



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015



A. Volta

Anno Internazionale della Luce. ***LED, fotovoltaico, comunicazione ottica***

Lucio C. Andreani

Università di Pavia, Dipartimento di Fisica

<http://fisica.unipv.it>

<http://fisica.unipv.it/nanophotonics>

Incontri del Martedì, Pavia, 17 Novembre 2015

2015: International Year of Light and of Light-based Technologies

Il 2015 è stato proclamato dalle Nazioni Unite l'Anno Internazionale della Luce e delle tecnologie basate sulla luce (IYL 2015): vedi il sito web www.light2015.org

La tecnologie basate sulla luce hanno un enorme impatto sulla società e sulla vita quotidiana.

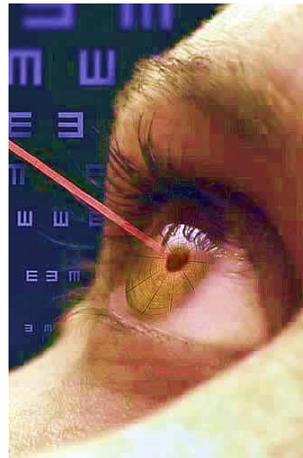
Illuminazione



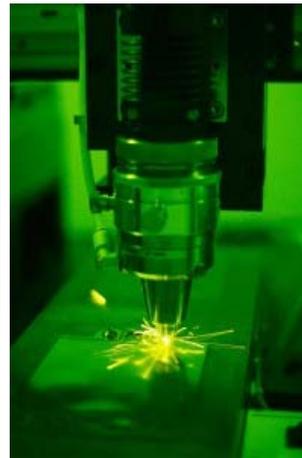
Energia



Medicina



Industria



Telecomunicazioni



Anno Internazionale della Luce: perché il 2015

1015: Ibn Al Haythem Trattato di Ottica

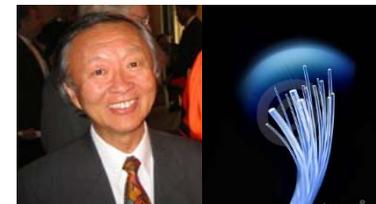
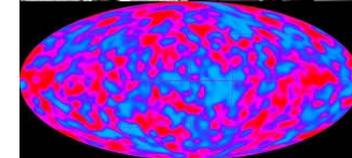
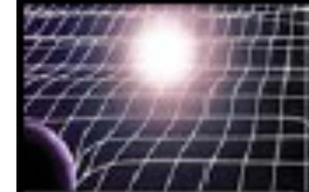
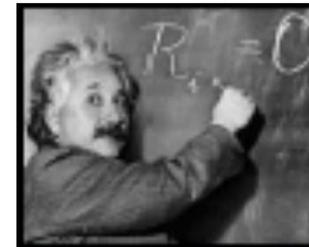
1815: Fresnel e la natura ondulatoria della luce

1865: Maxwell e le onde elettromagnetiche

1915: Einstein e la relatività generale: la luce nello spazio-tempo

1965: Penzias e Wilson, Radiazione cosmica di fondo ovvero *le tracce del Big Bang* (Premio Nobel 1978)

1965: Charles Kao e la tecnologia a fibre ottiche (Premio Nobel 2009)



La luce: ricerca fondamentale o applicazioni e tecnologie?

Natura ondulatoria/corpuscolare della luce: Newton, Fresnel, Maxwell...

Quantizzazione e fotoni: corpo nero (Planck), effetto fotoelettrico (Einstein)

Relatività generale: la luce nello spazio-tempo curvo

Emissione spontanea e stimolata, LED e laser...

Radiazione cosmica di fondo e il big bang

LED e illuminazione

Laser e applicazioni: industria, medicina...

Fotovoltaico e problema energetico

Fibre ottiche e telecomunicazioni

Il problema energetico... come ci può aiutare la luce?

LED (Light Emitting Diode)



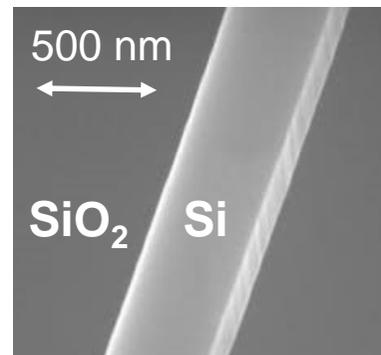
⇒ *illuminazione e risparmio energetico*

Celle fotovoltaiche



⇒ *energia elettrica da fonte rinnovabile*

Si-photonics per interconnessioni ottiche

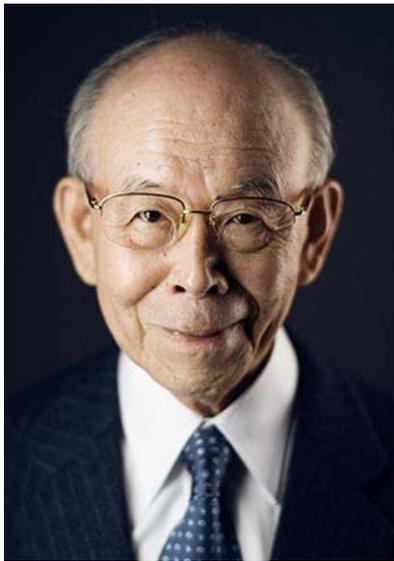


⇒ *risparmio di energia nei data centers*

Il premio Nobel per la Fisica 2014

è stato attribuito per l'invenzione del **LED a luce blu** a

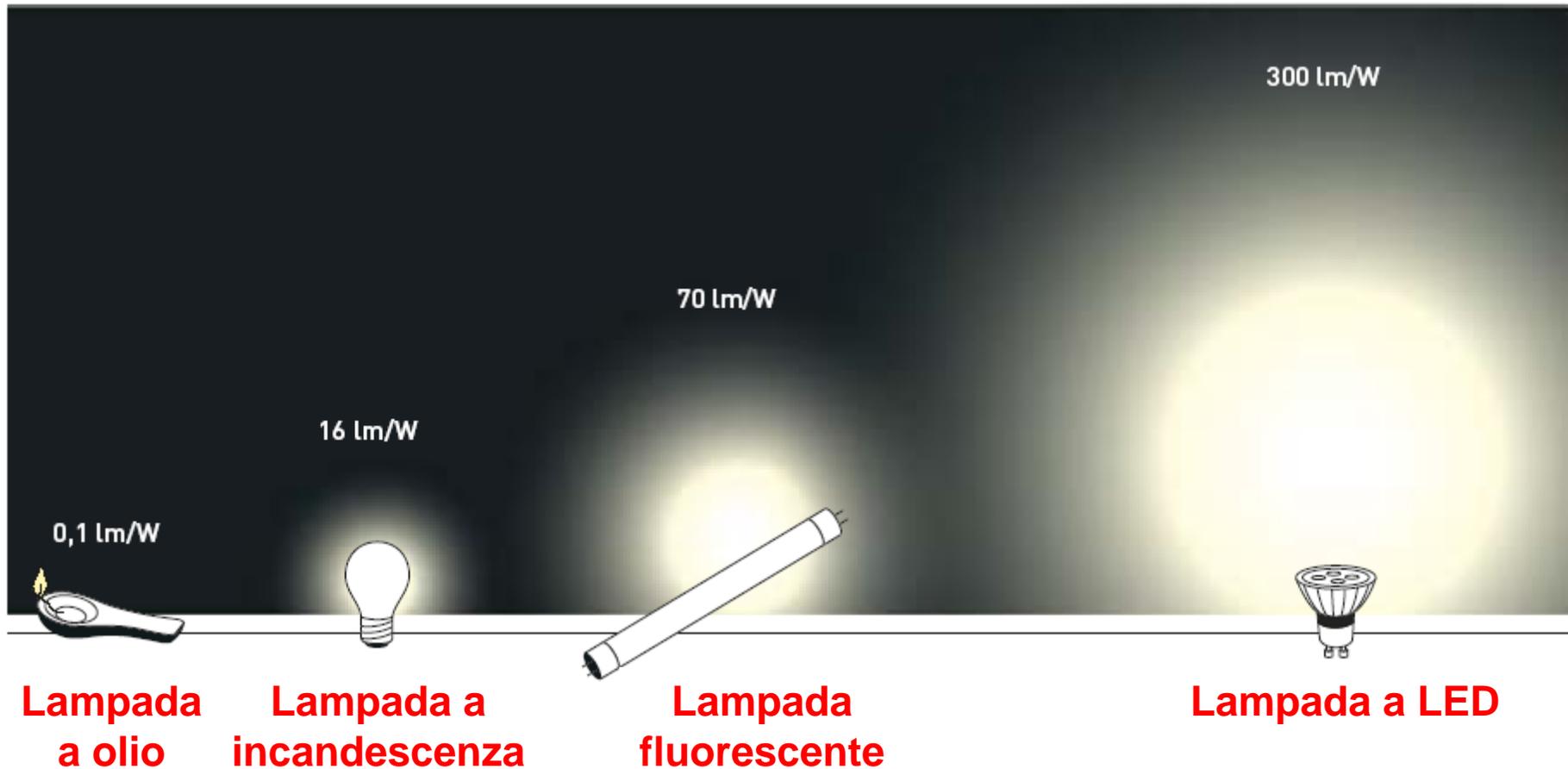
Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura



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

<http://www.nobelprize.org>

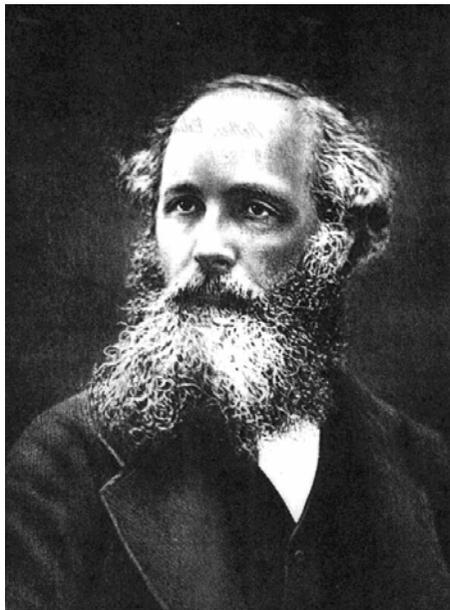
Efficienza luminosa



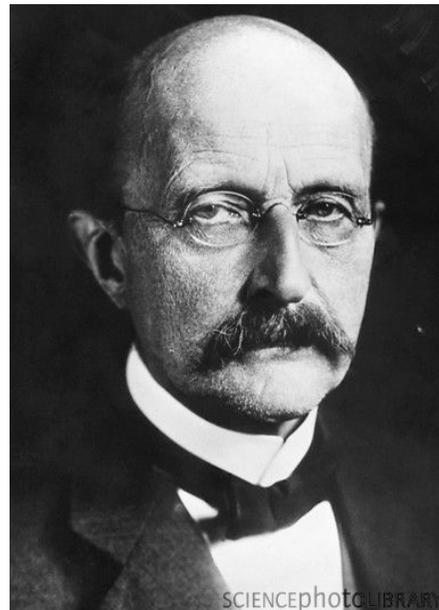
Indice

- International Year of Light 2015 & Nobel Prize 2014
- La luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Semiconduttori: assorbimento/emissione, giunzione p-n
- LED a luce blu e a luce bianca
- Celle fotovoltaiche
- Comunicazione ottica, silicon photonics

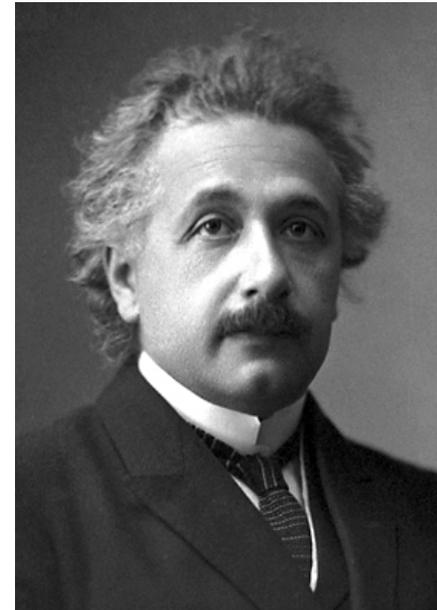
La luce: onde elettromagnetiche e fotoni



J.C. Maxwell



M. Planck



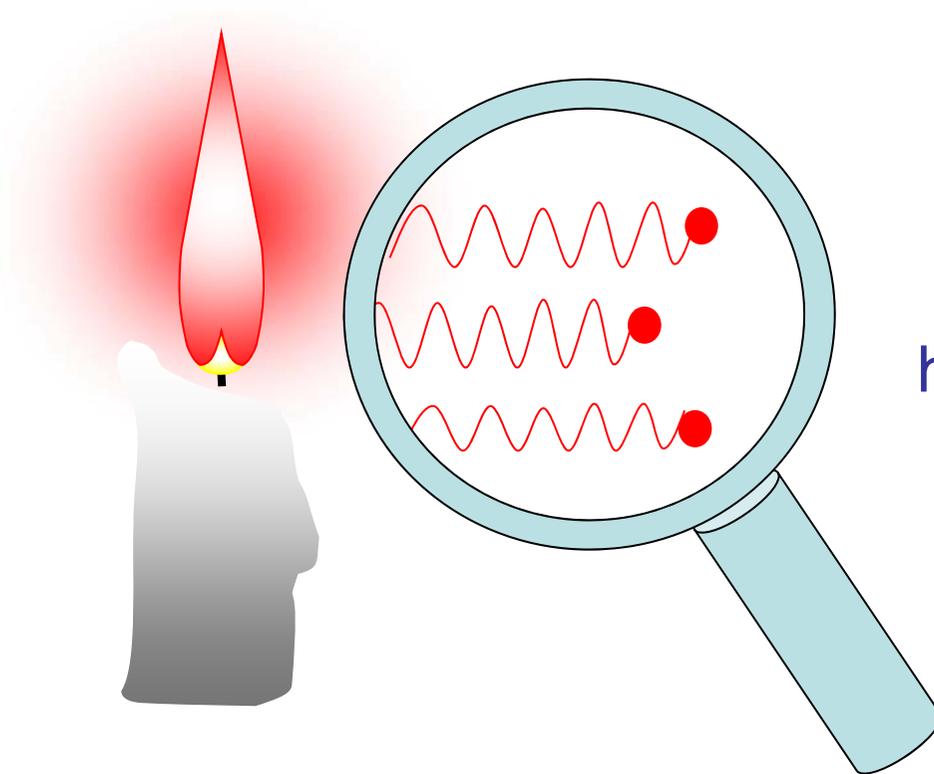
A. Einstein

Quantizzazione della luce: i fotoni

La **radiazione elettromagnetica** ha simultaneamente natura

- ondulatoria: *onde elettromagnetiche* (interferenza, diffrazione, ...)
- corpuscolare: *fotoni* (effetto fotoelettrico, ...)

L'energia viene emessa, trasportata ed assorbita in “pacchetti” detti **quanti**



quanto di energia
elettromagnetica (fotone):

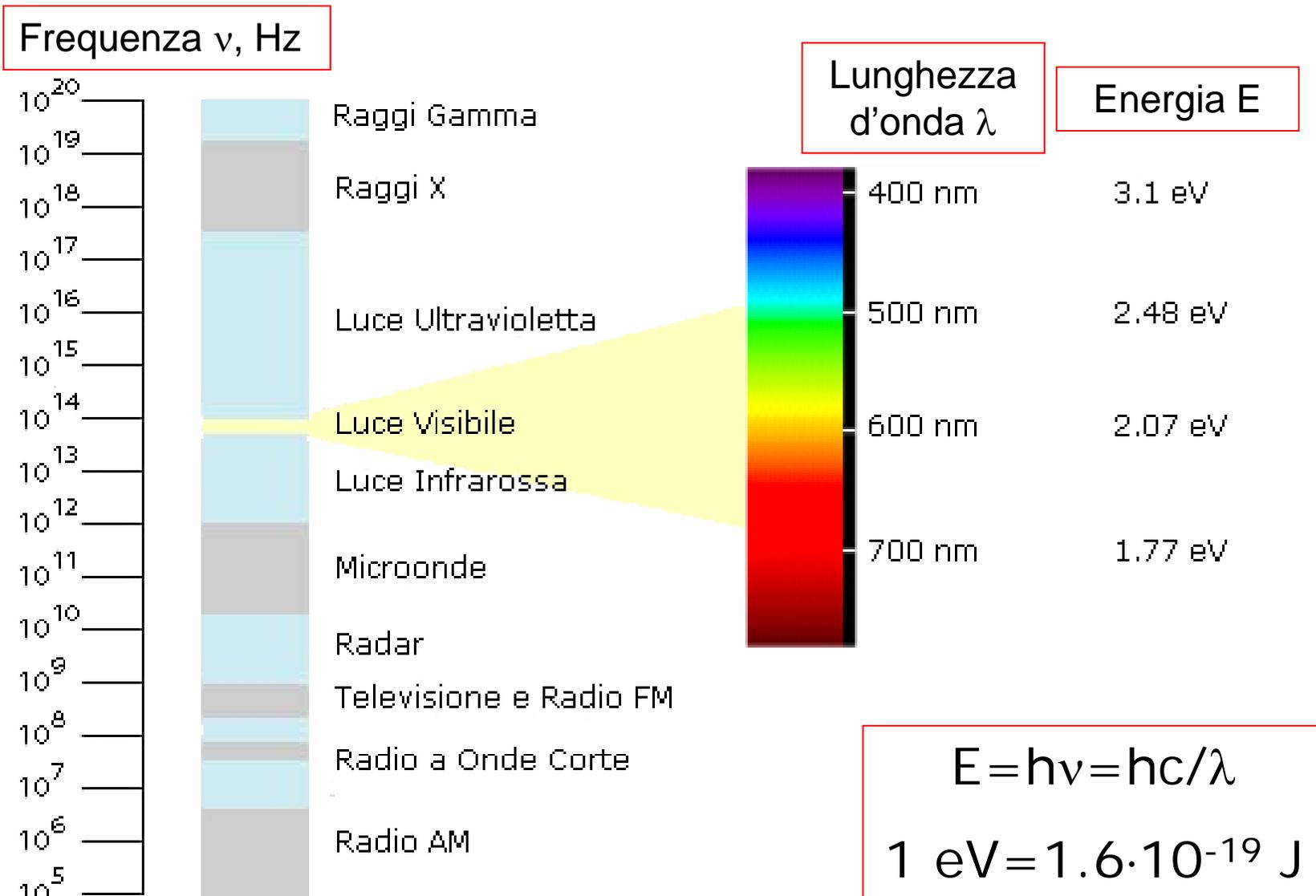
$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \text{ (costante di Planck)}$$



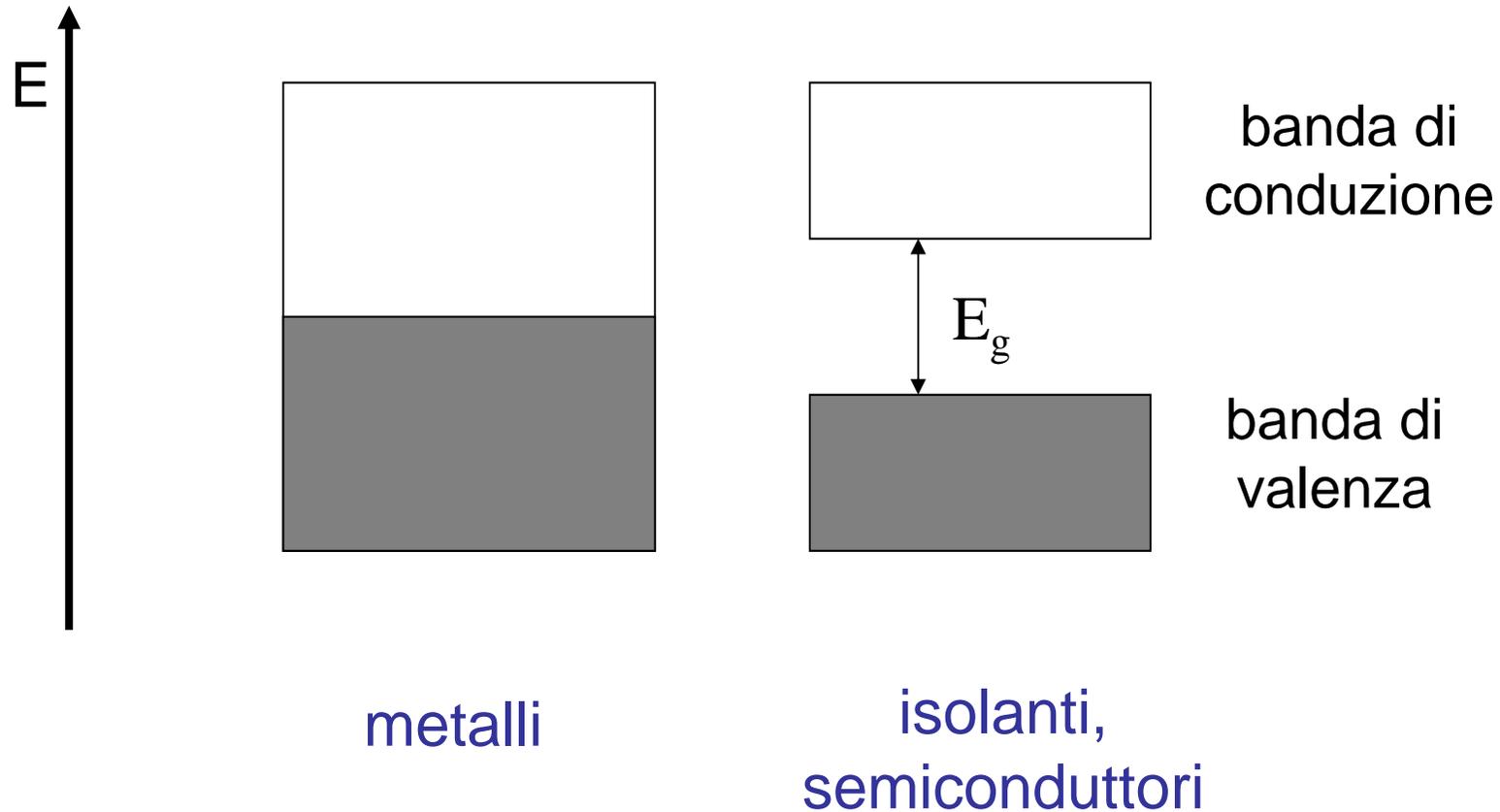
anche la luce (così come la
materia) è onda/particella!

Lo spettro delle onde elettromagnetiche

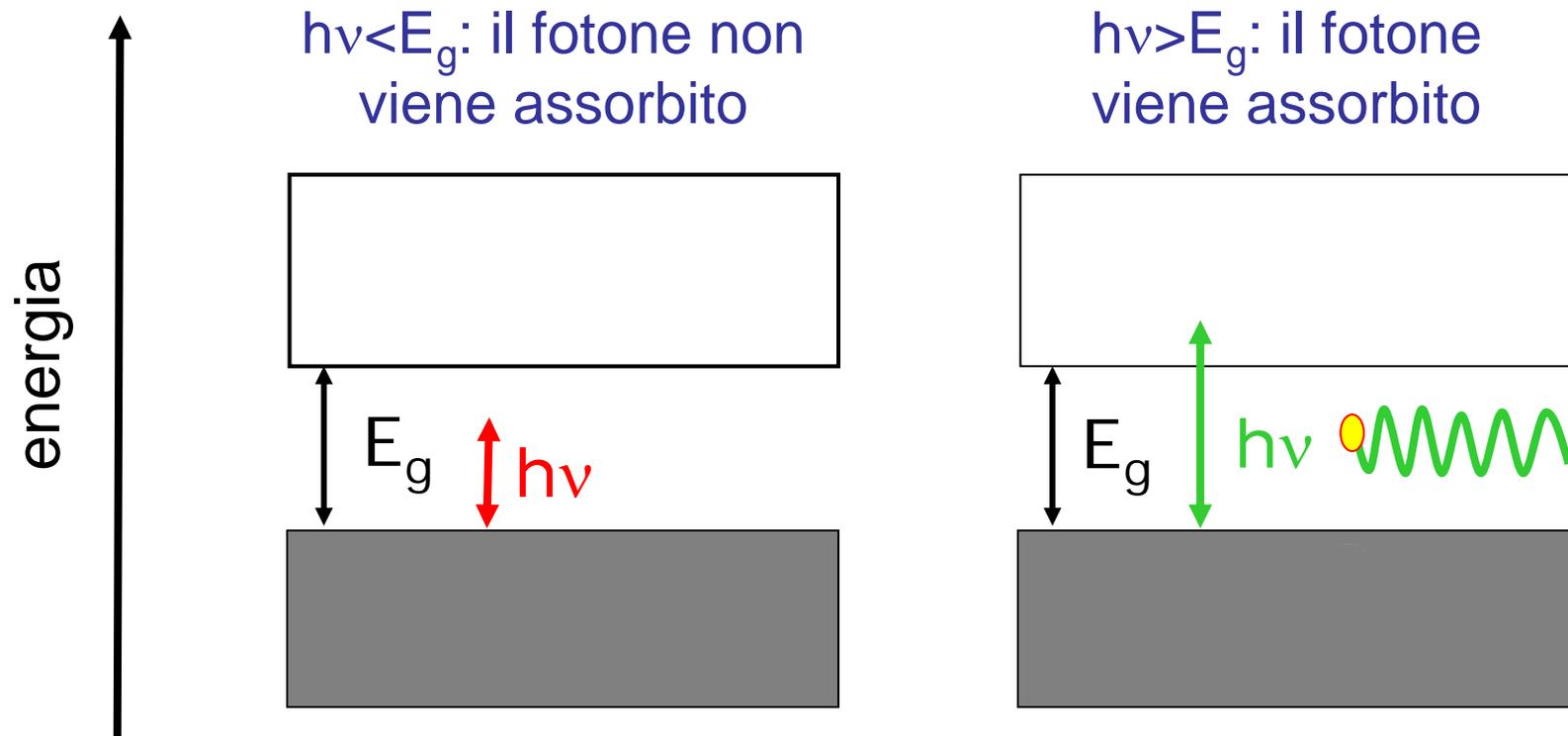


Semiconduttori: gap di energia, assorbimento/emissione

Riempimento dei livelli elettronici nei solidi: il principio di Pauli

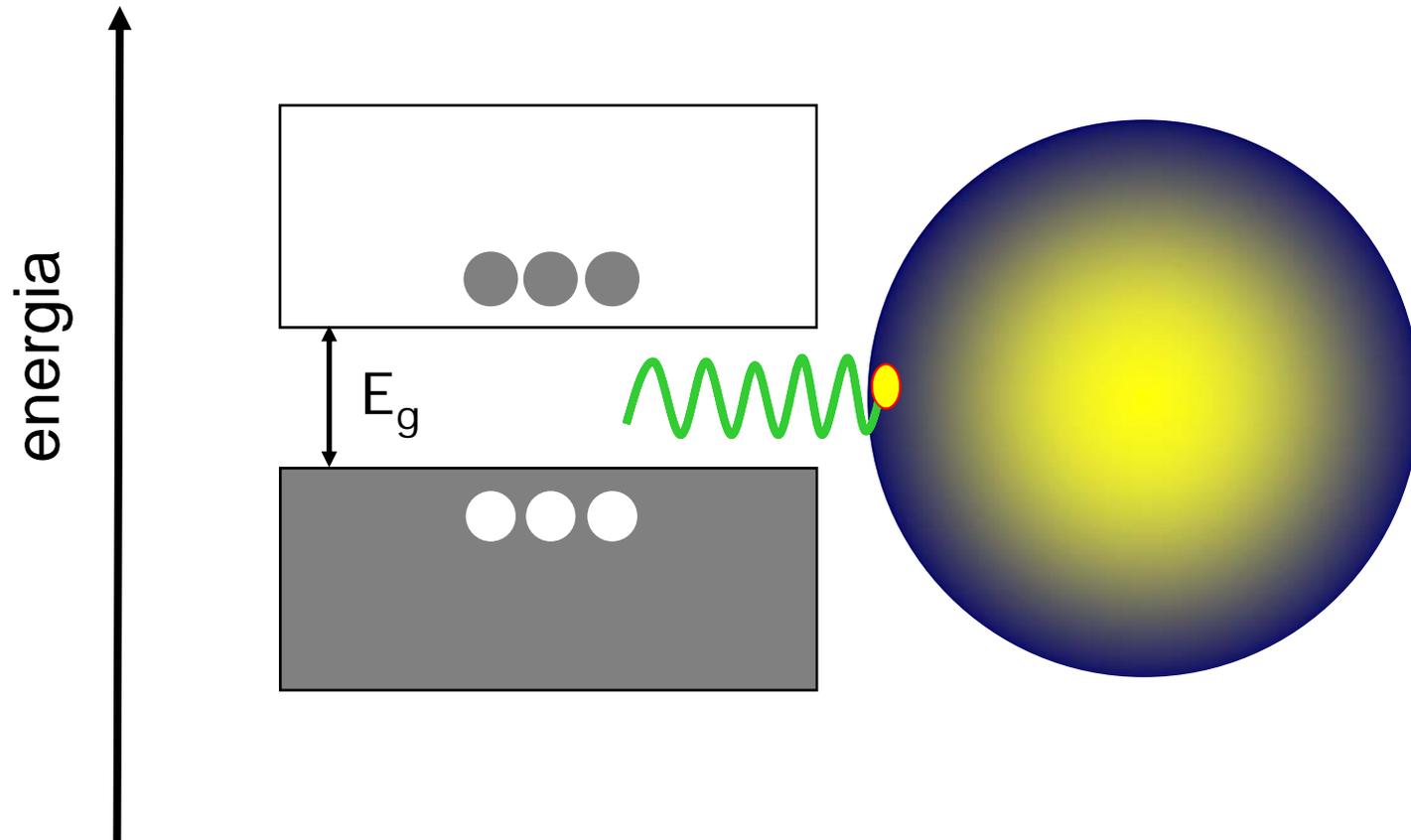


Gap di energia e assorbimento ottico



Il gap di energia determina la soglia di assorbimento secondo la relazione $E_g = h\nu = hc/\lambda$. L'esistenza di una soglia di assorbimento indipendente dall'intensità della luce è un fenomeno di natura quantistica, analogo all'effetto fotoelettrico.

Emissione di luce



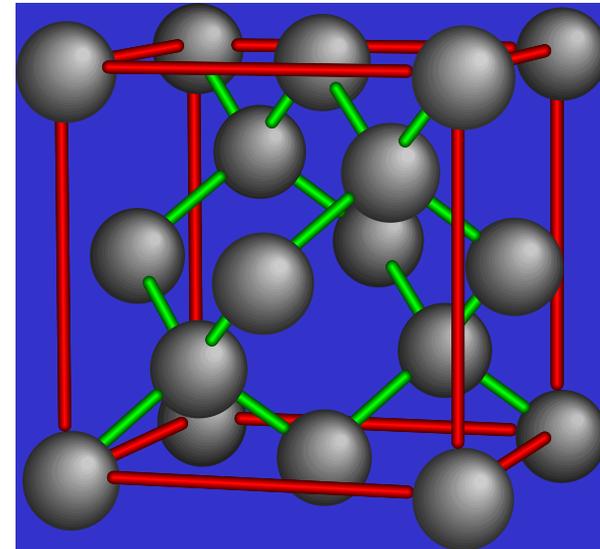
Elettroni e lacune possono ricombinare radiativamente emettendo fotoni con energia pari al gap: $h\nu = E_g$.

Semiconduttori: struttura cristallina

Tavola periodica

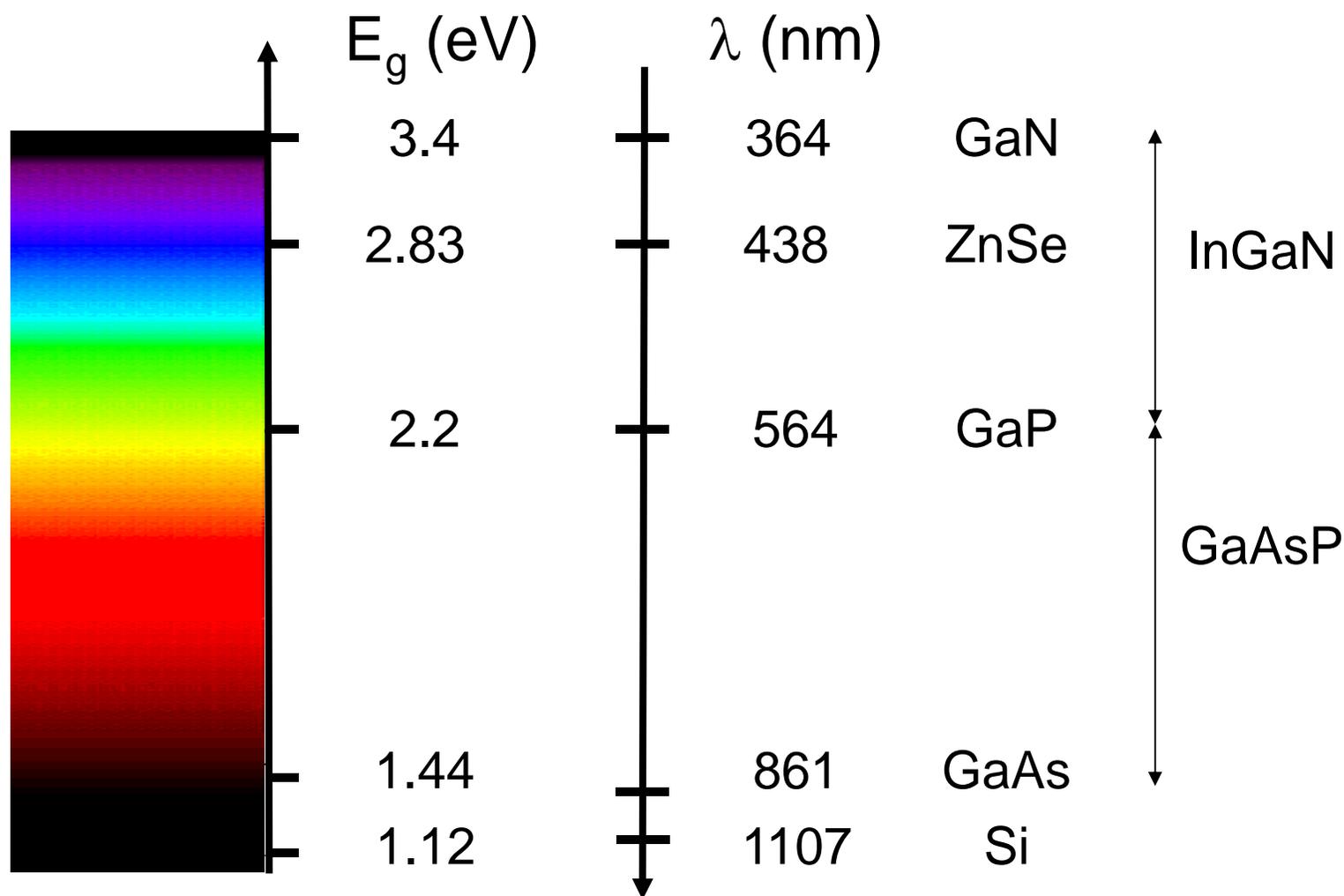
		III	IV	V	VI		
		5 B	6 C	7 N	8 O		
		13 Al	14 Si	15 P	16 S		
IB	IIB	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
		47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
		79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po

Cella elementare (Si)



I semiconduttori (monoatomici gruppo IV, binari III-V e II-VI) sono caratterizzati da un gap di energia piccolo, generalmente < 4 eV.

Gap di energia e luce visibile



Utilizzando semiconduttori binari e le loro leghe è possibile ottenere emissione/assorbimento di luce in tutto lo spettro visibile

Fisica e tecnologia dei semiconduttori...

1873: fotoconducibilità nel selenio

1901: proprietà raddrizzatrici dei cristalli (silicio, galena, ...)

1907: elettroluminescenza (carburo di silicio)

1927: LED (carburo di silicio)

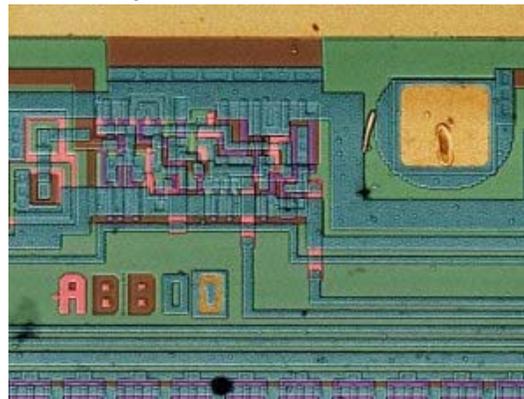
1930-1932: celle fotovoltaiche al selenio (efficienza $< 1\%$)

1940: silicio ultra-puro, giunzioni p-n (radar...)

1947: transistor (AT&T Bell Laboratories)

1954: celle fotovoltaiche al silicio (AT&T Bell Labs)

1958: circuito integrato



... sviluppo della micro- e optoelettronica

1961: LED infrarosso basato su giunzione p-n di GaAs

1969: laser rosso a eterogiunzione in AlGaAs

1979: compact disc (laser rosso, $\lambda=720$ nm)

1993: LED blu in InGaN/AlGaIn/GaN

1995: laser blu in InGaN/AlGaIn/GaN

1995: cella fotovoltaica con efficienza record (25%)

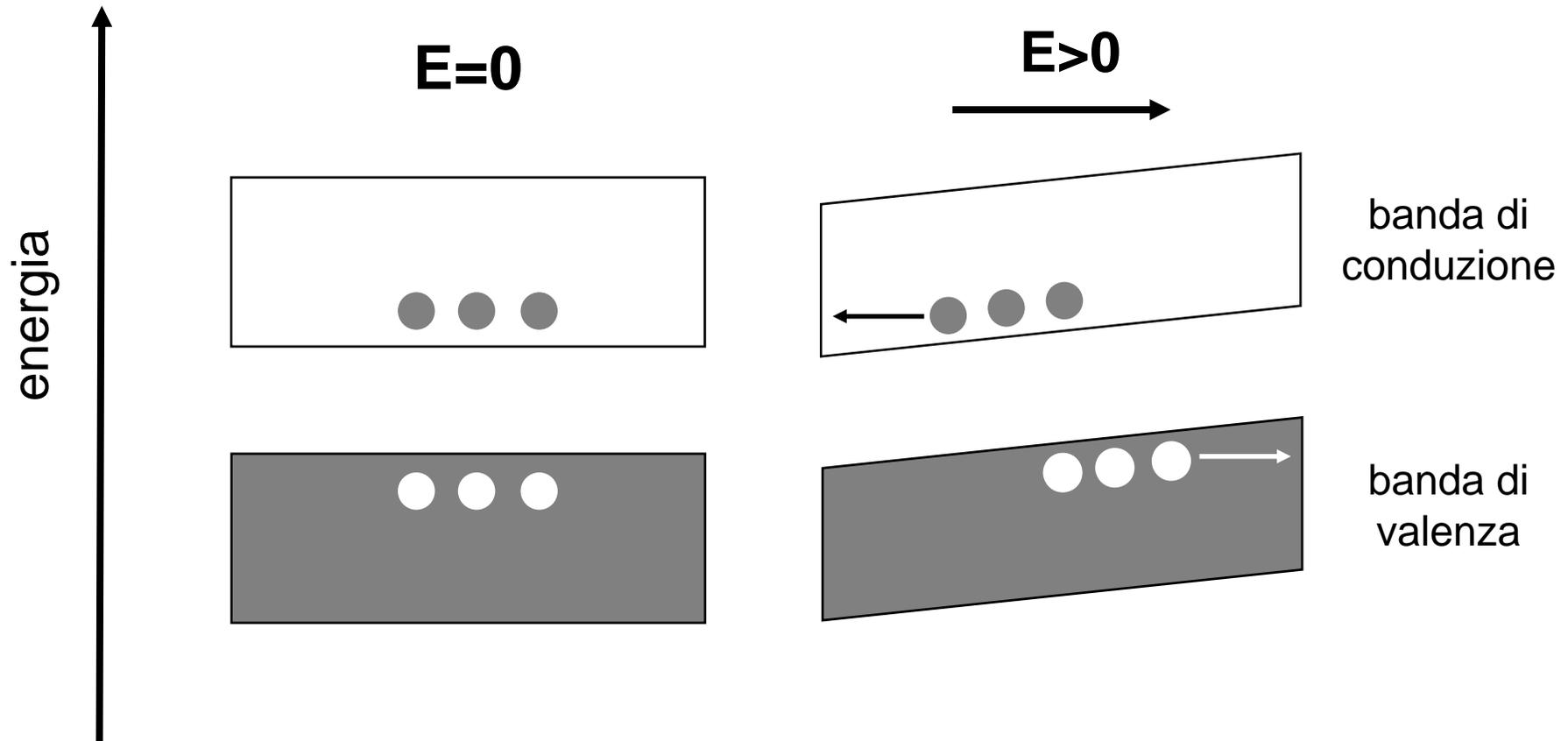
2002: blu-ray disc (laser blu, $\lambda=405$ nm)

2006: lampada a LED in luce bianca



Semiconduttori: drogaggio e giunzione p-n

Portatori di carica: elettroni e lacune. Effetto di un campo elettrico



I portatori di carica in semiconduttori sono di 2 tipi: ***elettroni*** in banda di conduzione, con carica negativa, e stati vuoti o ***lacune*** in banda di valenza, che si comportano come particelle con carica positiva.

Il drogaggio

una tecnica per controllare il numero dei portatori di carica

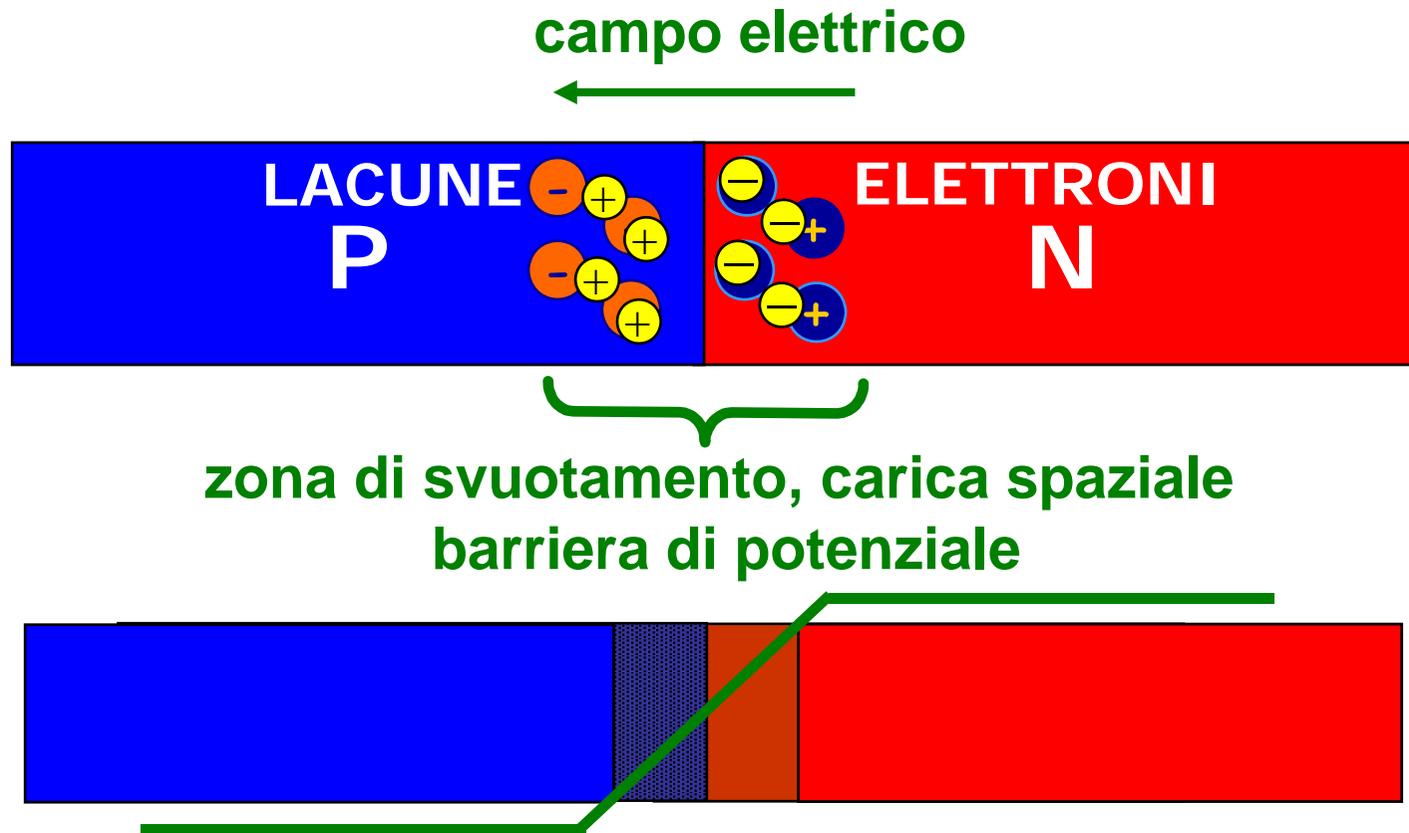
Come funziona? Prendiamo il **Silicio**:

atomi con un elettrone in più \Rightarrow **donori**,
forniscono elettroni in banda di
conduzione: *drogaggio di tipo n*

atomi con un el. in meno \Rightarrow **accettori**,
forniscono lacune in banda di valenza:
drogaggio di tipo p

		III	IV	V
		5	6	7
		B	C	N
		10.811	12.0112	14.0067
		13	14	15
		Al	Si	P
		26.9815	28.0855	30.9738
29	30	31	32	33
Cu	Zn	Ga	Ge	As
63.54	65.38	69.72	72.59	74.9216
47	48	49	50	51
Ag	Cd	In	Sn	Sb
107.870	112.40	114.82	118.69	121.75
79	80	81	82	83
Au	Hg	Tl	Pb	Bi
196.967	200.59	204.37	207.19	208.980

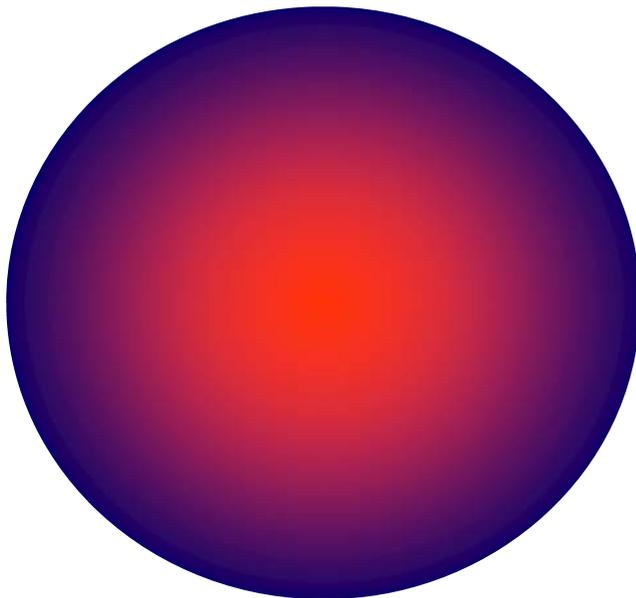
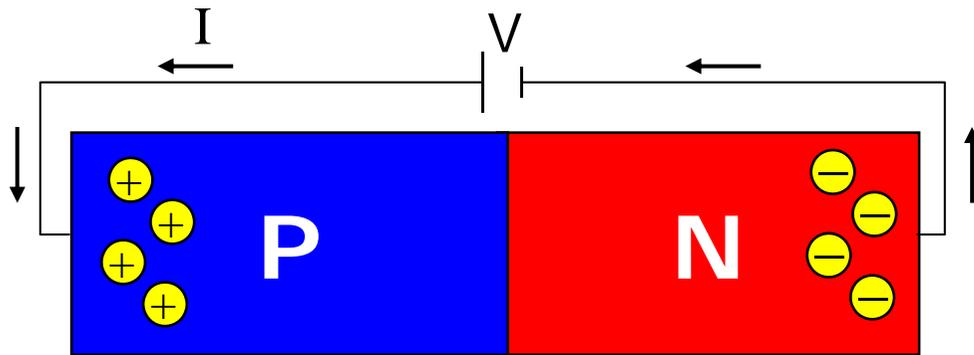
La giunzione p-n (*diode*): il “cuore” dei dispositivi a semiconduttore



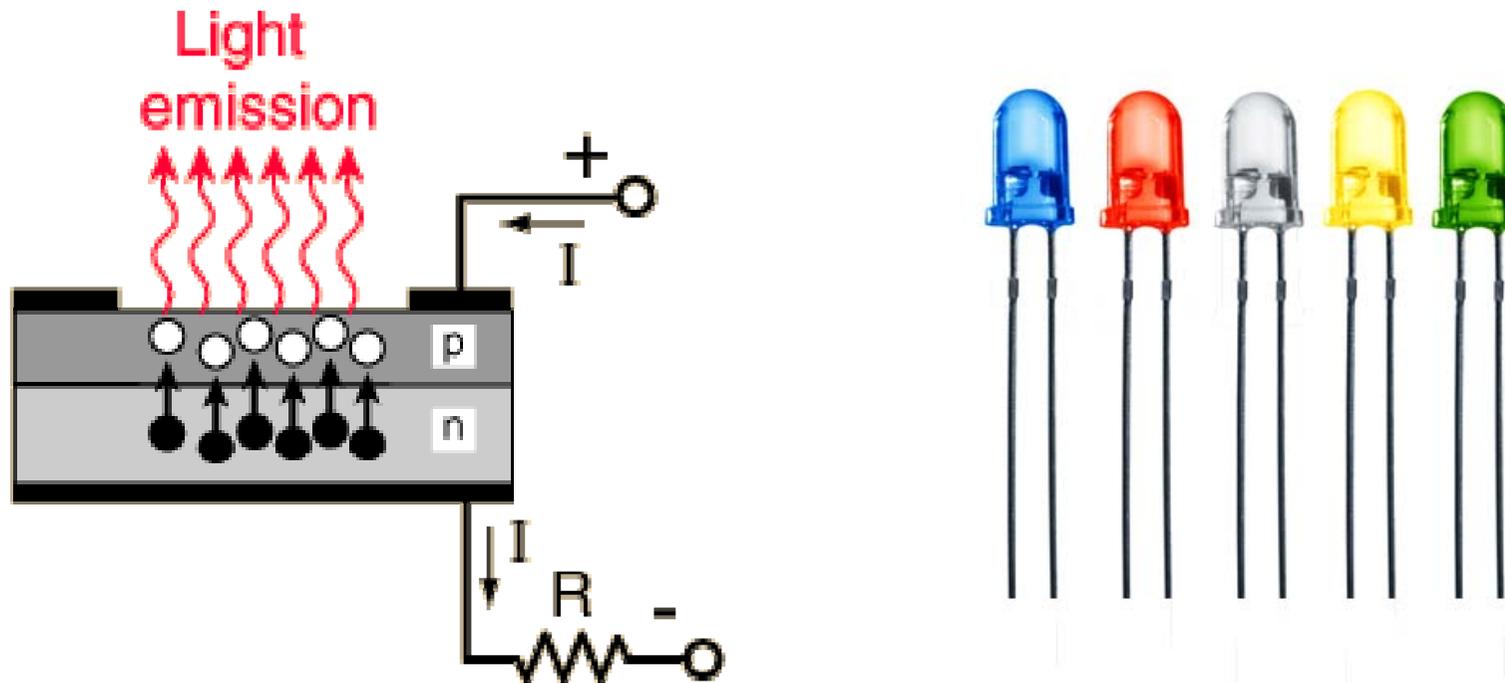
Il campo elettrico nella zona di svuotamento si oppone alla diffusione dei portatori maggioritari (lacune dal lato p, elettroni dal lato n)

LED a luce blu e a luce bianca

Applicazioni della giunzione p-n: LED e laser a semiconduttore (con composti III-V: GaAsP, InGaN, ...)



LED (Light Emitting Device)



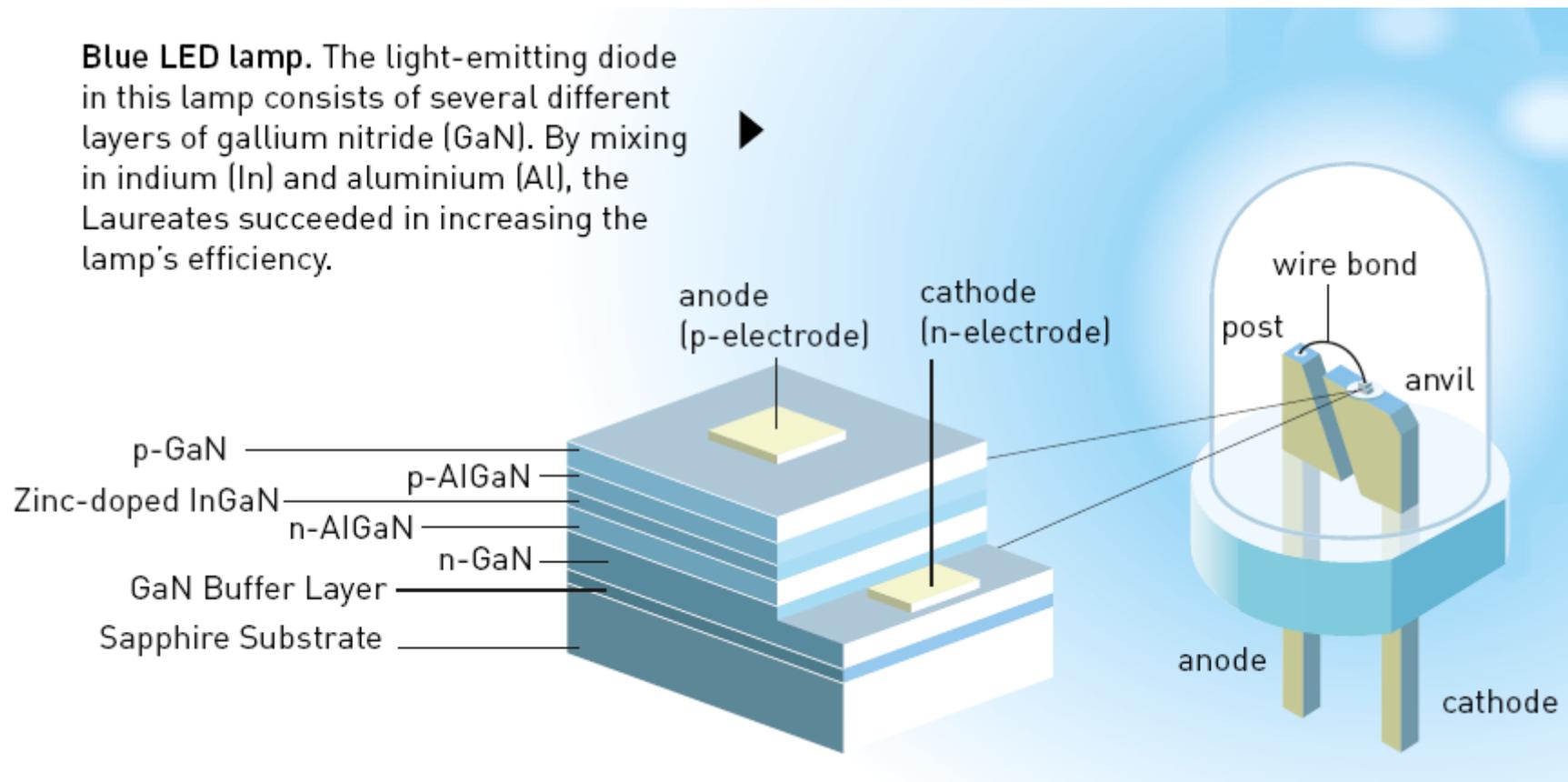
Il colore, ossia la lunghezza d'onda della luce emessa, dipende dal gap di energia del materiale semiconduttore secondo la relazione

$$E_g = h\nu = hc/\lambda$$

LED blu:

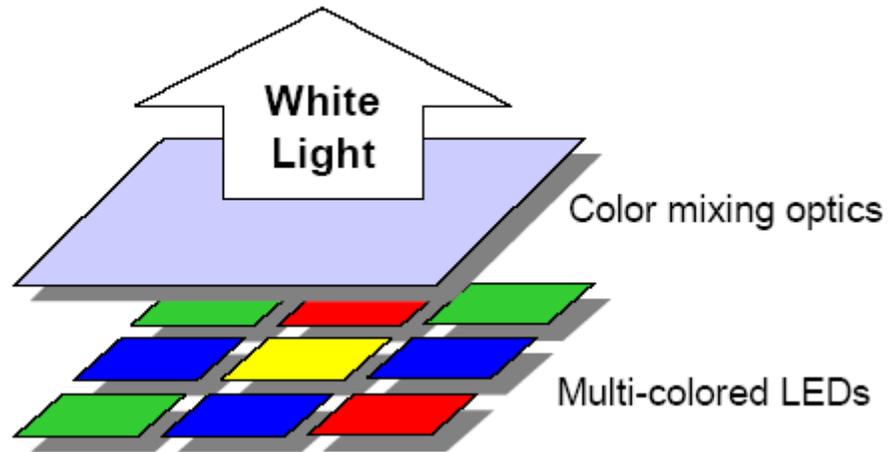
basati su GaN e leghe ternarie InGaN, AlGaN

⇒ **strain** fra materiali con passi reticolari diversi: problema essenziale nella crescita di **nanostrutture di semiconduttori**

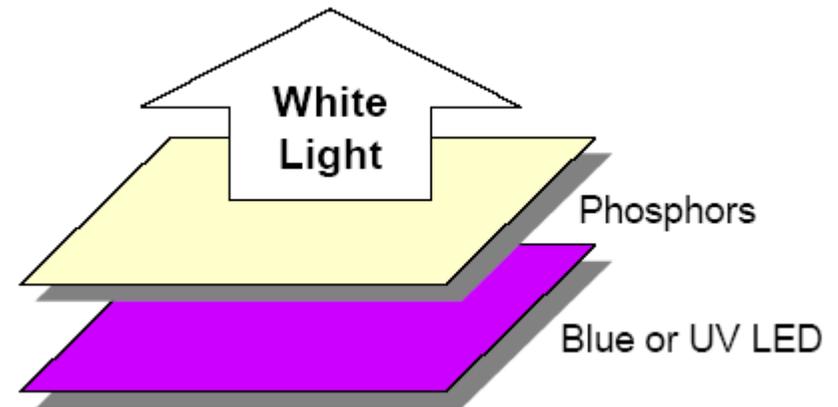


Premio Nobel per la Fisica 2014: <http://www.nobelprize.org>

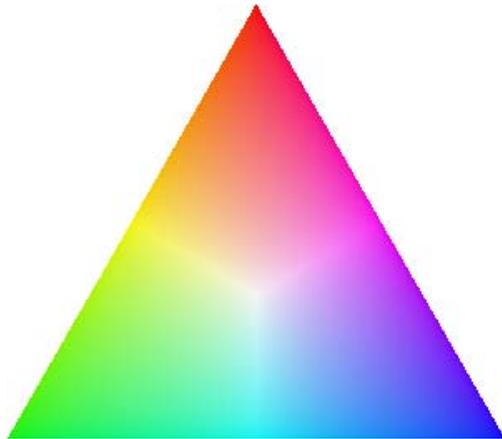
LED a luce bianca



LED RGB (Red-Green-Blue)



LED a fosfori



il "triangolo dei colori"



Illuminazione a LED: risparmio energetico

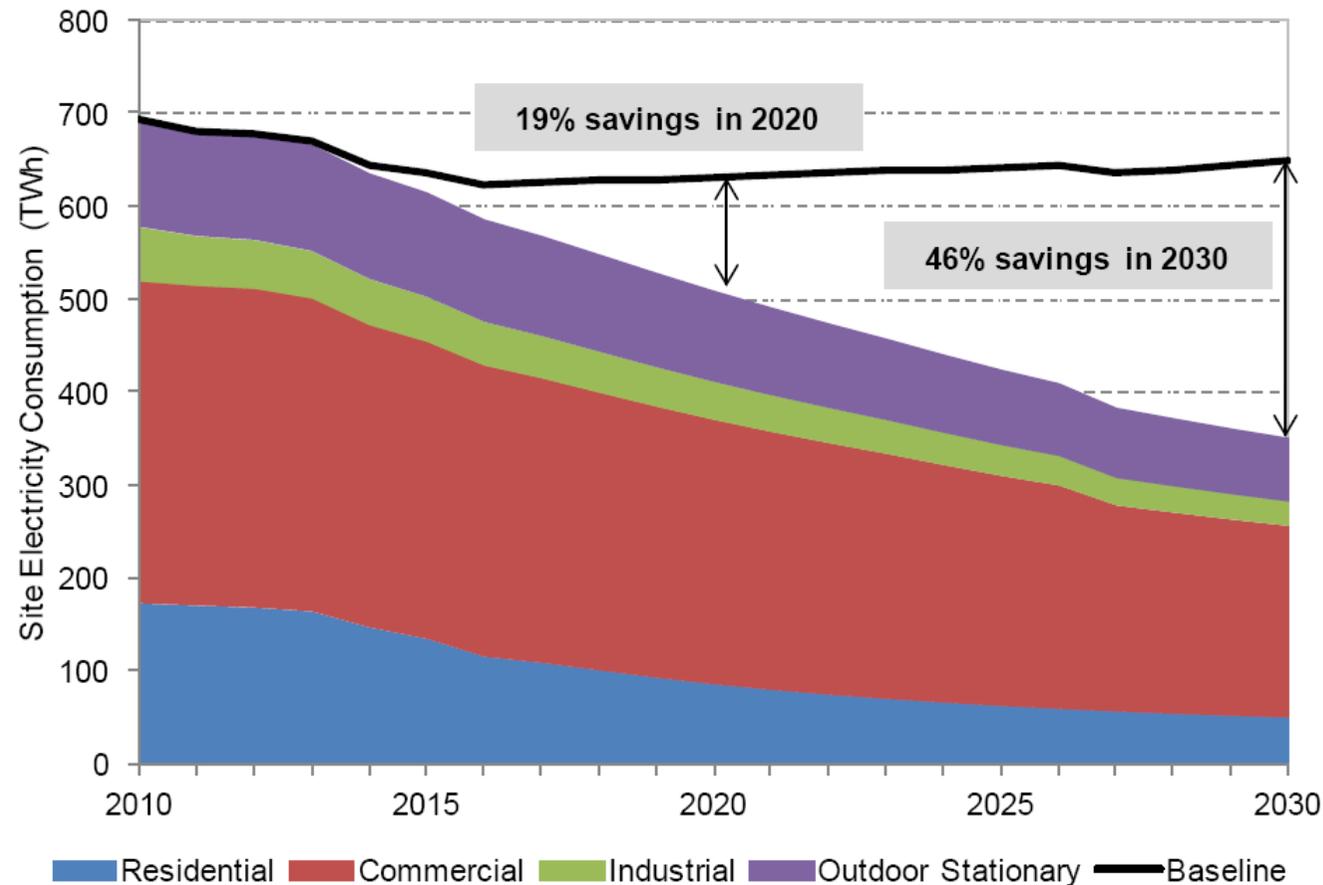
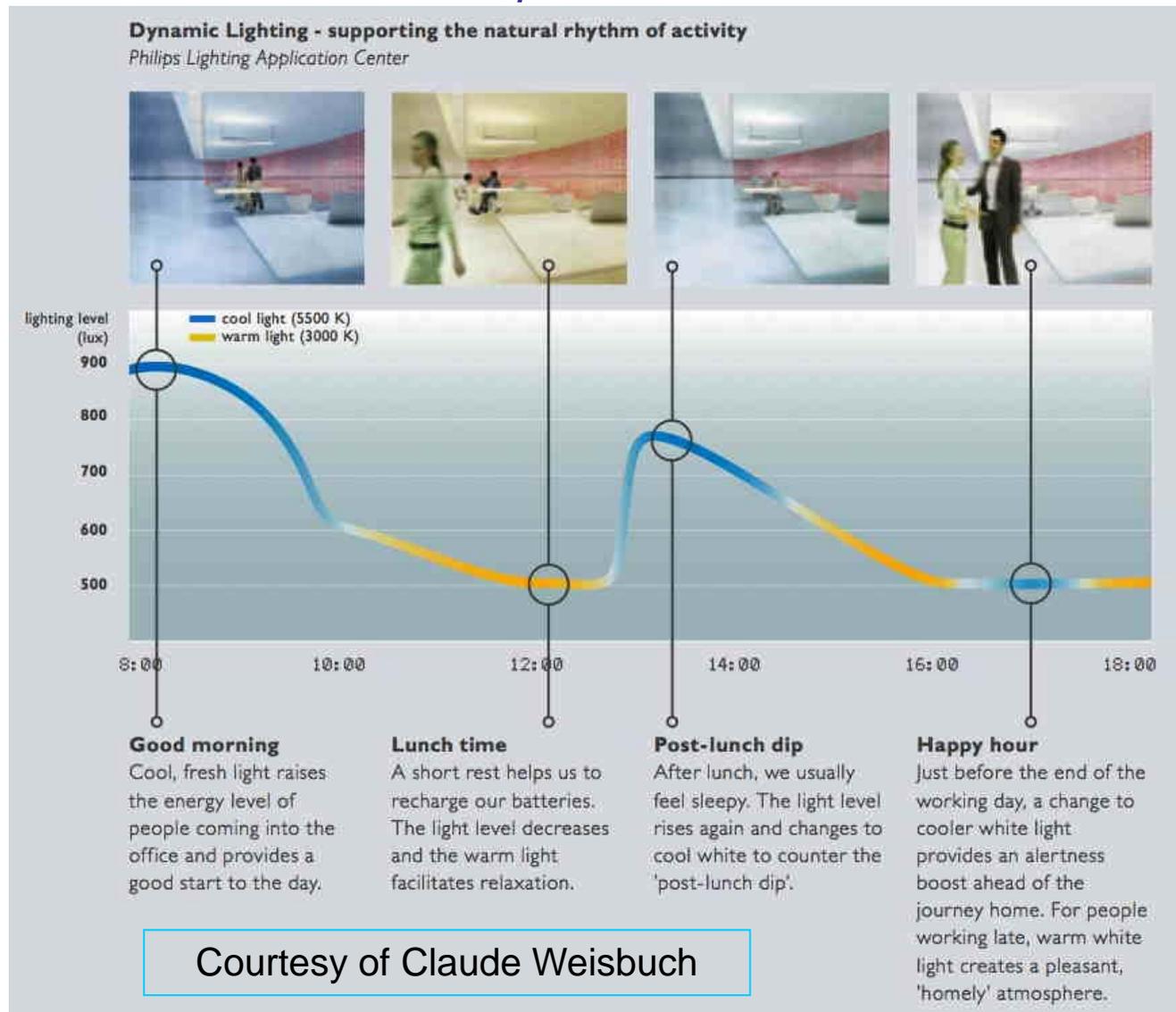


Figure 2.5: Forecasted U.S. Lighting Energy Consumption and Savings, 2010 to 2030

Fonte: US DoE, Solid State Lighting: Multi-year Program Plan, 2012

Illuminazione dinamica

può seguire il ritmo naturale delle attività, grazie a LED RGB con controllo indipendente della corrente



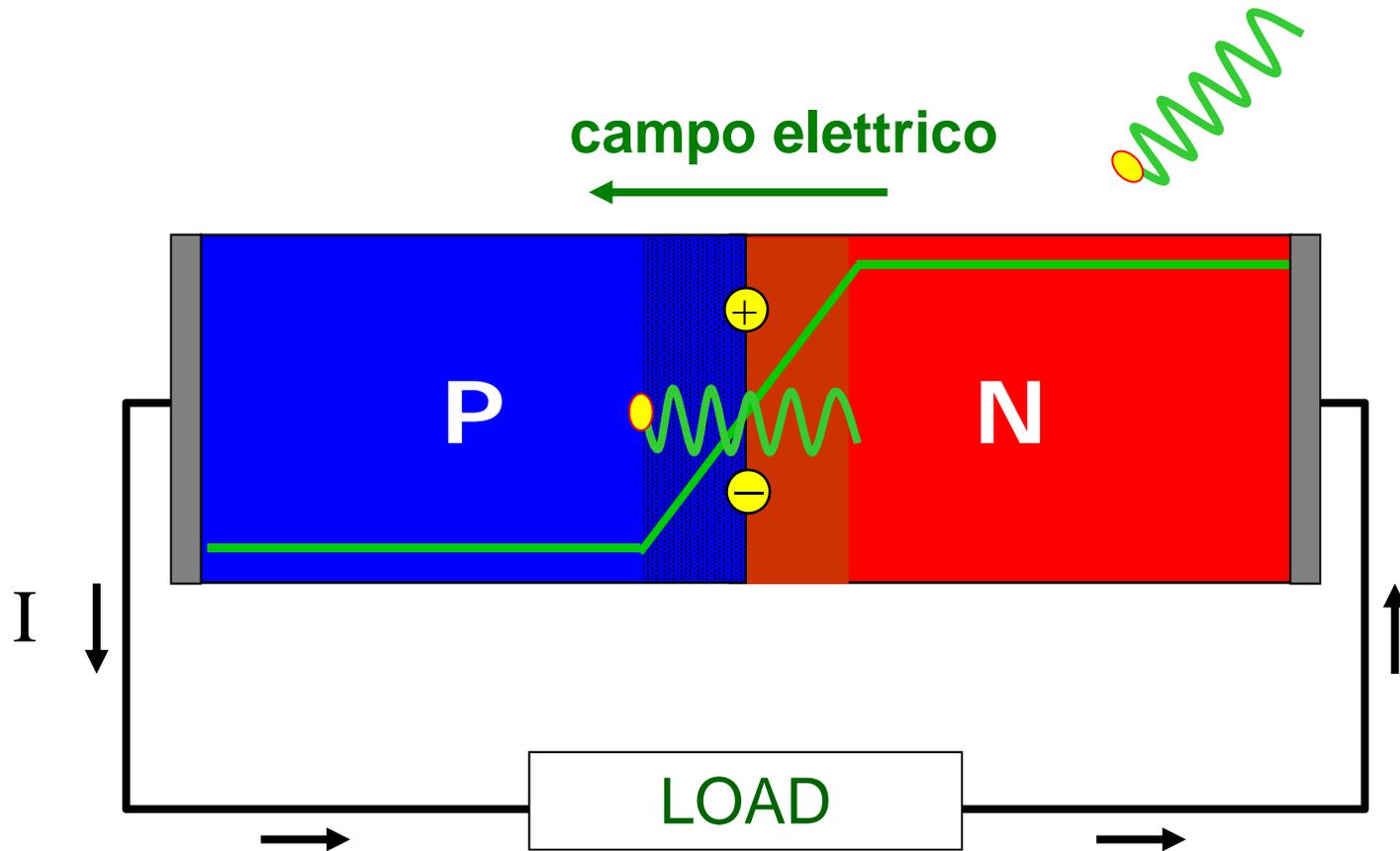
LED in sala operatoria



- Controllo del contrasto dei tessuti
 - Controllo del colore a seconda della durata dell'intervento
 - No emissione infrarossa → no emissione termica, fino a 6 °C in meno → comfort per il chirurgo e per il paziente
- ... e per la sala di recupero post-operatorio: luce “calda” per conciliare il riposo e il recupero!

Celle fotovoltaiche

Cella fotovoltaica: giunzione p-n illuminata



Una cella fotovoltaica funziona in maniera opposta a un LED o a un laser a semiconduttore: quando viene illuminata, la corrente prodotta ha il verso della corrente inversa del diodo

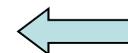
Il silicio: dalla sabbia ai micro-processori



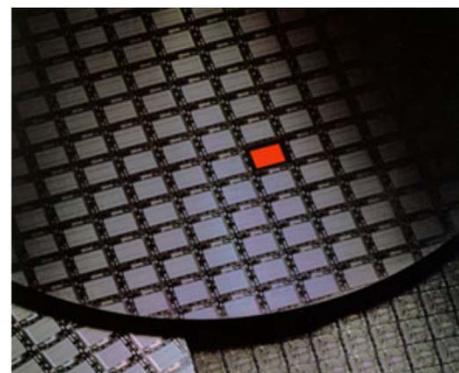
Lingotto



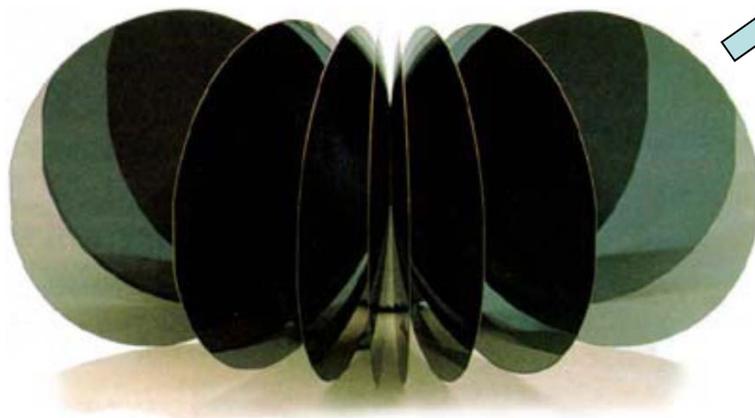
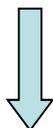
Silicio ultra-puro



Chip



Wafer



Cella solare



oppure



La tecnologia delle celle fotovoltaiche di semiconduttori
è molto vicina alle tecnologie della microelettronica

Celle fotovoltaiche di silicio (wafer)

Silicio mono-cristallino

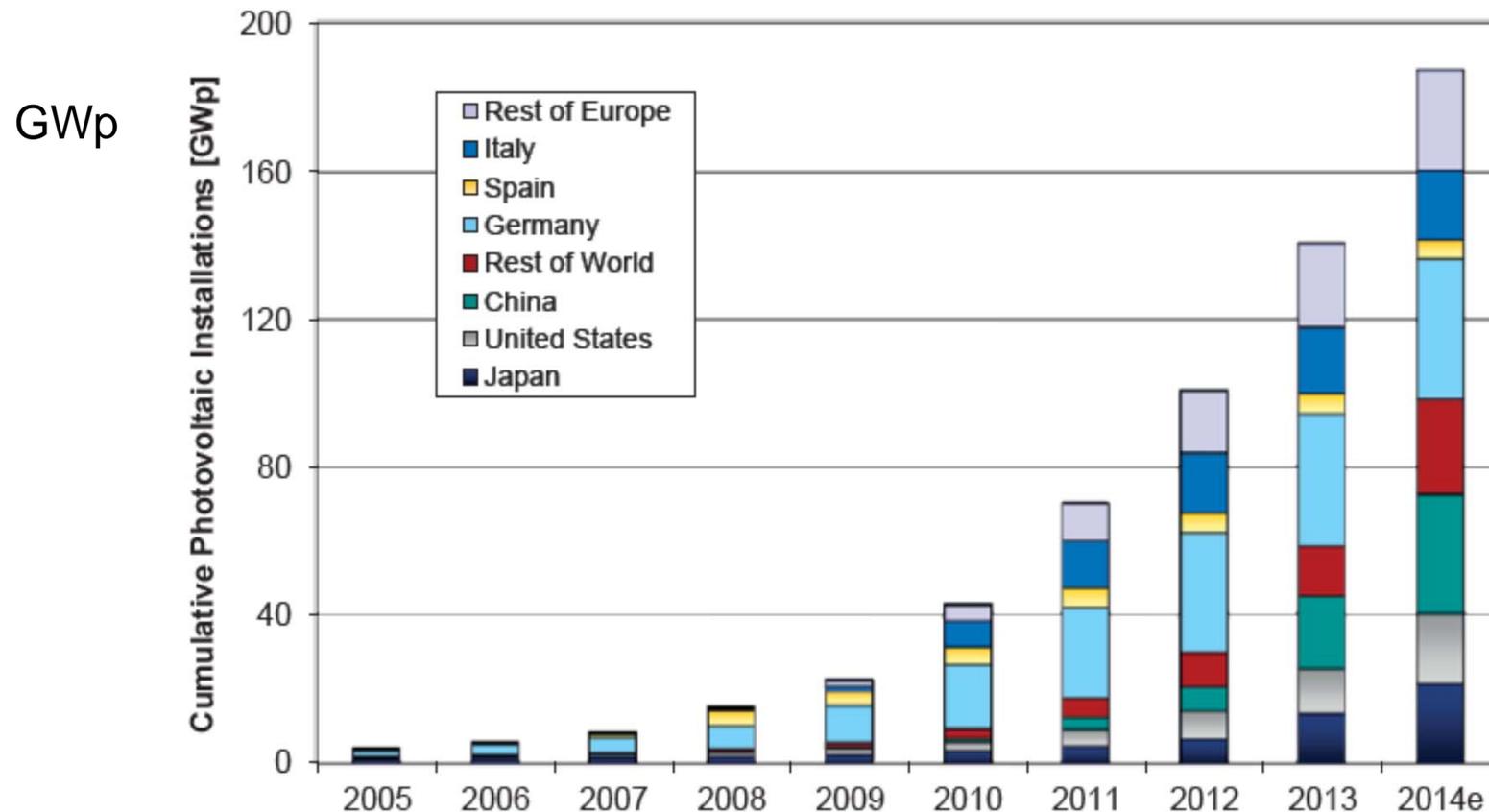


Silicio poli-cristallino



Le celle fotovoltaiche basate su fette (wafer) di silicio coprono circa il 90% del mercato mondiale del fotovoltaico

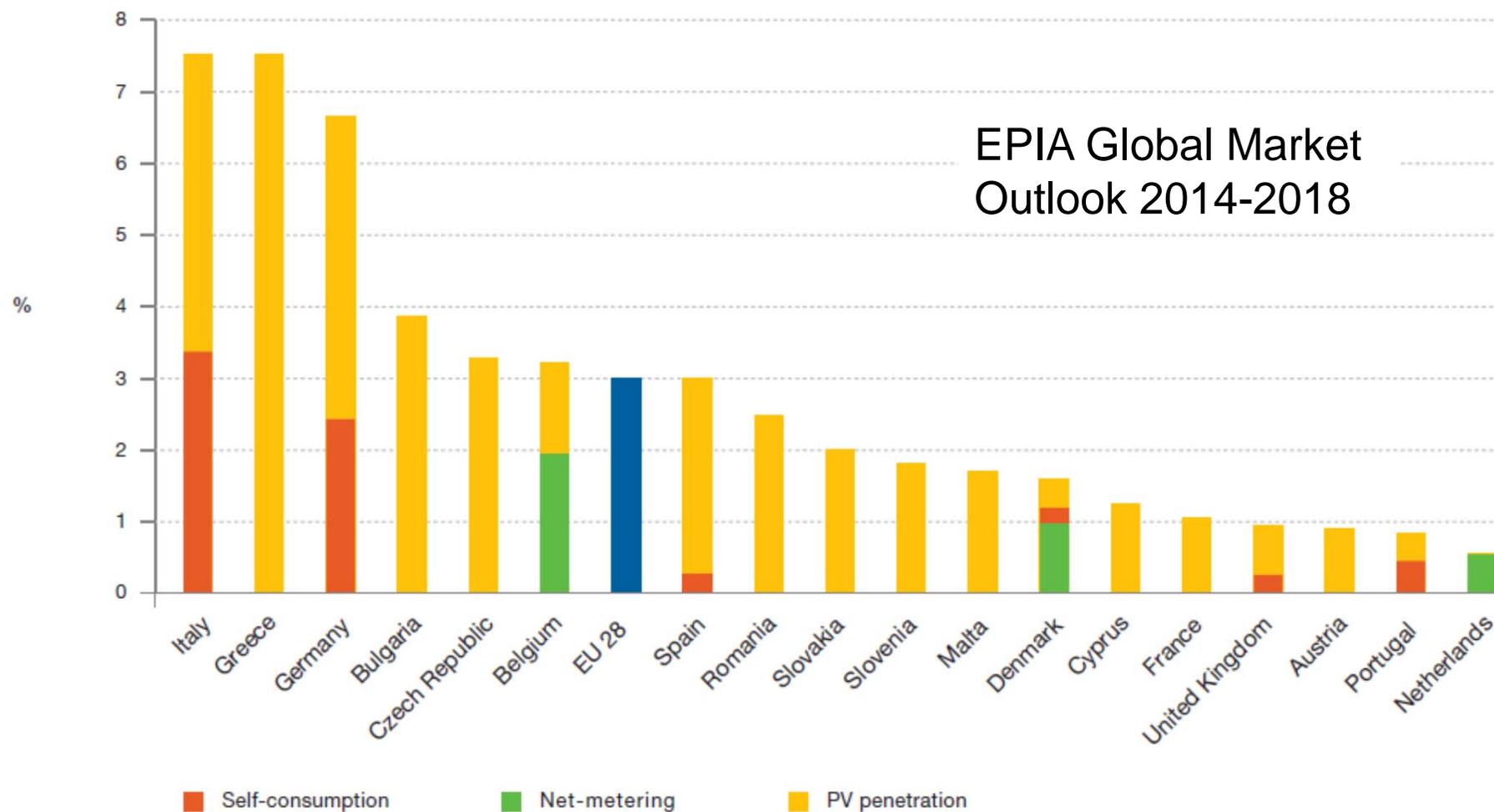
Potenza fotovoltaica installata: evoluzione storica



Fonte: JRC EU PV report 2014

Il tasso di crescita annuo è ~30%, con un tempo di raddoppio fra 2 e 3 anni e una continua riduzione dei costi grazie all'economia di scala

Contributo del fotovoltaico al consumo di energia in EU 28 nel 2013



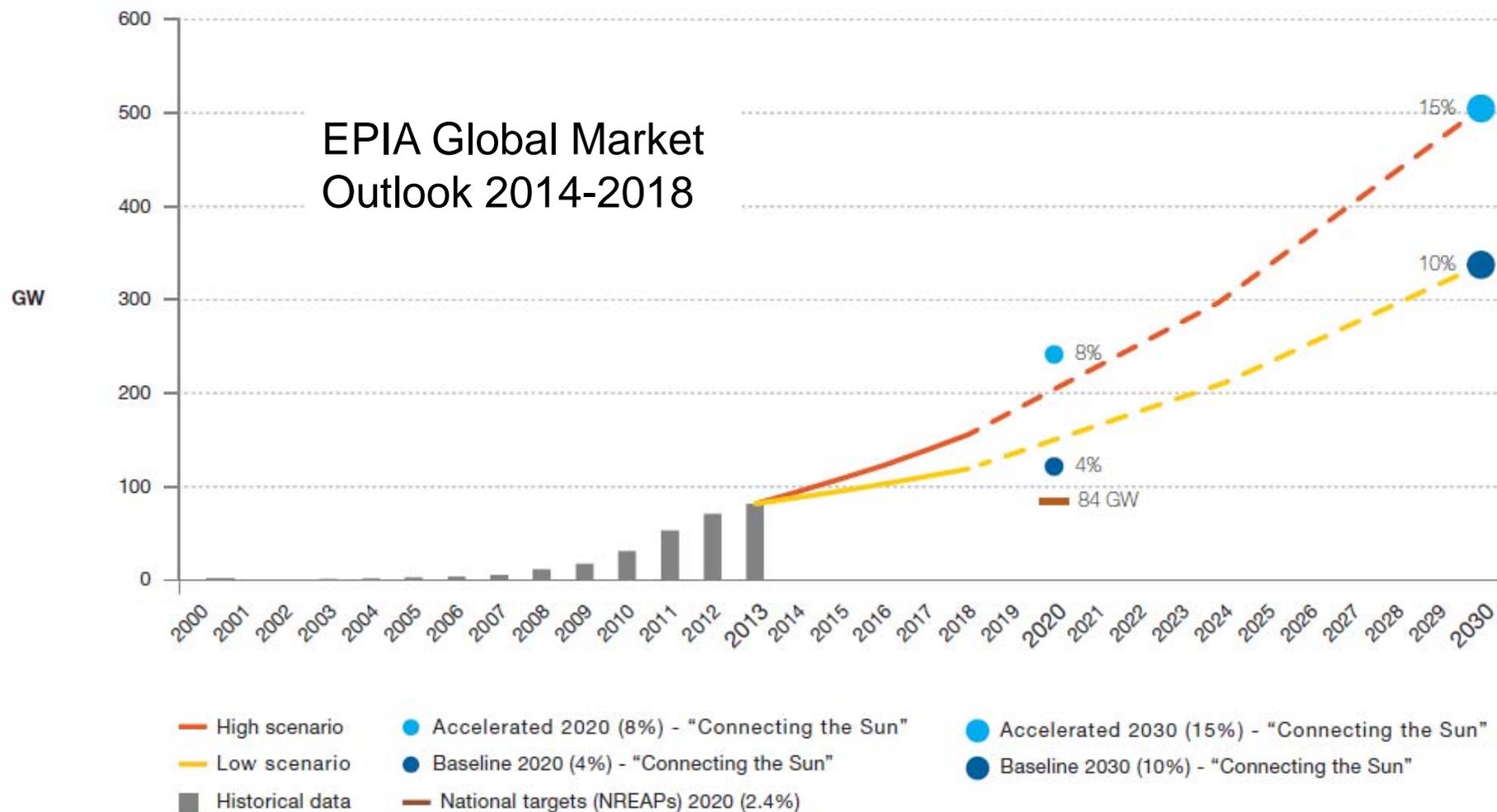
Fotovoltaico in Italia



In Italia è attualmente installata e connessa alla rete una potenza fotovoltaica pari a 18.2 GW (novembre 2015).

Con questi numeri, il fotovoltaico in Italia può contribuire fino al 30% della potenza di picco (~56 GW) e circa il 7% dell'energia elettrica prodotta in un anno (~300 TWh).

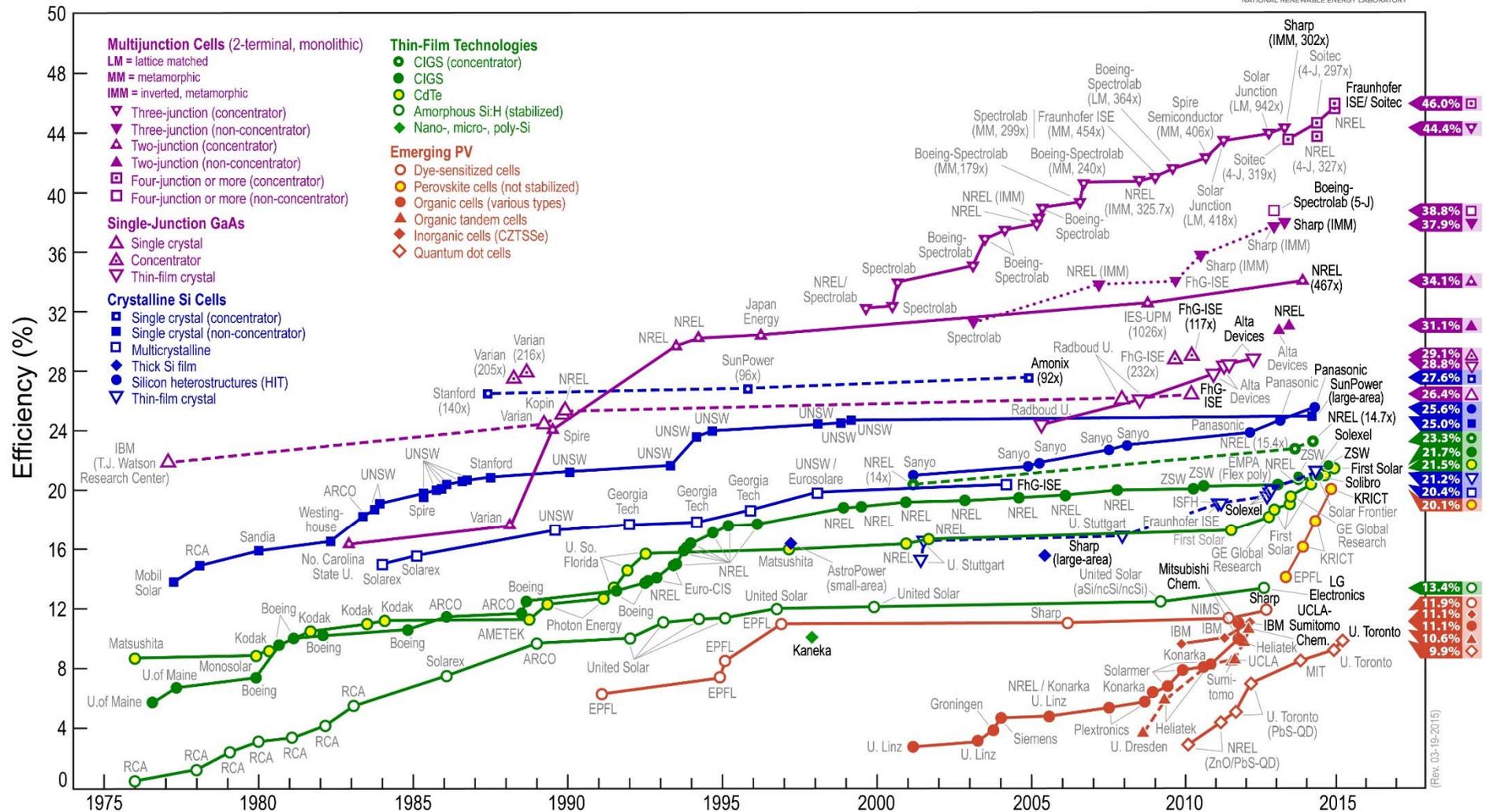
Previsioni sulla capacità cumulativa installata in EU28 fino al 2030



Best research-cell efficiencies

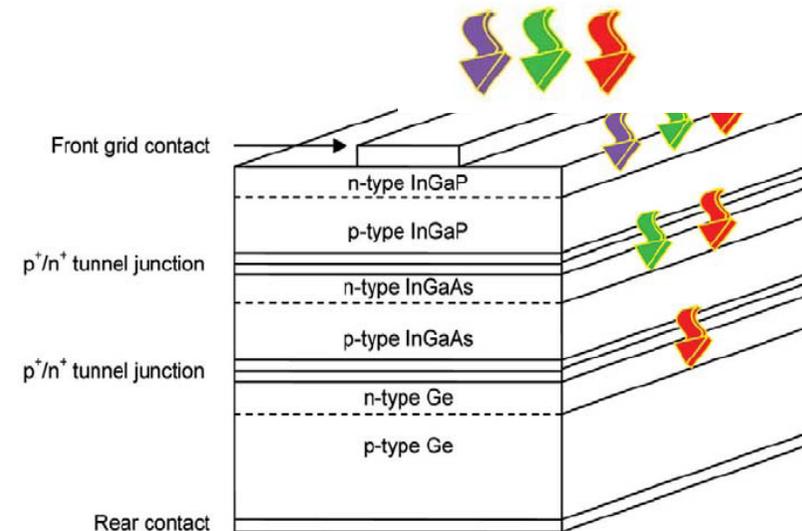
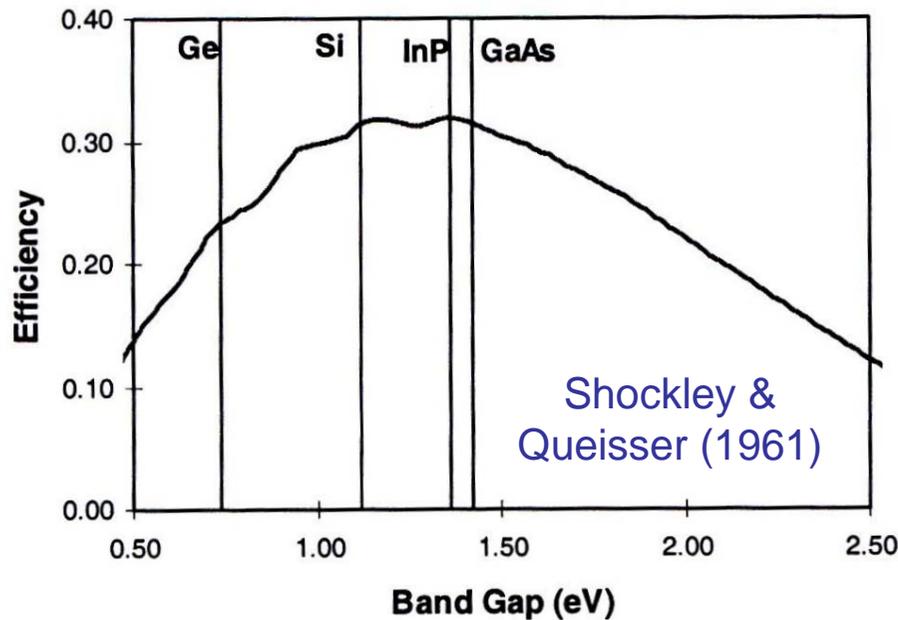


Best Research-Cell Efficiencies



Fotovoltaico: la ricerca

Obiettivo: aumentare l'efficienza delle celle solari esistenti verso i limiti termodinamici per singola giunzione (c-Si) e per multipla giunzione



- Limite termodinamico di efficienza per celle solari di silicio: ~33%
- Record attuale per celle di c-Si: 25.6% (Panasonic, 2014)

- Limite termodinamico di efficienza per celle a tripla giunzione con concentrazione: ~63.8%
- Record attuale: 44.7% @ 297x (Fraunhofer-ISE, 2013)

+ *concentratori fluorescenti (ENI)*

Comunicazione ottica, silicon photonics

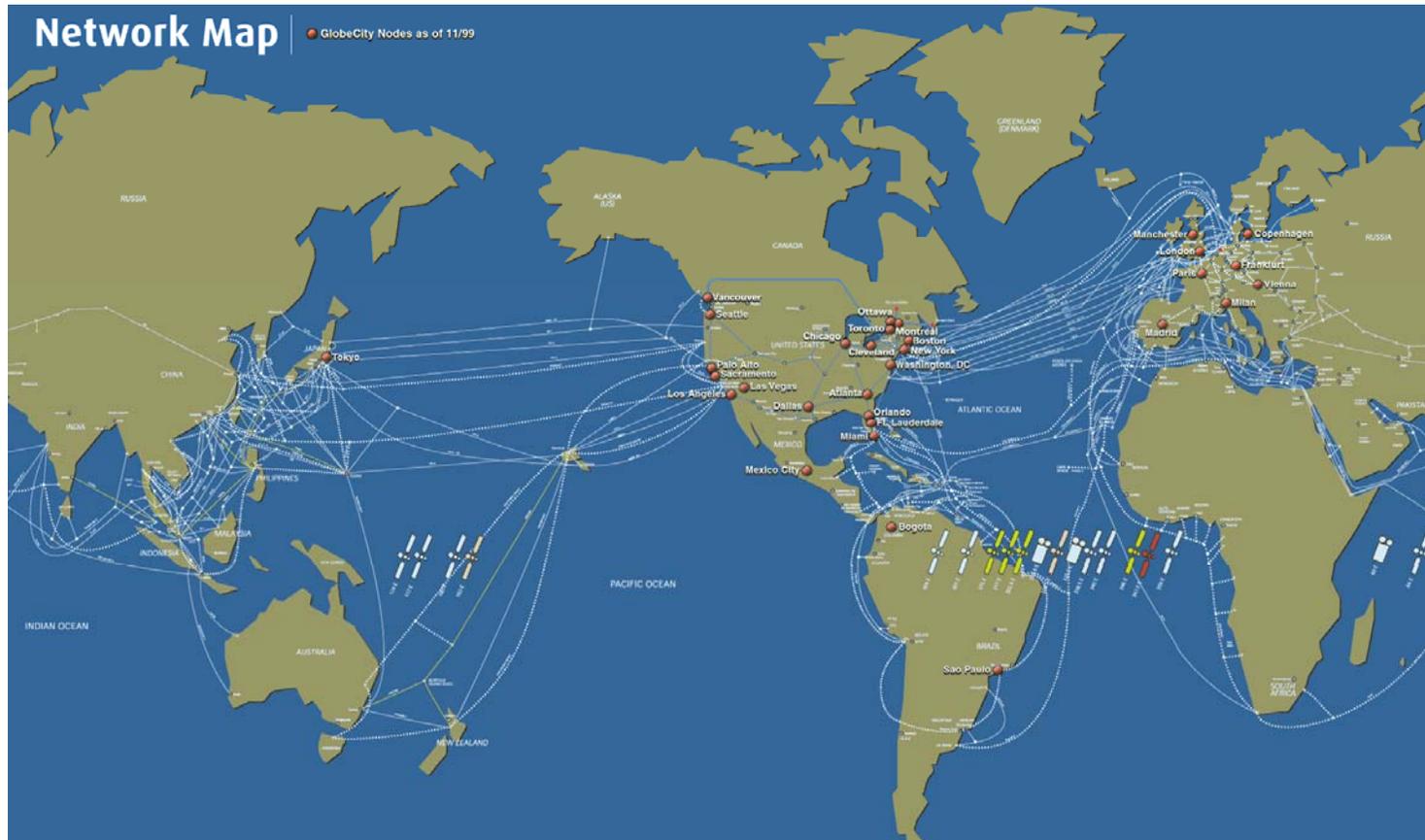
ICT - Information & Communication Technology



Informatica
(microelettronica)

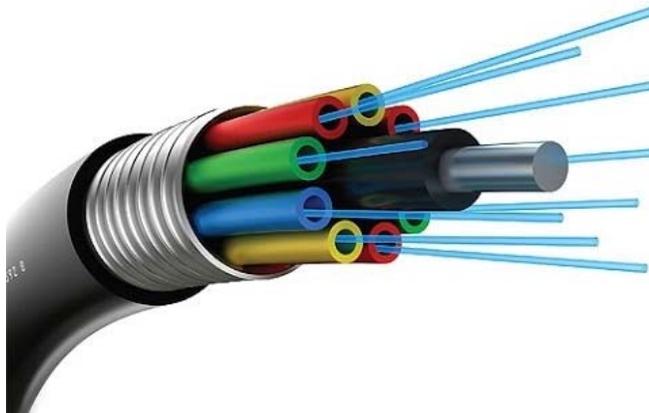
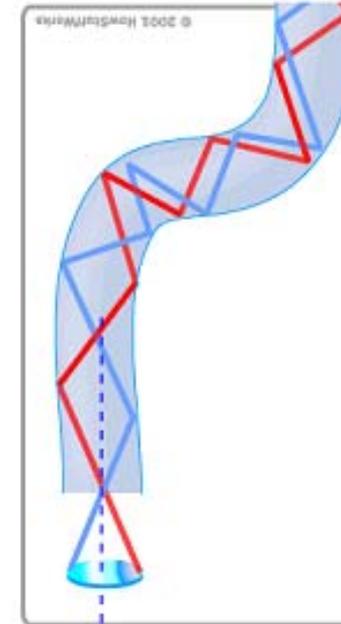
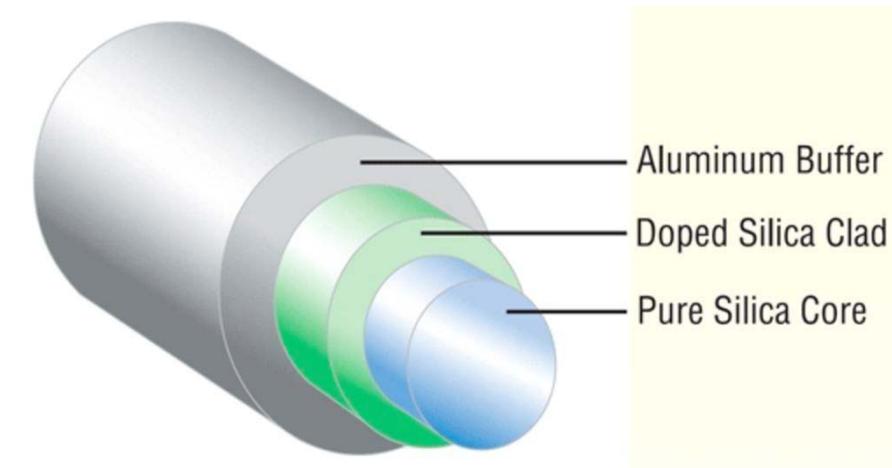
Telecomunicazioni
(elettriche e ottiche)

Comunicazione su fibra ottica



La telecomunicazione a lunga distanza avviene tramite la propagazione di luce in fibre ottiche di silice

Propagazione guidata in fibra ottica



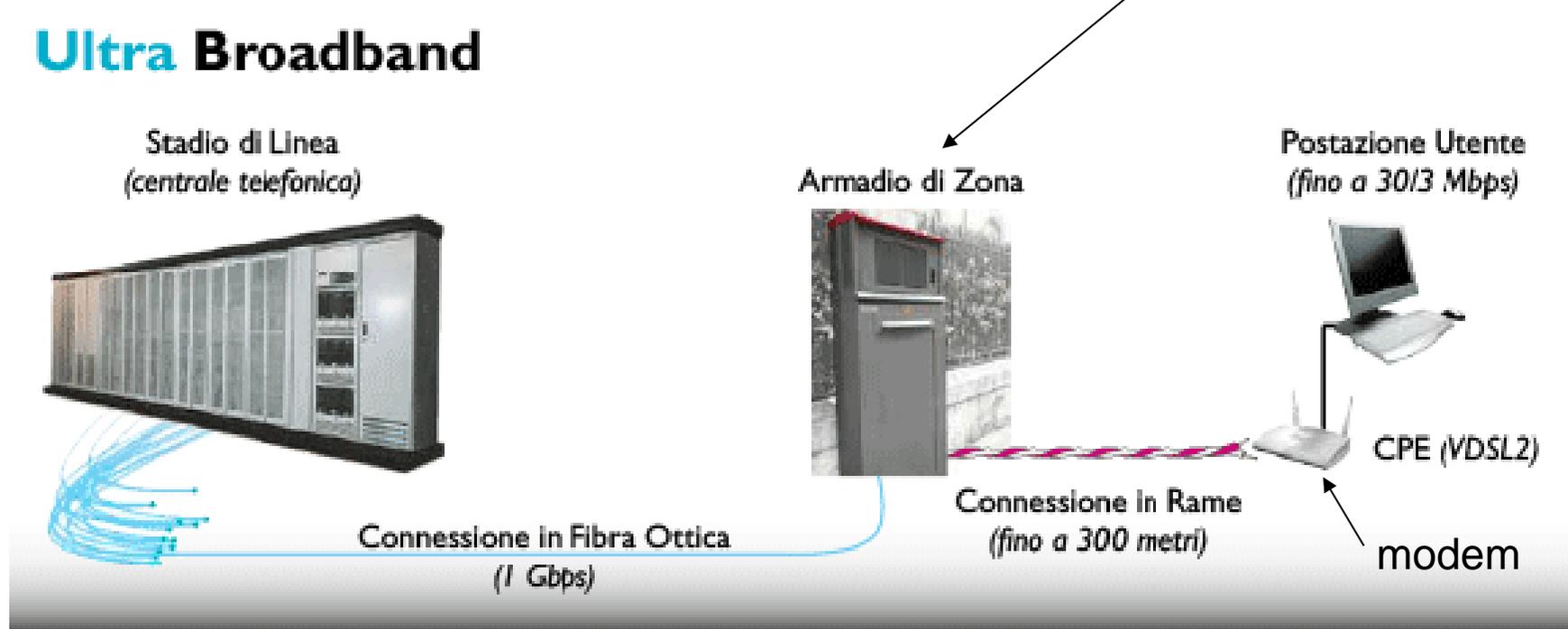
La propagazione in fibra ottica avviene tramite la riflessione totale interna, grazie alla differenza di indice di rifrazione fra core di silice pura e cladding di silice drogata.

La lunghezza d'onda è $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$.

Fin dove arriva la fibra ottica?

Il sistema più diffuso è il Fiber-To-The-Cabinet (armadio di zona)

Ultra Broadband



Il segnale ottico viene convertito in un segnale elettrico e ricevuto tramite il MODEM (modulation/demodulation)

Possiamo portare la fibra fino a casa e ricevere direttamente il segnale ottico?

Sì, ma occorre il ... modem ottico

modem elettrico



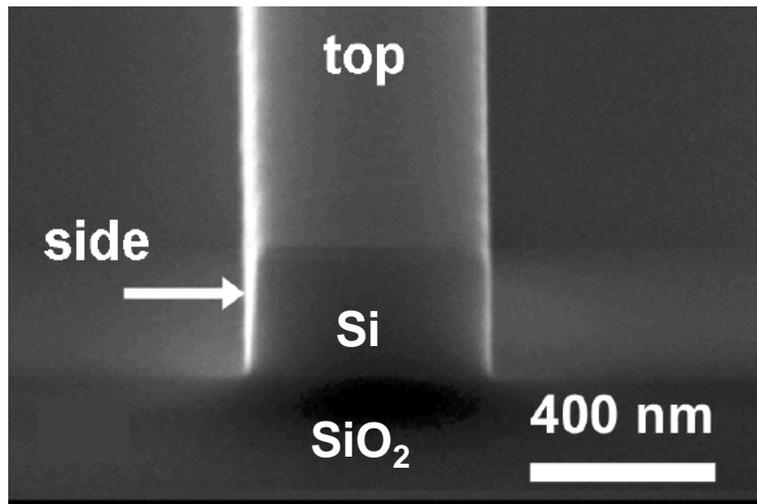
modem ottico



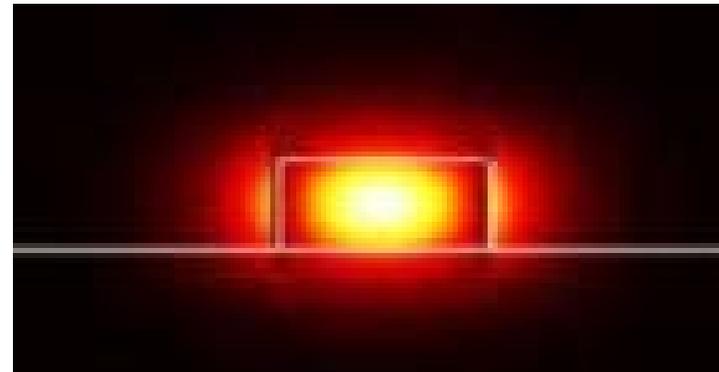
possiamo ... miniaturizzarlo?

Fotonica integrata su chip di silicio

Si strip waveguide on SiO₂



Optical mode profile



La luce a $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$ si può propagare in guide d'onda integrate di silicio grazie alla differenza di indice di rifrazione fra core di Si e cladding di SiO₂ o aria.

La fabbricazione è compatibile con la tecnologia CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) \Rightarrow integrazione fra microelettronica e fotonica!

Scala di lunghezza submicrometrica \Rightarrow **nanofotonica** (nanotecnologie)



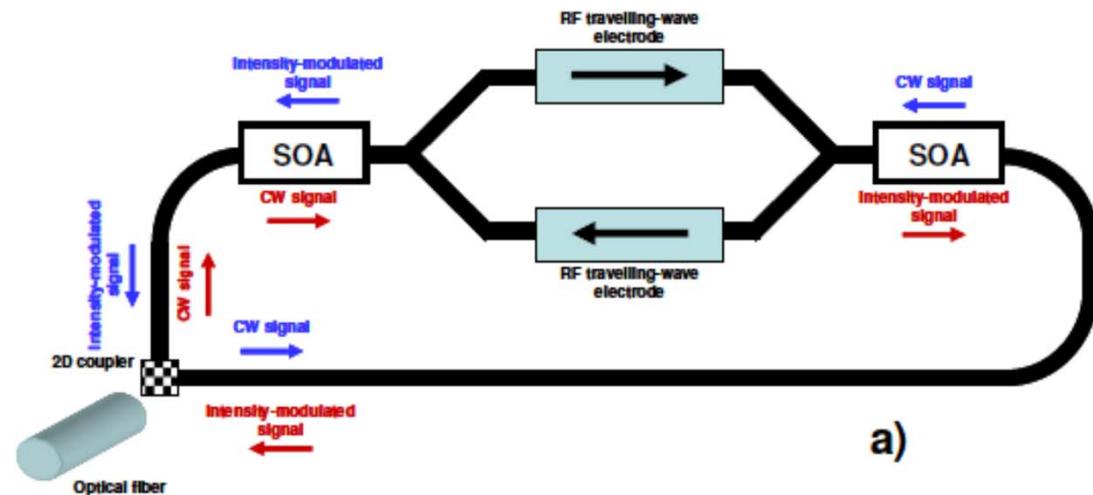
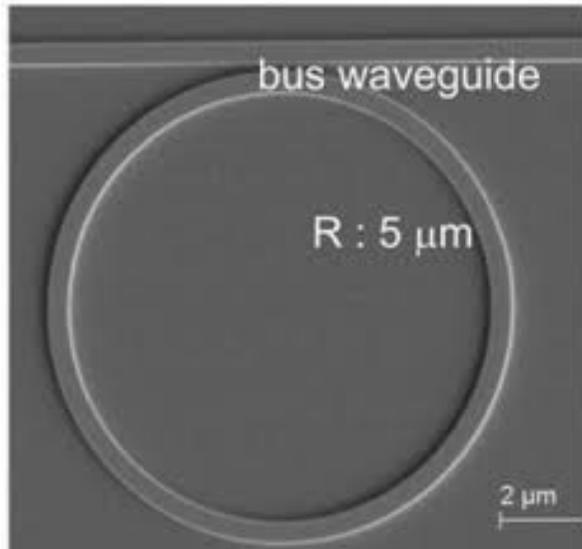
Progetto FABULOUS



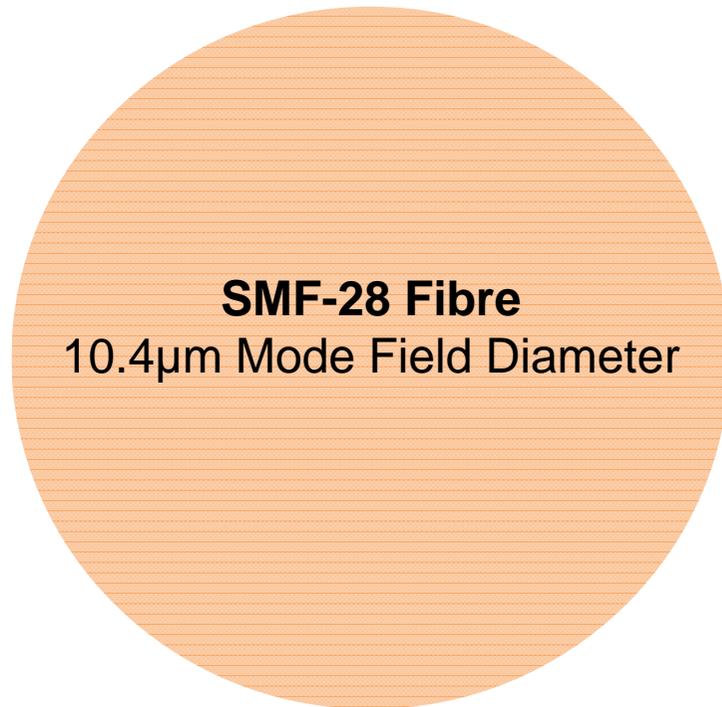
<http://www.fabulous-project.eu/>

UNIPV: Fisica + Ingegneria Industriale e dell'Informazione

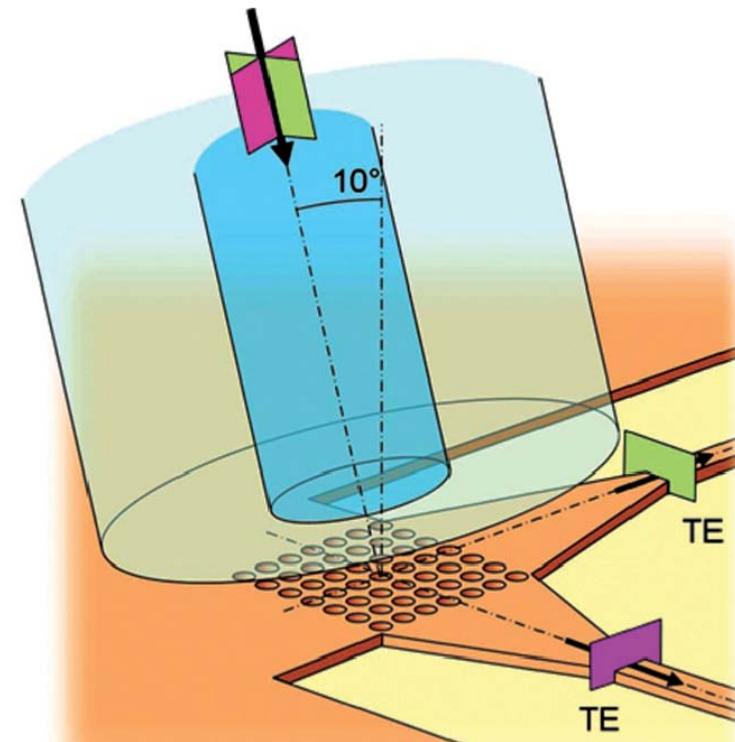
Obiettivo: realizzare un modem ottico (optical network unit, ONU) integrato su chip di silicio: SILICON PHOTONICS



Ma... come accoppiare la luce dalla fibra ottica alla guida in silicio?



Soluzione:
2D grating coupler



Vantaggi dell'integrazione on-chip

Dalla valvola a vuoto (triode)...



... al circuito integrato

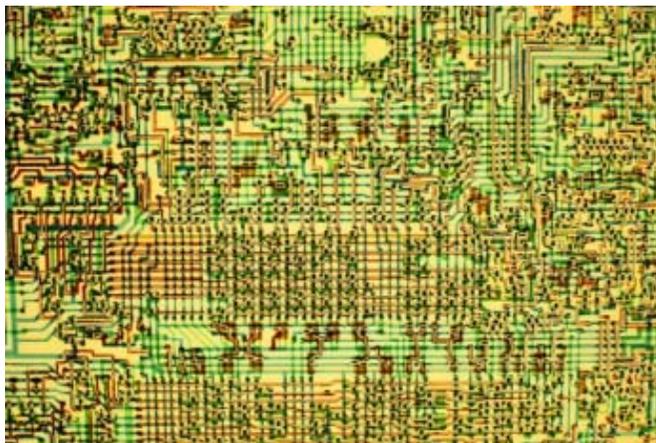
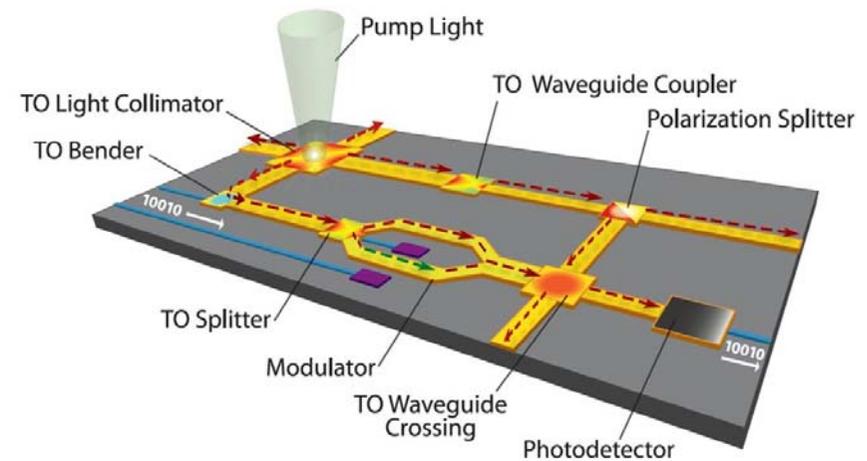


Photo from Intel Museum, Santa Clara

Dal modem ottico...

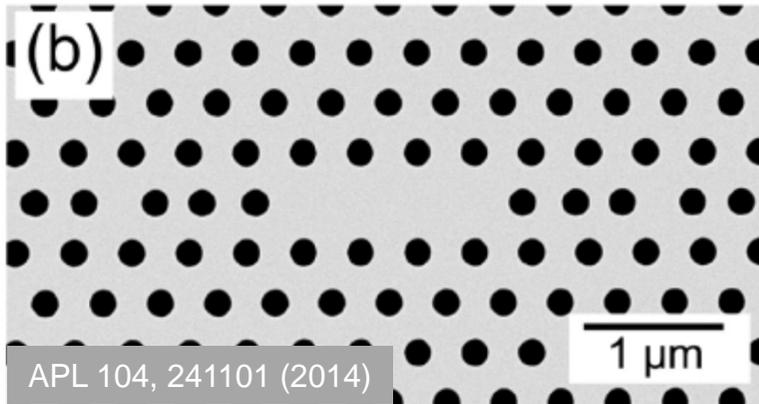


... al circuito fotonico integrato?

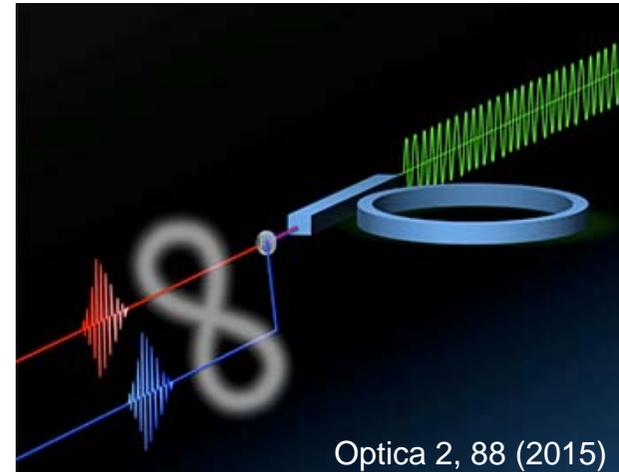


Silicon photonics: ricerca fondamentale e applicata...

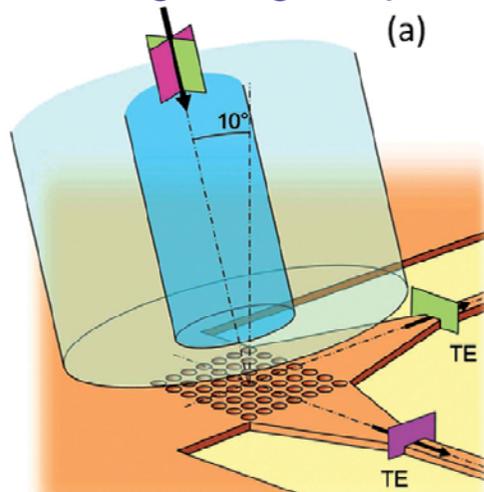
Ultra-high Q photonic crystal cavity



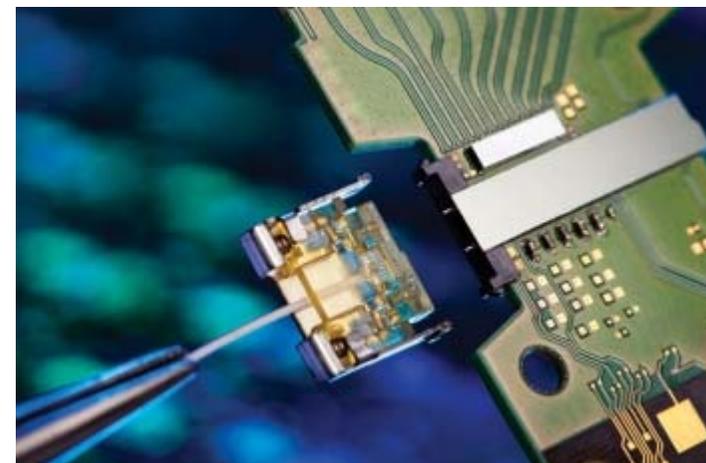
Generation of entangled photons



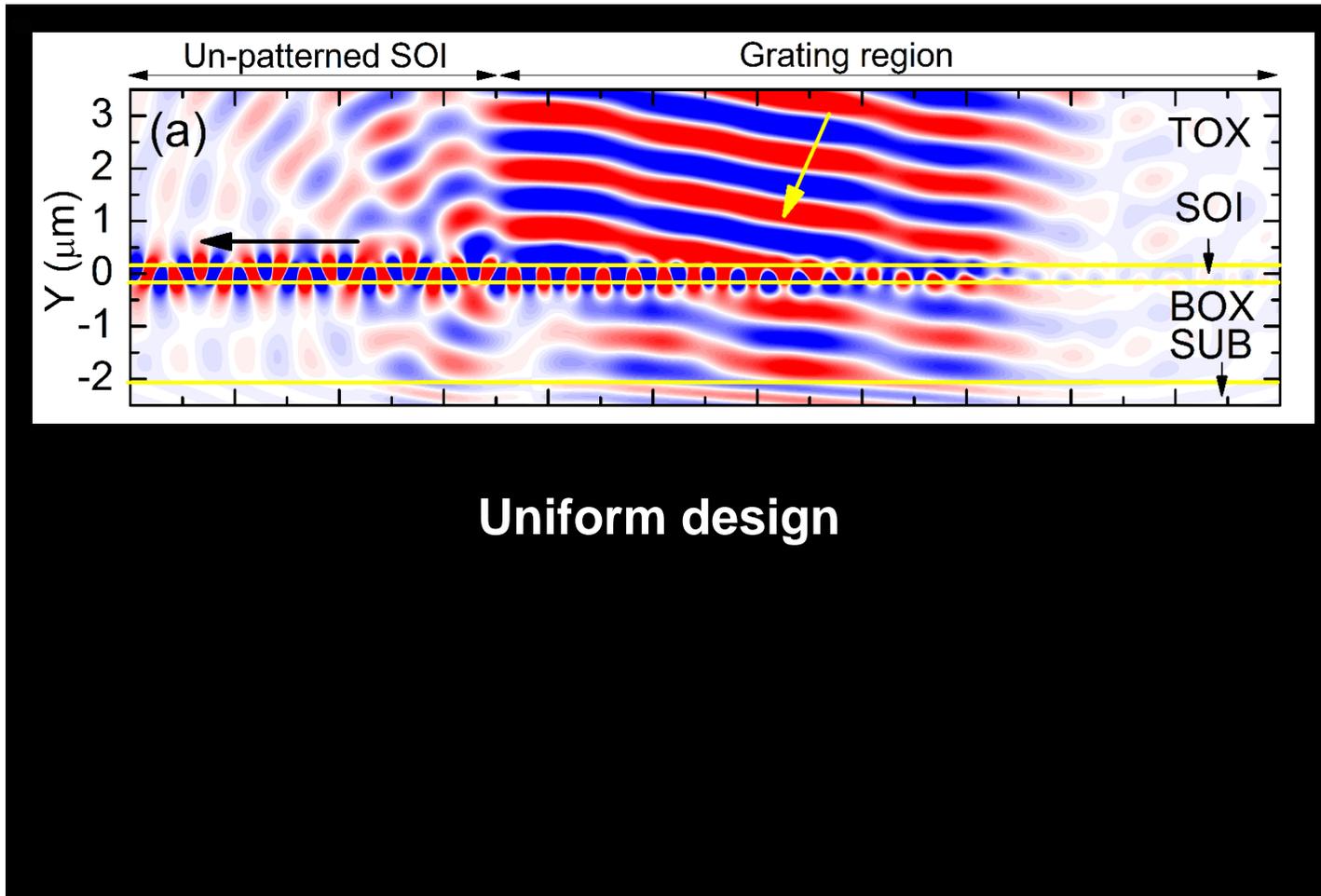
2D grating coupler



Intel's 50 Gbit transmitter/receiver

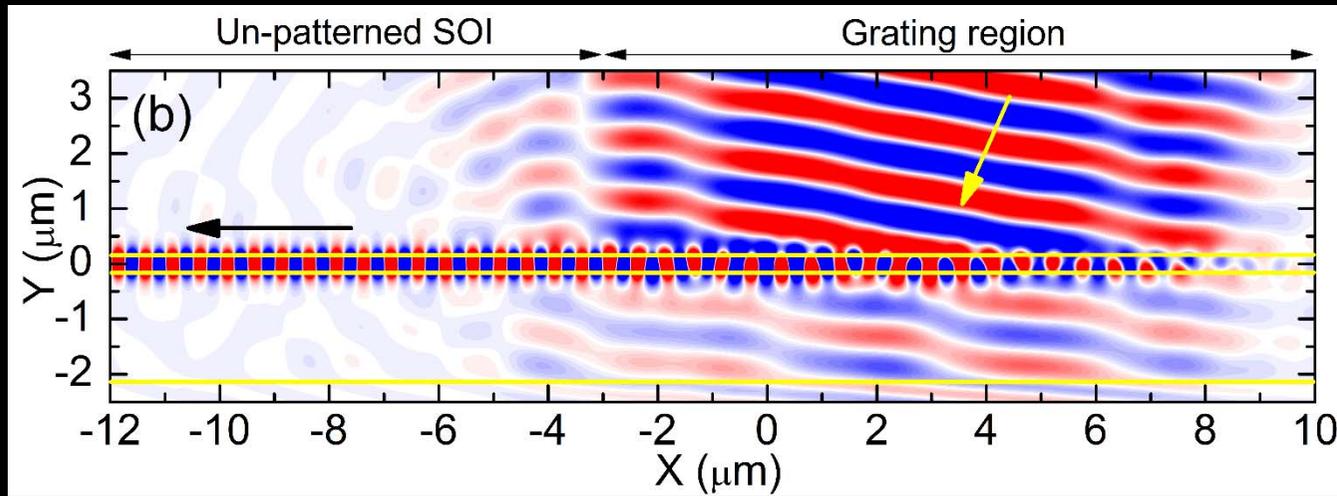


How the grating coupler works...



by Angelo Bozzola, see Opt. Expr. 23, 16289 (2015)

How the grating coupler works... even better



Apodized design

by Angelo Bozzola, see Opt. Expr. 23, 16289 (2015)

Altra applicazione della silicon photonics: data centers e consumo di energia



Circa il 5% dell'energia elettrica consumata negli USA è dovuta ai data centers. Questo numero è in rapida crescita.

Sostituendo i cablaggi in fibra ottica con interconnessioni su chip di silicio si risparmierebbe gran parte dell'energia.

Conclusioni: alcune parole chiave...

- Fisica dei semiconduttori, nanostrutture, microelettronica, fotonica, fotovoltaico, spettroscopia
- Fotonica integrata, silicon photonics: i vantaggi dell'integrazione... e delle nanotecnologie
- Molte altre ricerche a Pavia riguardanti la luce: sensori ottici, biofotonica, strutture fotoniche-plasmoniche, spettroscopia Raman...
- Ricerca fondamentale/applicata: due facce della stessa medaglia