di Reattore VPE



Architettura delle
camere di reazione



Reattori VPE per l'Epitassia del Si



Advance 400/412
LPCVD and oxidation

Epsilon 2000
Si and SiGe epitaxy



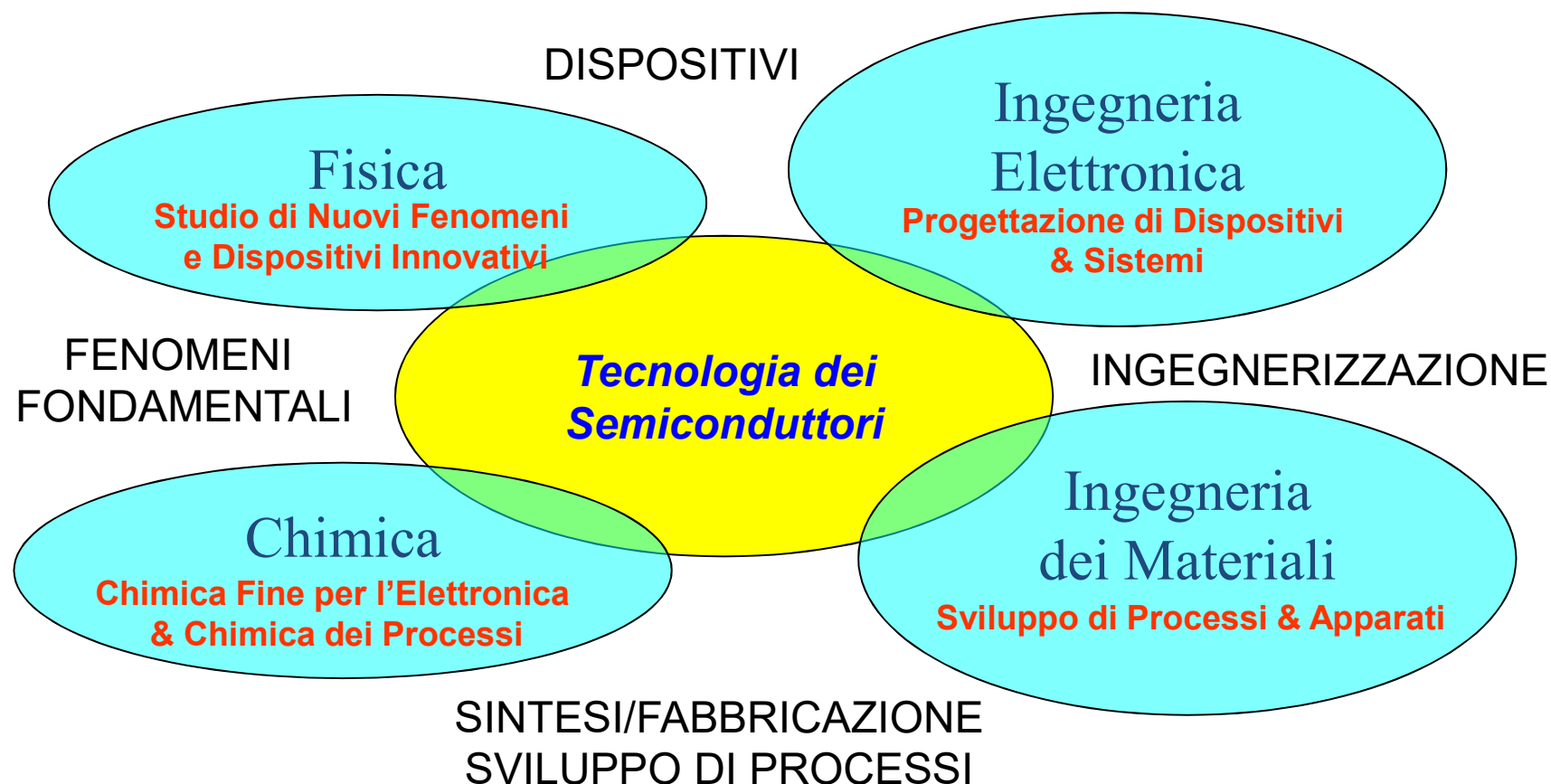
Polygon
RTCVD/ALCVD



Reattori VPE per l'Epitassia del Semiconduttori Composti



LE COMPETENZE RICHIESTE





IMM-CNR



Lab FTS



Università del
Salento



Joint Research Laboratory
Uni-Lecce & IMM-CNR



Gruppo di Ricerca costituito da Fisici, Chimici & Ingegneri



- **III-V & II-VI compounds**
- **Graphene & TMDCs**



- Over 30-years expertise on Semiconductors Technol. & Optoelectronic/Photonic Devices
- Large research track records (>160 published papers)

8 M€ Equipment Lab

- **250 sqm Fully-Equipped Lab Surface**
- **Large Epitaxial Facilities**
 - 3 **MOVPE** Reactors
 - 1 **MBE** Reactor
- **Advanced Characterization Tools (XRD, FE-SEM, PL, CL, 4-tip UHV-SPM)**

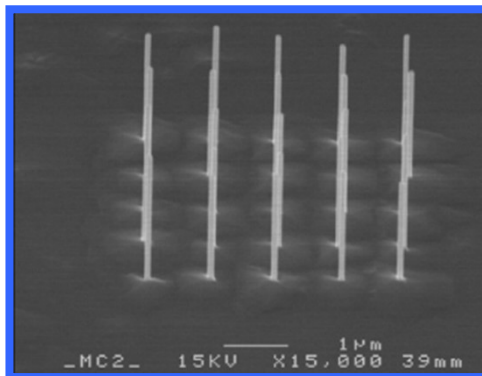
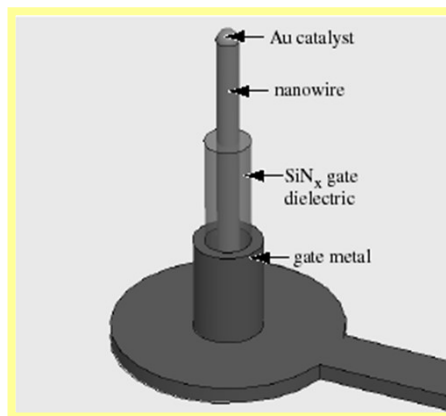
The Research Group

- 2 Academics
- 1 Contract Researcher
- 1 PhD student
- 1 Senior Technologist

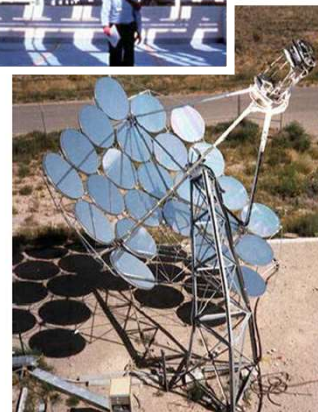
Long-standing International Collaborations
(USA, UK, Germany, Japan)

Studi e Ricerche sulla Fisica & Tecnologia dei Semiconduttori

Nano-/Opto-Elettronica & Quantum Technologies



Fotovoltaico di III Generazione



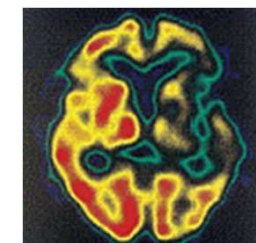
Rivelatori di Radiazioni X/γ



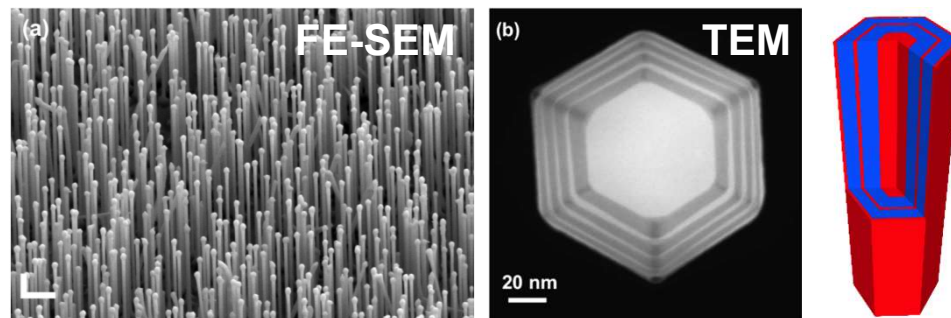
X ray



γ Camera



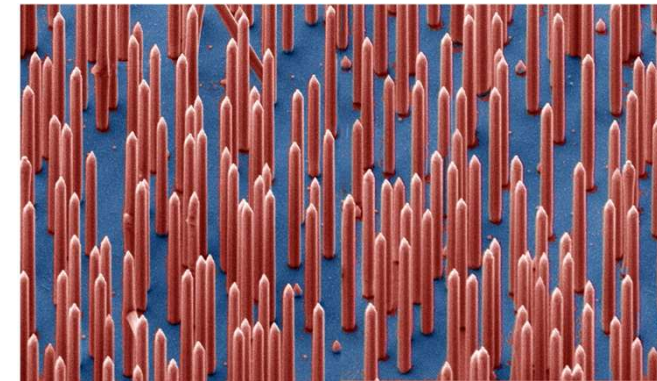
- III-Generation Photovoltaic (PV) Cells based on Thin-Films & Nano-structured Semiconductors (NWs, QDs)
- Nano-scale PV Cells for Direct Integration on Si Chips
- Fast & Efficient (low-energy consumption) Photo-Detectors



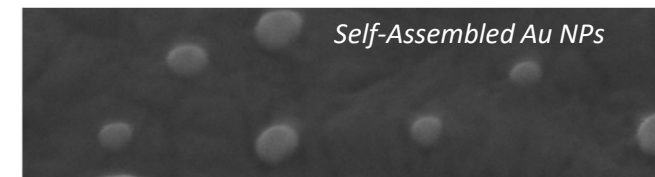
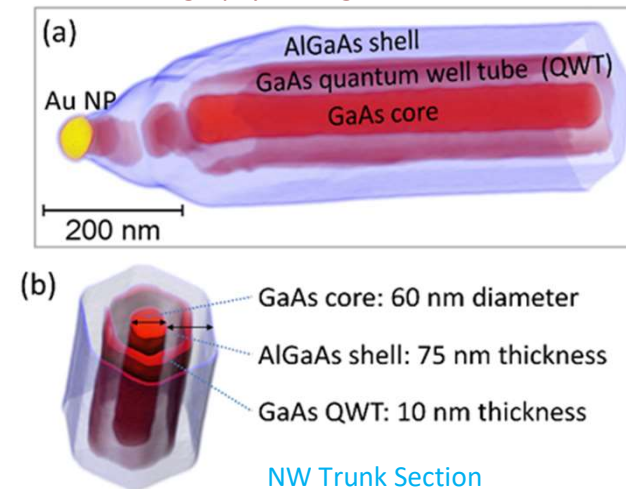
Types of Collaboration

- Research Projects on PV R&D
- Industrial Contracts (materials characterization)
- PhD-student Training/Exchange
- Industrial-PhD Course Programmes *in the fields of semiconductor nano-technol. & nano-devices for PV*

GaAs-AlGaAs core-(multi)shell nanowires on Si

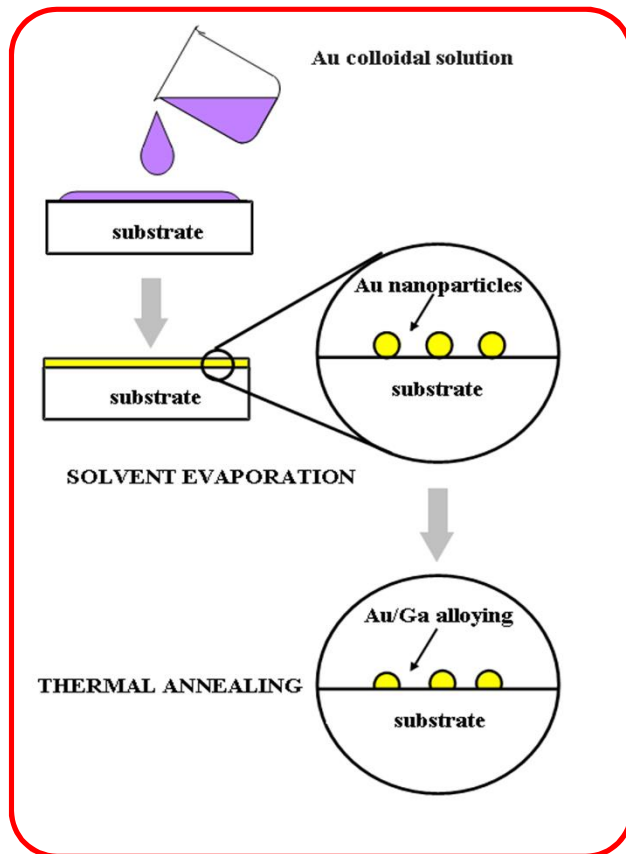


Electron Holography Tomogram

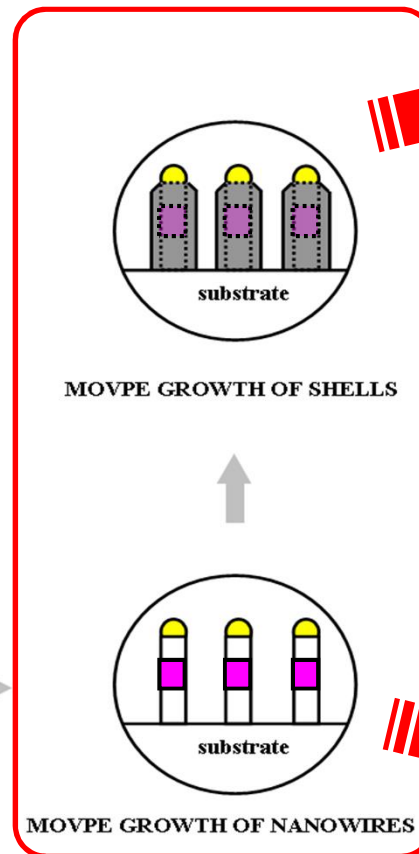


Sintesi di nanowire di semiconduttori III-V mediante «self-assembly»

Au-NP @ Substrate preparation

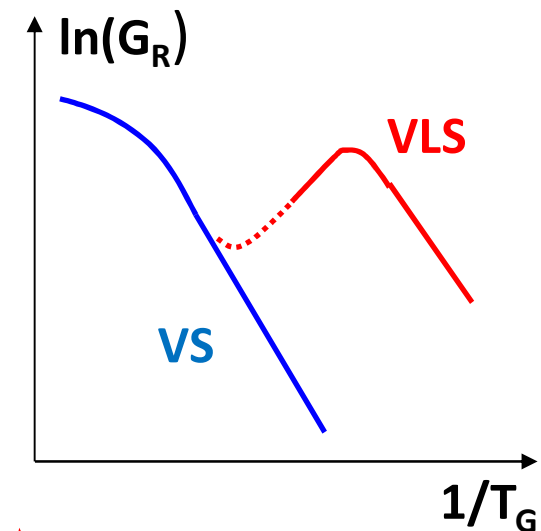


MOVPE



High T

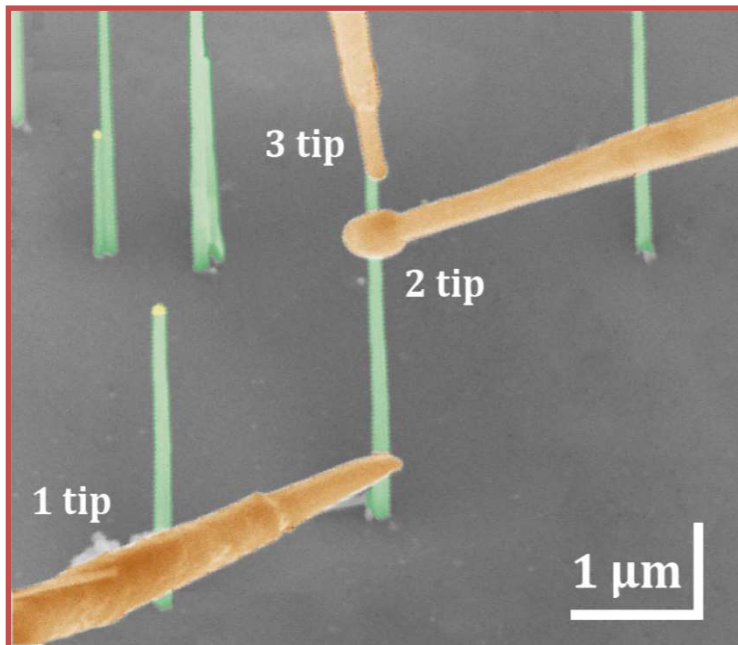
2D (conformal) growth by
conventional MOVPE



Low T

1D (axial) growth by
Vapor-Liquid-Solid (VLS)
mechanism

Sviluppo di Nanofili di Semiconduttori per il FV
Studio & Ottimizzazione Funzionale (alla Nano-Scala)



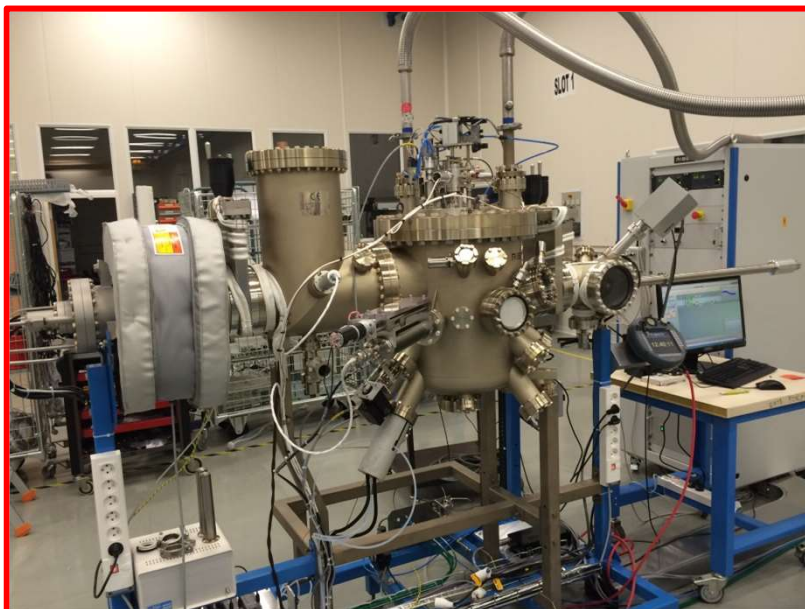
Misure I-V a 3-probe realizzate su singolo nanofilo di GaAs mediante microscopia UHV-SPM - esempio (I. Miccoli - Univ. di Hannover & DII-UniSalento)



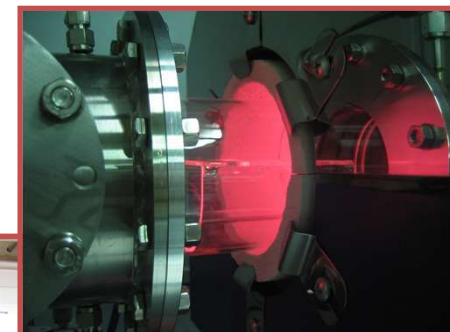
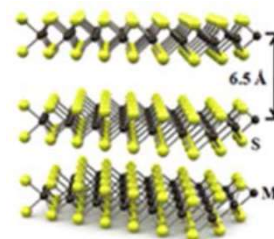
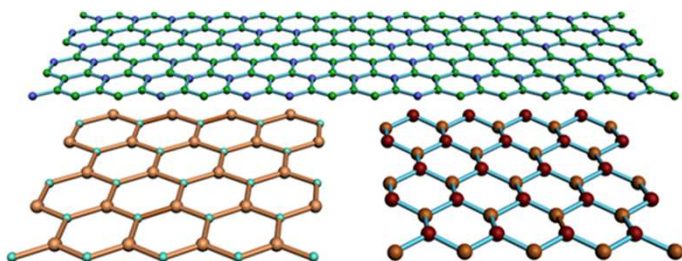
Microscopio a scansione di sonda in condizioni UHV (UHV-SPM) a 4-probe per la caratterizzazione elettrica e foto-elettrica di nano-dispositivi (Rete PHASHYN /Univ. del Salento)

Sviluppo di Nanostrutture Grafene & Composti 'Graphene-like'

Sintesi



Reattore MBE per la sintesi di grafene e semiconduttori 2-dimensionali ('graphene-like')

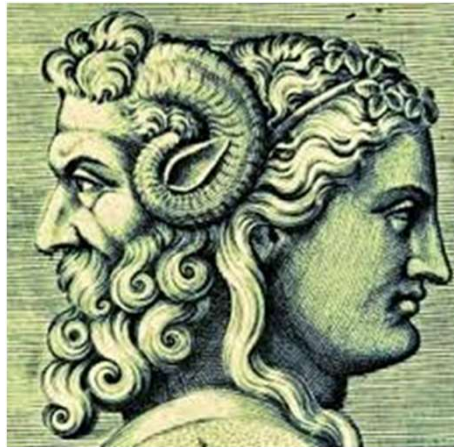


Reattore CVD per la sintesi di grafene e semiconduttori -dimensionali ('graphene-like')

PARTE II:

Innovazione e Rischio Tecnologico nella Tecnologia dei Semiconduttori

NATURA DELL'INNOVAZIONE NELLA TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI



=

INNOVAZIONE DI PRODOTTO

&

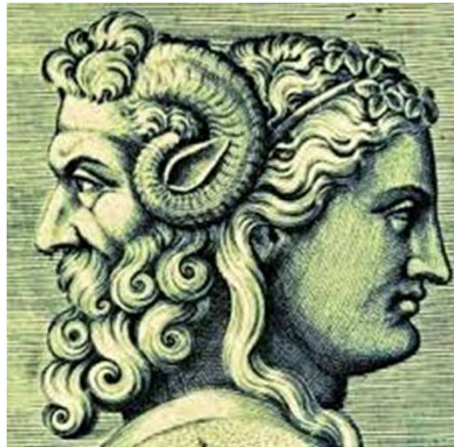
INNOVAZIONE DI PROCESSO

Negli ultimi 50 anni la micro-/opto-elettronica si è sviluppata grazie alla realizzazione di dispositivi sempre più piccoli, ottenuti mediante lo sviluppo di processi di integrazione/miniaturizzazione a larga scala dei dispositivi (processi VLSI/ULSI).

COMBINAZIONE DI:

- Processi di **deposizione controllata via VPE** di strati sottili di semiconduttori
- Metodi di Fabbricazione TOP-DOWN mediante **micro-/nano-litografia & etching**
- Combinazione di **semiconduttori & materiali dielettrici** sempre più performanti

NATURA DELL'INNOVAZIONE NELLA TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI



=

INNOVAZIONE DI PRODOTTO

&

INNOVAZIONE DI PROCESSO

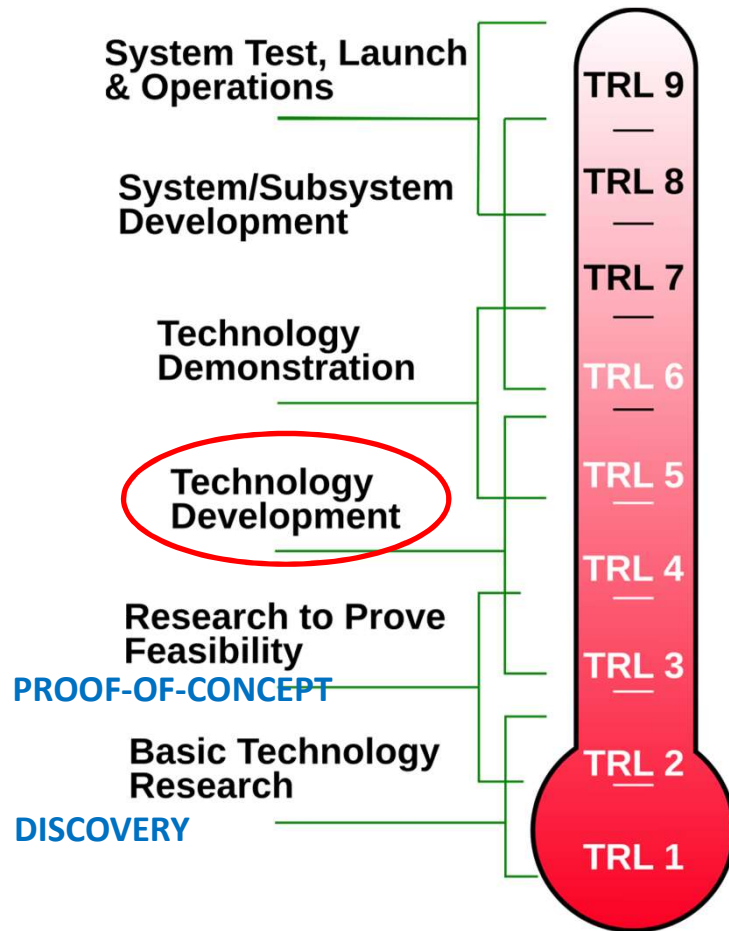
Nei prossimi 50 anni la tecnologia dei semiconduttori continuerà a svilupparsi verso dispositivi sempre più piccoli (**nano-dispositivi**) con architetture sempre più complesse e necessità di **controllare il materiale a livello atomico**.

COMBINAZIONE DI:

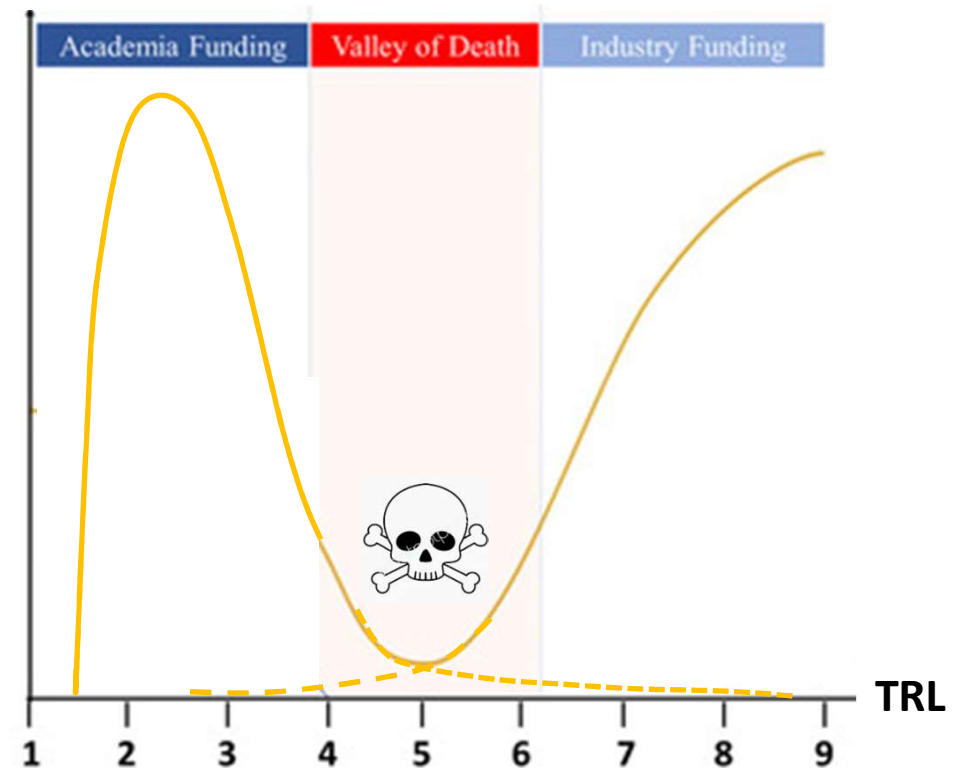
- Processi di **deposizione controllata via VPE** di nanocristalli di semiconduttori
- Metodi di Fabbricazione BOTTOM-UP (**nano-epitassia**) in combinazione di processi **nano-litografici**
- Utilizzo di **semiconduttori & materiali dielettrici con difetti ingegnerizzati**

Il Ciclo «Naturale» dell'Innovazione

Technology Readiness Level (TRL) scale



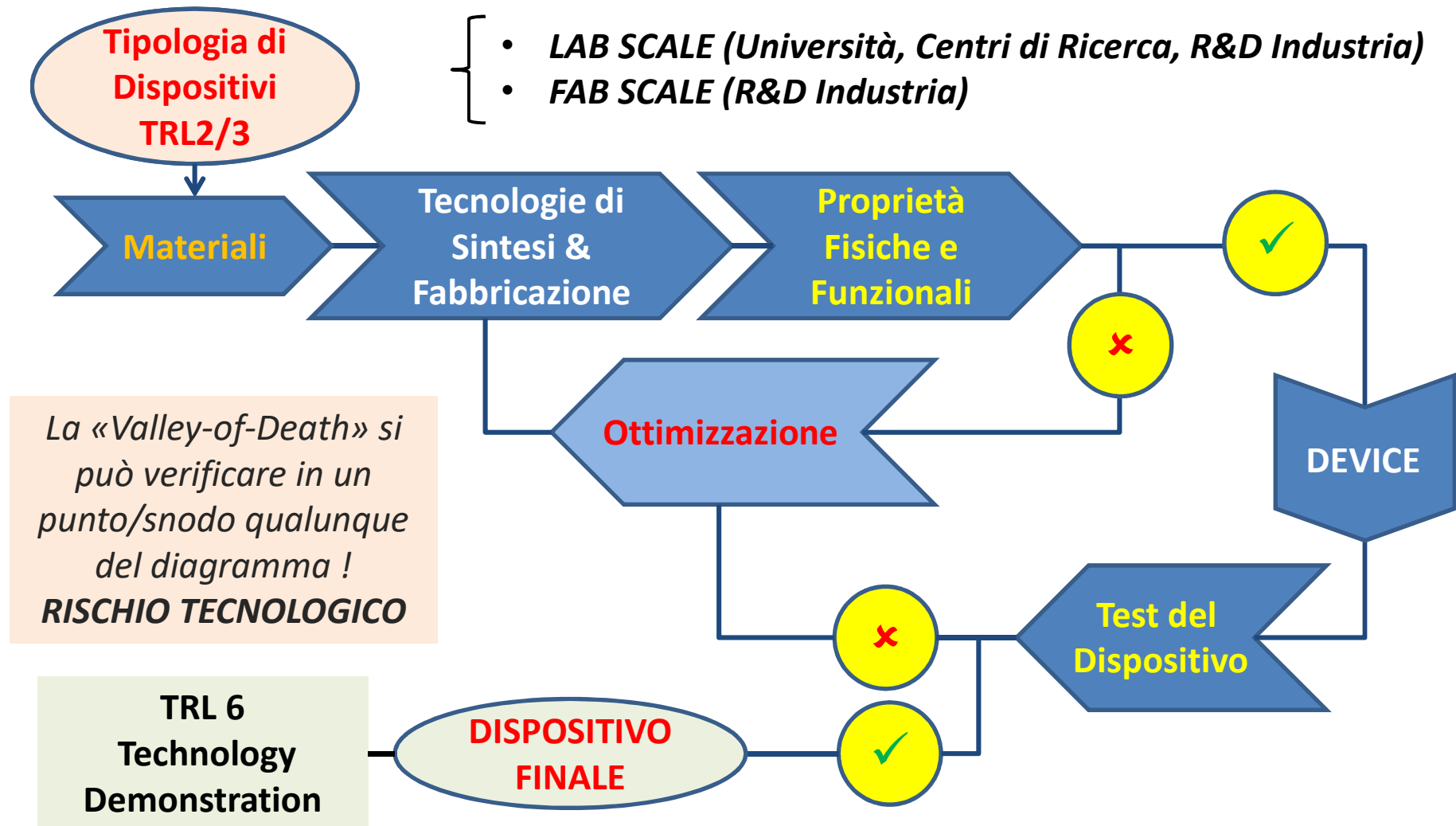
INVESTMENT



A. Rossini, *Bridging the Technological "Valley of Death"*.

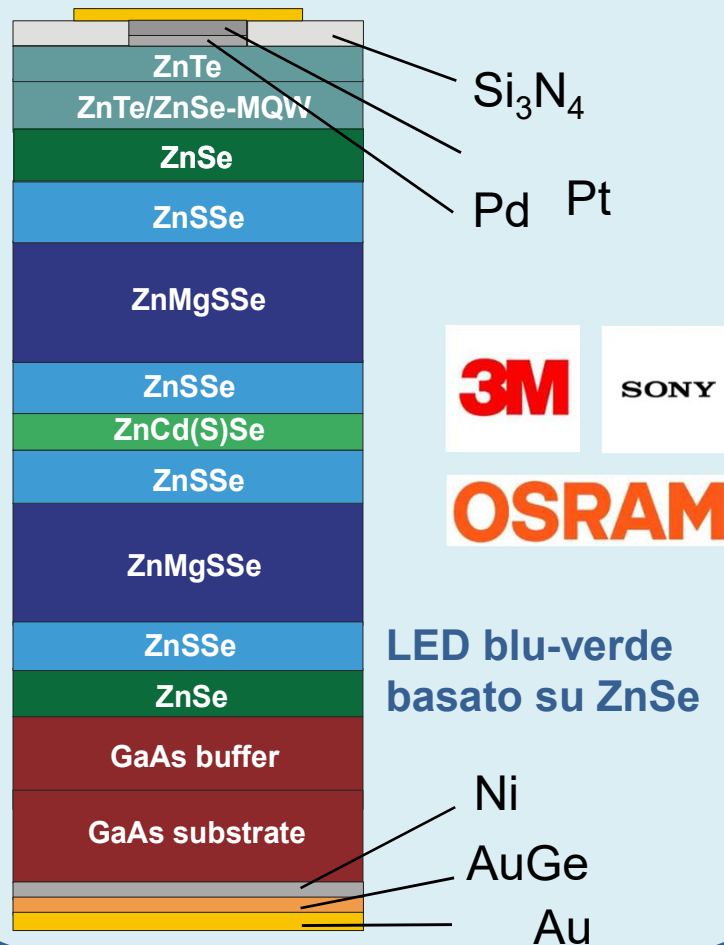
<https://www.pwc.no/en/bridging-the-technological-valley-of-death.html>

Attività di Sviluppo Tecnologico nel Settore dei Semiconduttori

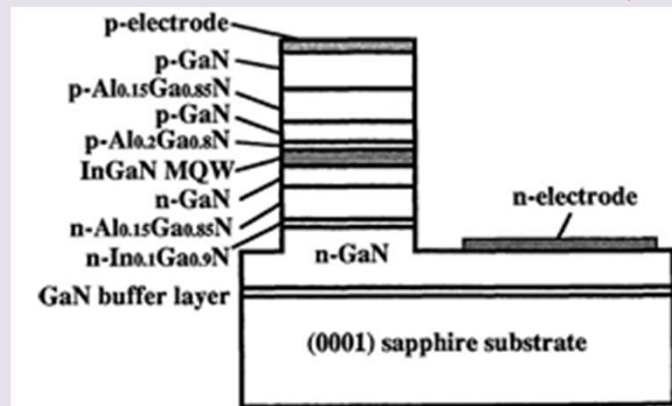


CASO DI STUDIO I : La corsa all'opto-elettronica blu-UV degli anni '90 (ovvero «la sopravvivenza del più forte»)

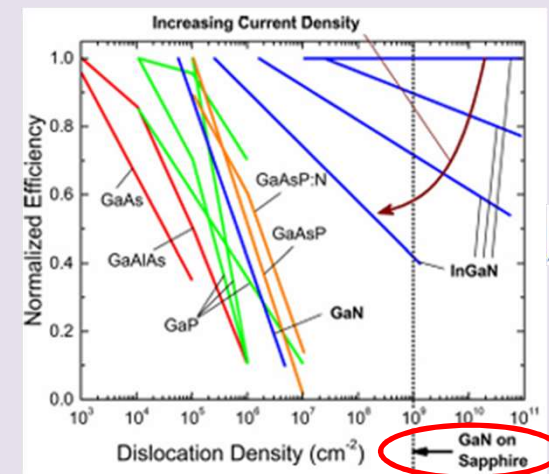
Dimostrato nel 1992 da 3M (USA)



Dimostrato nel 1991 da Nichia (JP)

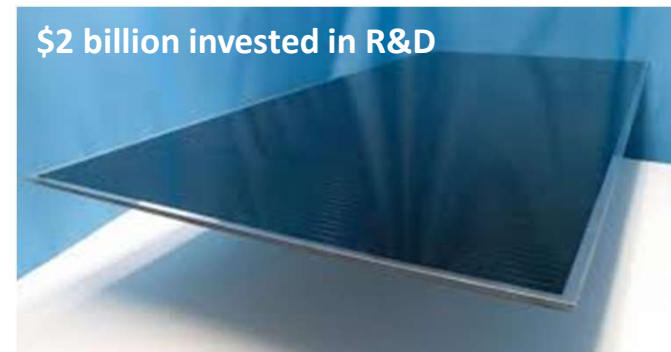
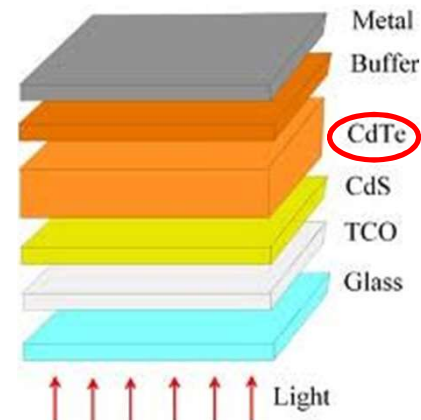
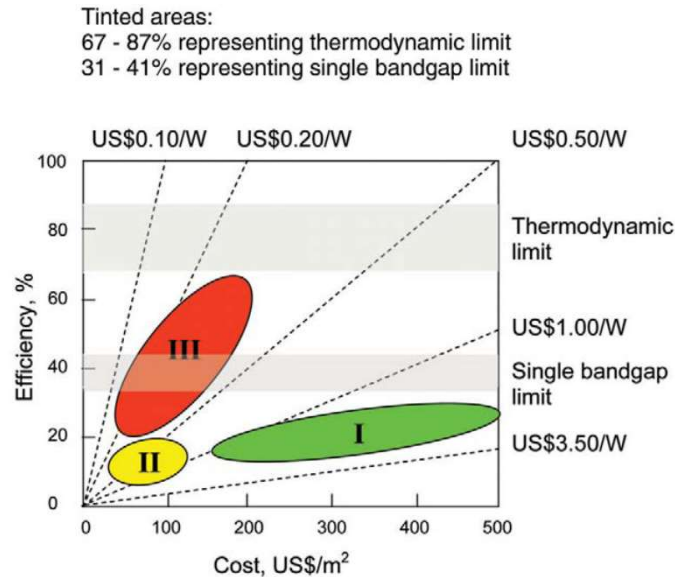


LED blu/violetto basato su (In)GaN



NICHIA

CASO DI STUDIO II : Il Green Deal degli anni 2000 ed il FOTOVOLTAICO (ovvero «troppa fiducia fa male»)



Pannello FV della First Solar (USA)

FV di II Generazione (FILM SOTTILE) → PCE ≥ 25%

ARENDI, Marcegaglia Energy



ARENDI nel 2007 acquisisce brevetti & know-how dell'Univ. di Parma sulla fabbricazione di celle a CdTe (processo CSS)

APPROCCIO TECNOLOGICO: Lab-to-Fab !

INIZIO ATTIVITA': 2007 (Investimento: 49 M€)

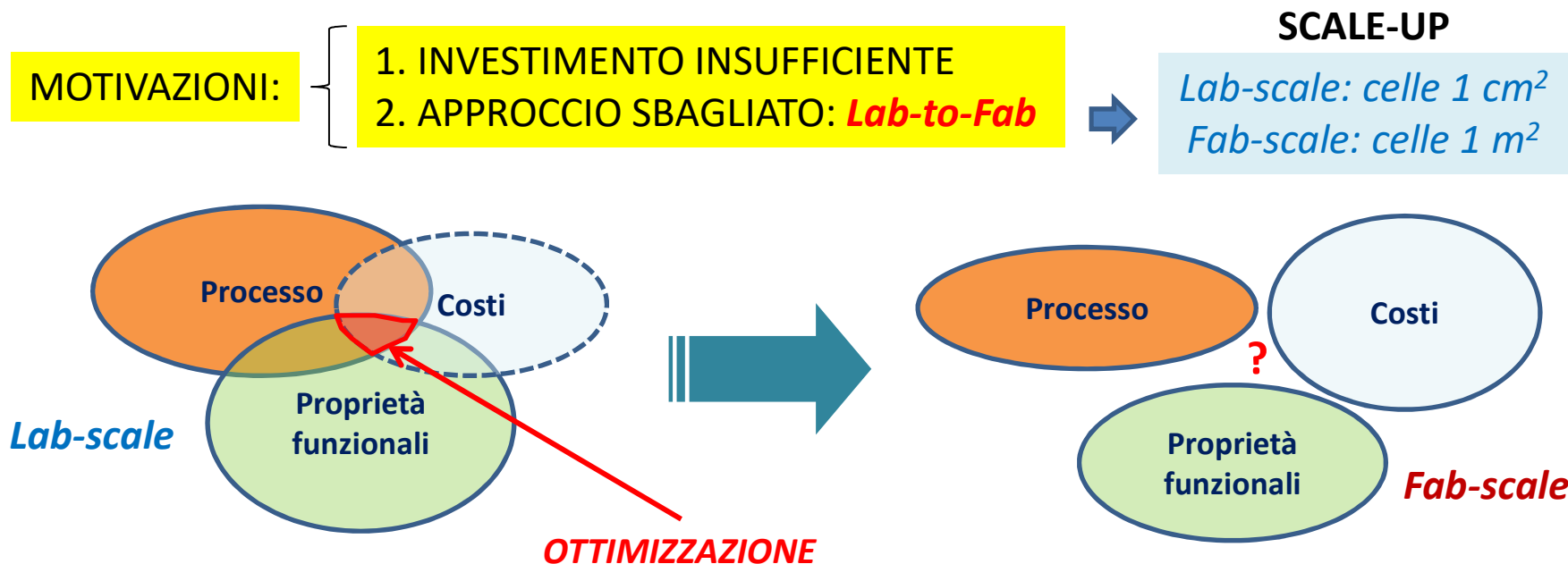
CHIUSURA ATTIVITA': 2014

CASO DI STUDIO II : Il Green Deal degli anni 2000 ed il FOTOVOLTAICO

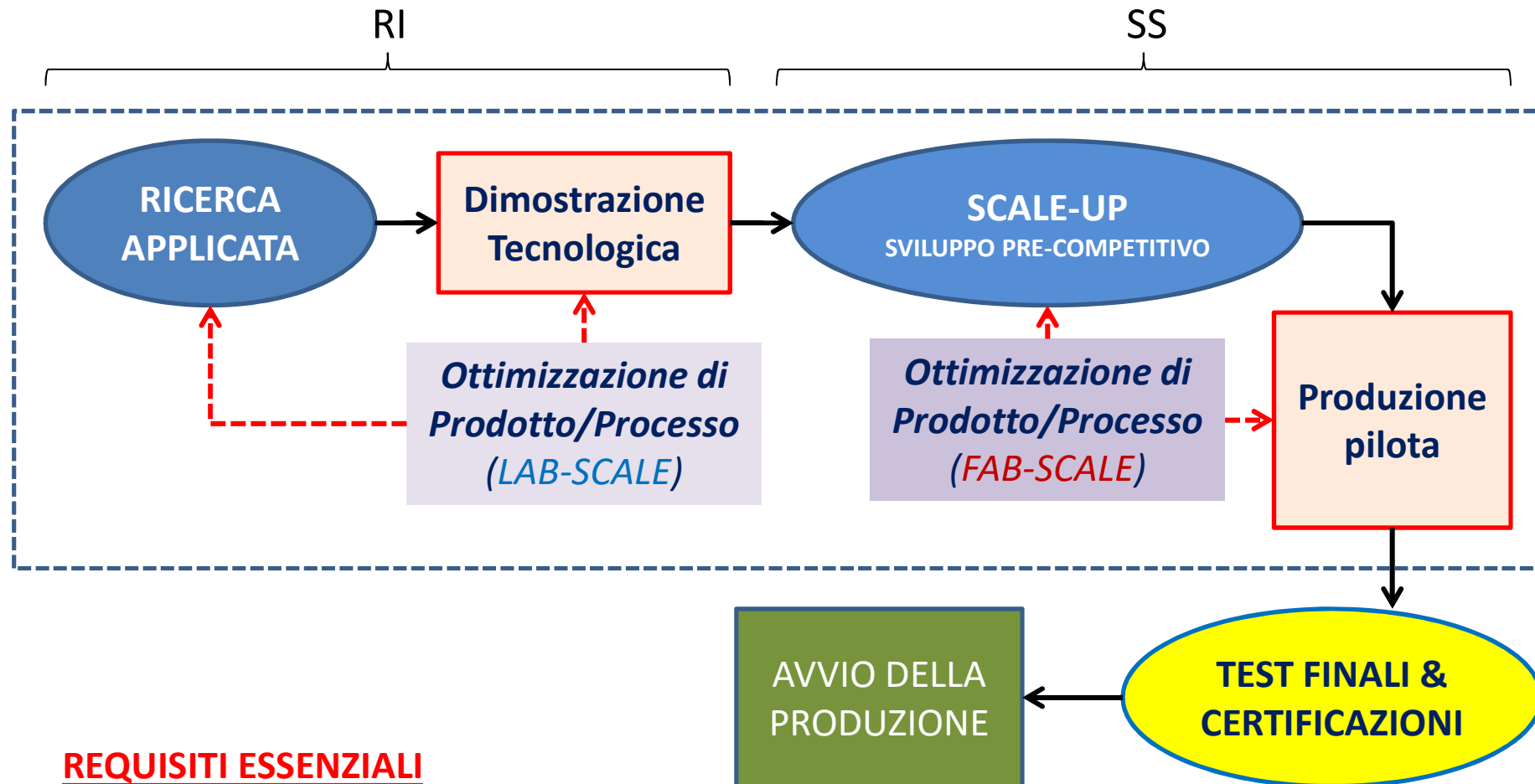
(ovvero «troppa fiducia fa male»)

«... il macchinario che doveva far partire la produzione era nuovissimo, **mai testato prima, realizzato per la prima volta proprio per questo tipo di produzione** e ottenere il prodotto che ci aspettavamo non è stato facile, seppure in ambito di ricerca tutto funzionasse alla perfezione». (R. Garavaglia, CEO di ARENDI)

I PANNELLI NON HANNO MAI RAGGIUNTO LE EFFICIENZE DIMOSTRATE IN LABORATORIO!



Il ciclo corretto di attività di Sviluppo Tecnologico



REQUISITI ESSENZIALI

- **INVESTIMENTI ADEGUATI**
- **TEMPO**

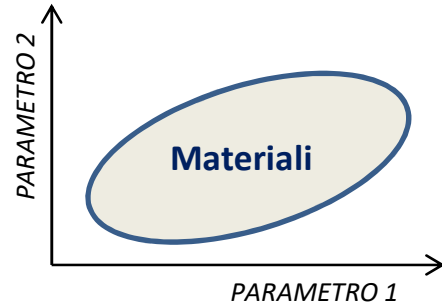


PARTE III

Il Ruolo della IA nella Mitigazione del Rischio Tecnologico

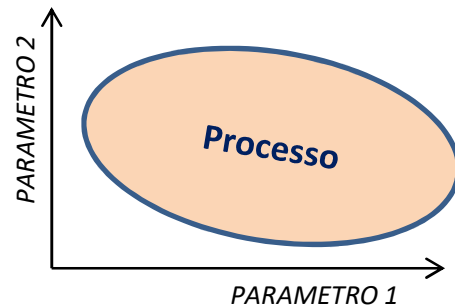
IL PROBLEMA DELL'OTTIMIZZAZIONE NELLE TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI

UN PROBLEMA MULTI-PARAMETRICO



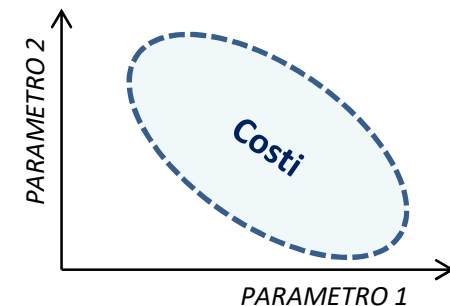
Parametri dei Materiali

- Elementi chimici
- Stechiometria, Struttura
- Proprietà ottiche
- Proprietà elettroniche
- ecc.



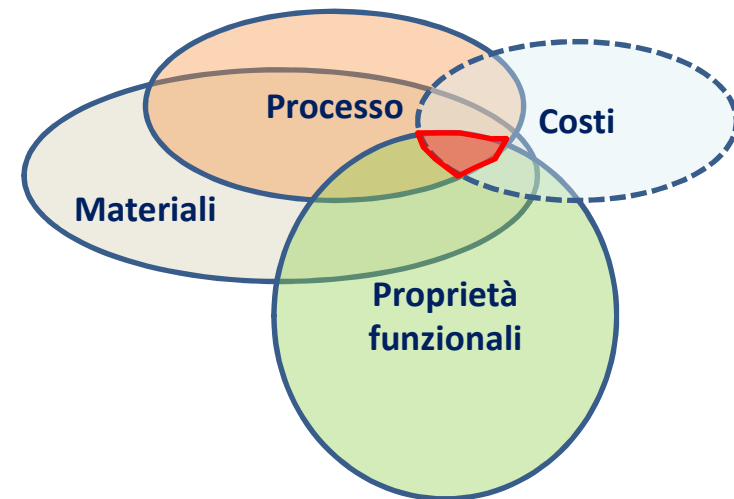
Parametri di Processo

- Temperatura
- Pressione, Flussi di gas
- Concentrazioni
- Velocità di crescita/Spessori
- Uniformità
- ecc.



Parametri di Costo

- Costo degli impianti
- Diametro dei wafer
- N.ro di wafer/anno
- Tempi di crescita
- Costo dei reagenti
- Energia, ecc.



APPROCCIO CONVENZIONALE

Accumulo di *dati sperimentali* sufficienti a risolvere il problema di ottimizzazione attraverso esperimenti dedicati (misure sui materiali, prove di processo, stima dei costi, ecc.)

COSTI E TEMPI ELEVATI !

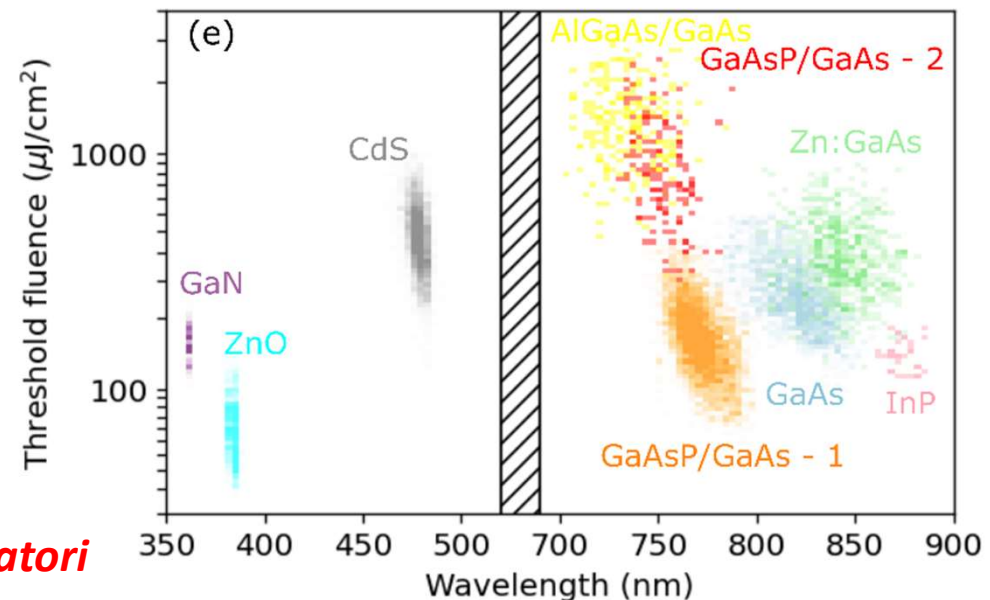
IL PROBLEMA DELL'OTTIMIZZAZIONE NELLA TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI

APPROCCIO CONVENZIONALE



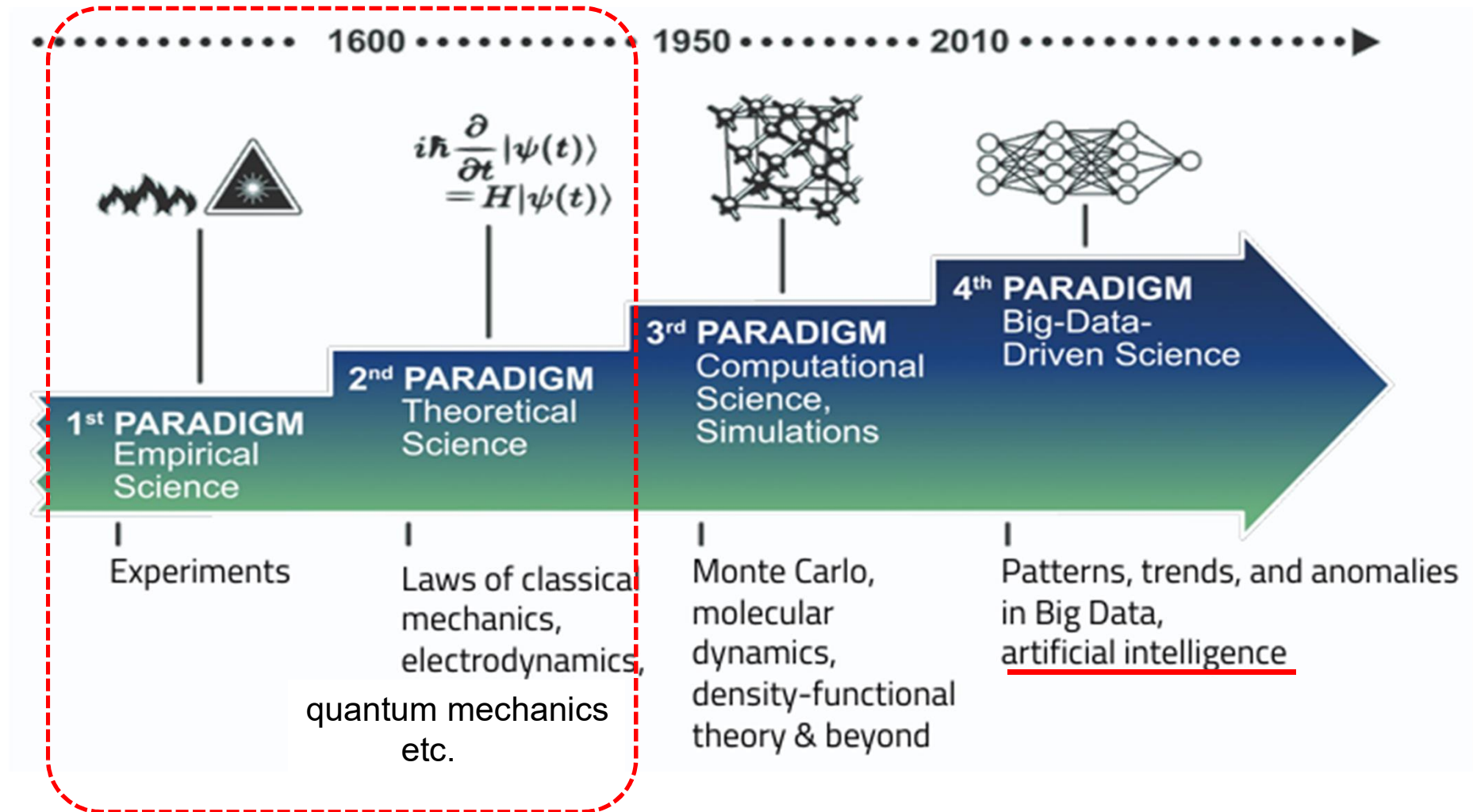
Nella moderna **tecnologia dei materiali** (ed in particolare dei **nano-materiali**) il metodo genera ingenti set di dati osservativi (**BIG DATA**) spesso affetti da «*rumore*» dovuto a disomogeneità/variazioni intrinseche (spesso non note a priori) delle condizioni di sintesi e/o degli apparati (*reattori*) in cui la sintesi di tali materiali si realizza.

DATA MINING dei DATI



TEORIA + Esperienza & Intuito dei Ricercatori

IL PROBLEMA DELL'OTTIMIZZAZIONE NELLA TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI



L'IA NELLA MITIGAZIONE DEL RISCHIO TECNOLOGICO



UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

MI : MATERIALS INFORMATICS

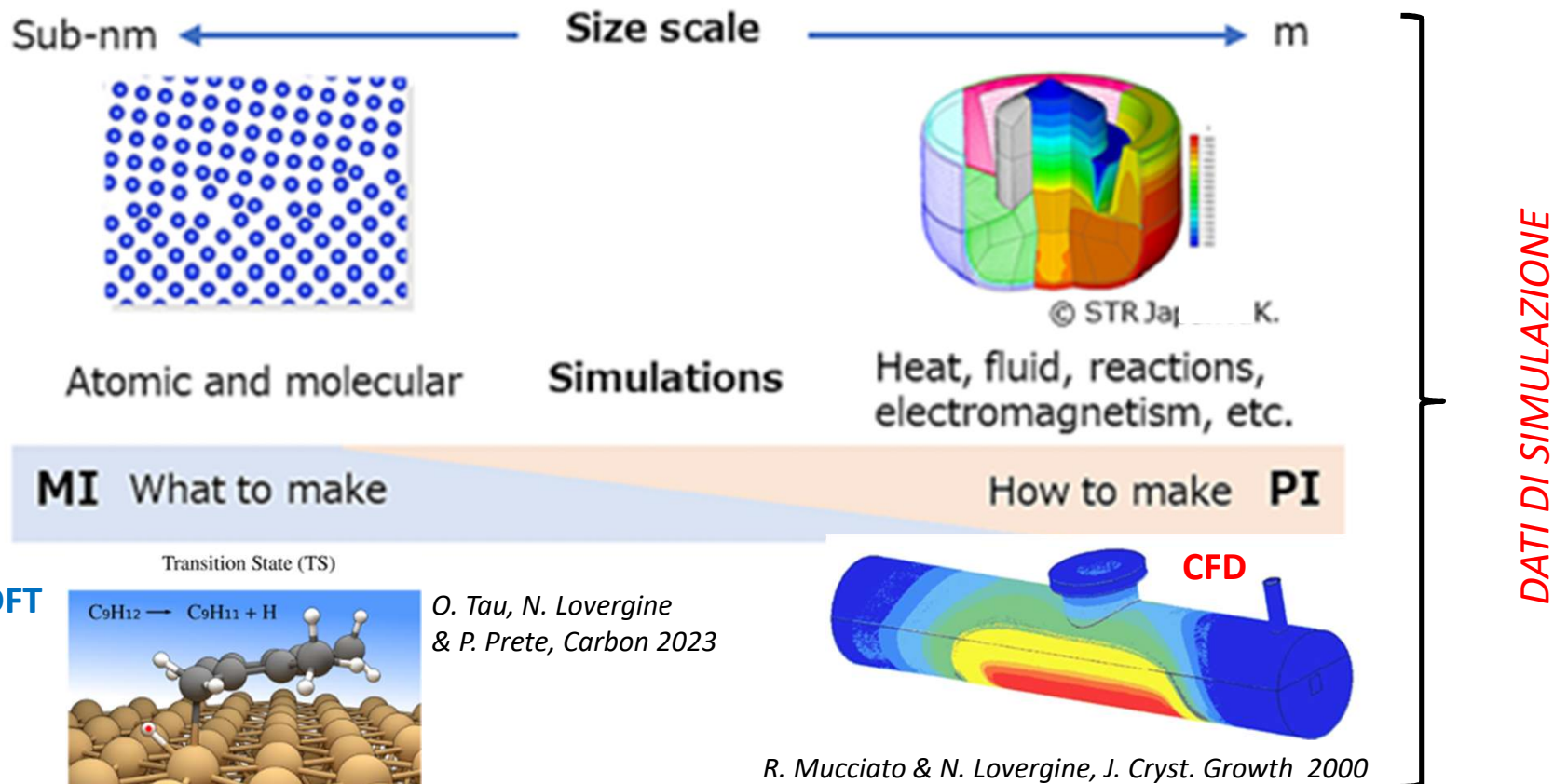
- *Calcolo ab-initio DFT*
- *Dinamica Molecolare*
- *Meta-Dinamica*

HPC
High Performance
Computing

MI : PROCESS INFORMATICS

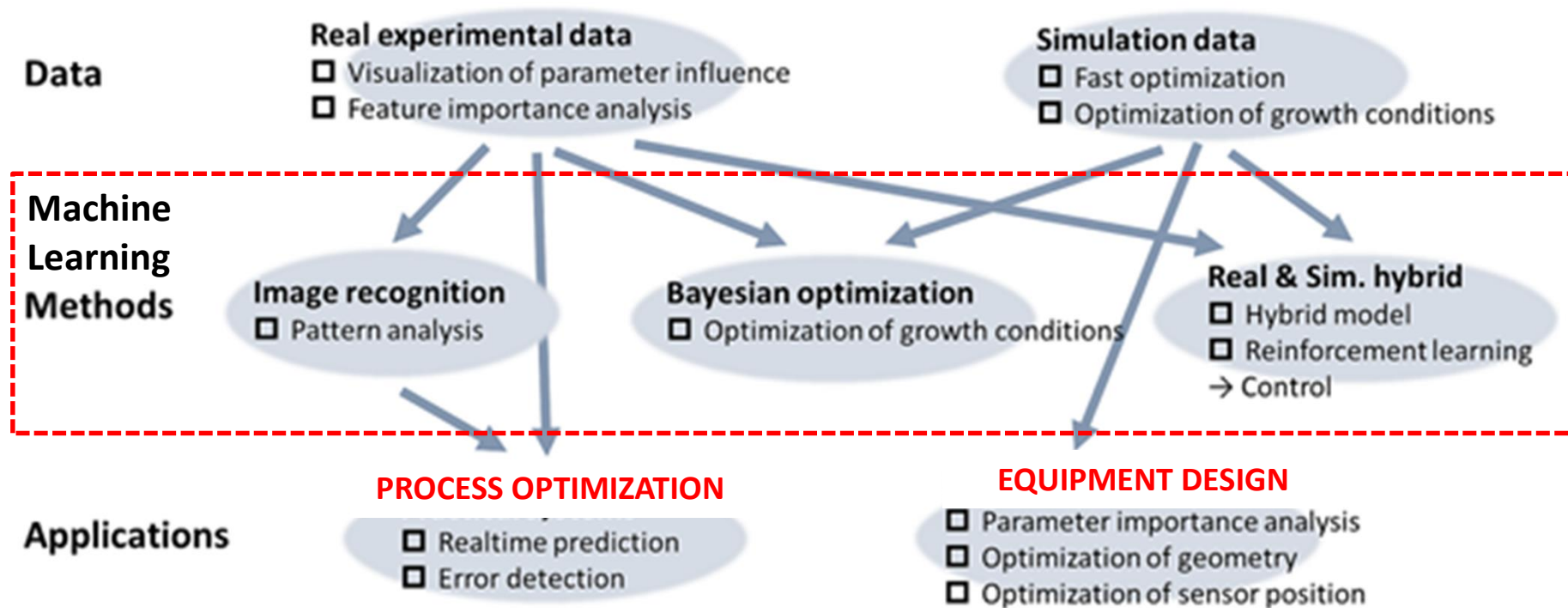
- *Fluidodinamica Computazionale*

COSTI E TEMPI ELEVATI !



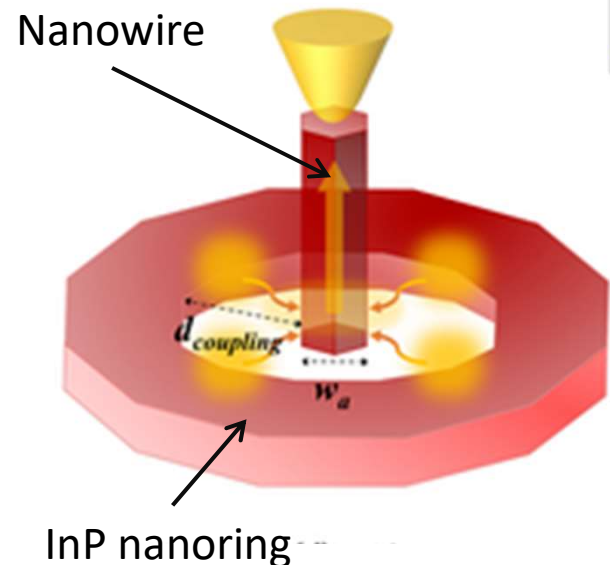
IL PROBLEMA DELL'OTTIMIZZAZIONE NELLA TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI

*Negli ultimi anni i metodi di **Machine Learning** sono sempre più applicati alla Tecnologia dei Semiconduttori al fine di ridurre i tempi ed i costi di realizzazione dei **DATABASE** necessari al processo di ottimizzazione dei processi produttivi*

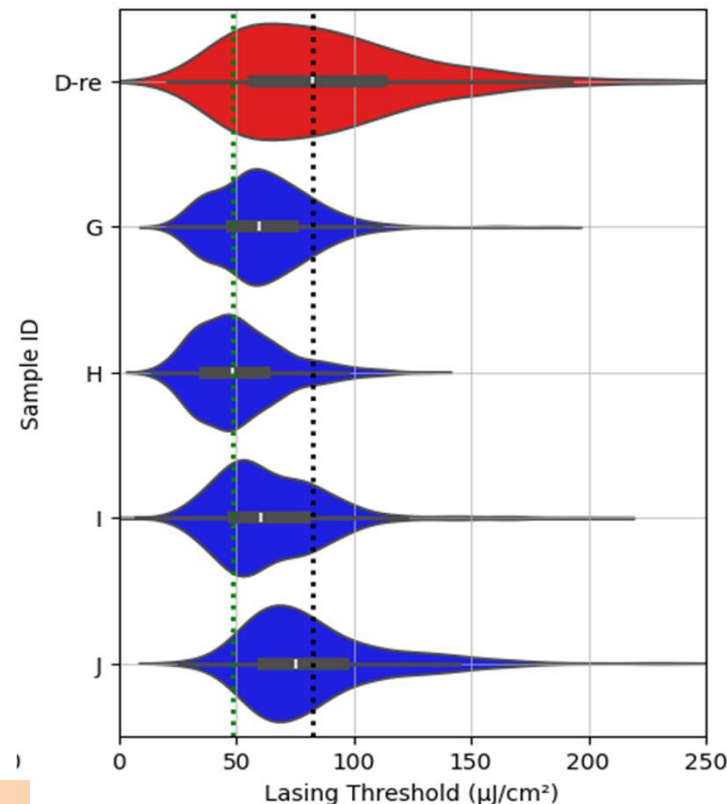


CASO DI STUDIO IV: Il Machine Learning per ridurre la variabilità di nano-laser

InP on-chip nanoring lasers



DATA SET di oltre 65,000 nano-laser !



Human expert
optimization

ML optimization

60% reduction in lasing threshold

M.R. Athavale et al., Accelerated Design of Microring Lasers with Multi-Objective Bayesian Optimization, arxiv:2411.04487, 2024

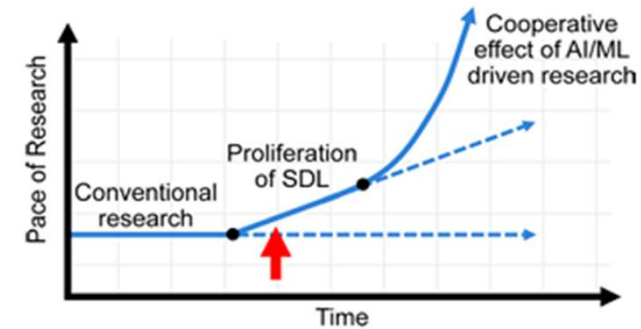
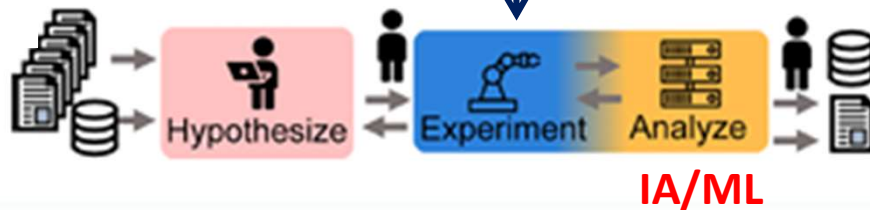
L'IA NELLA MITIGAZIONE DEL RISCHIO TECNOLOGICO



UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

Il Prossimo Futuro della Tecnologia dei Semiconduttori

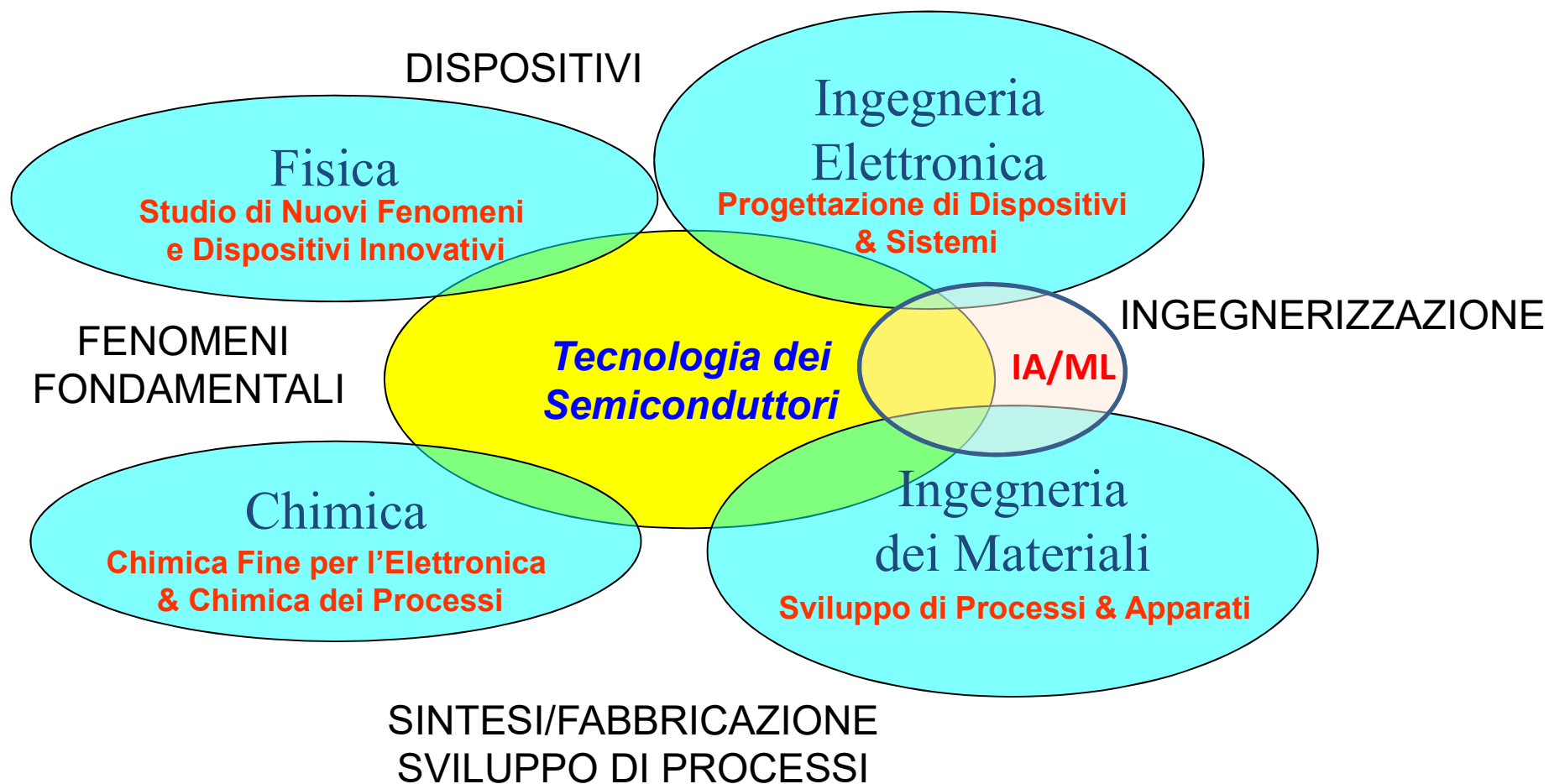
Self-Driving Lab (SDL)



	Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
	Manual	Automatic	Partial AI Assistance	AI Assistance	AI Production	AI Manufacturing
Recipe Development	Human	Human	Human	Human	Human	AI
Operation	Human	Machine	Machine	Machine	Machine	Machine
Monitoring	Human	Human	AI	AI	AI	AI
Pass/Fail Prediction	Human	Human	Human	AI	AI	AI
Recipe Correction	Human	Human	Human	Human	AI	AI

Human Machine AI

LE COMPETENZE RICHIESTE PER IL FUTURO





GRAZIE DELL' ATTENZIONE !