

Tecnologie solari per la produzione elettrica: PV e Solare Termodinamico

prof. Mauro REINI

docente di sistemi per l'energia e l'ambiente
Università di Trieste – Polo di Pordenone

AA 2019-2020



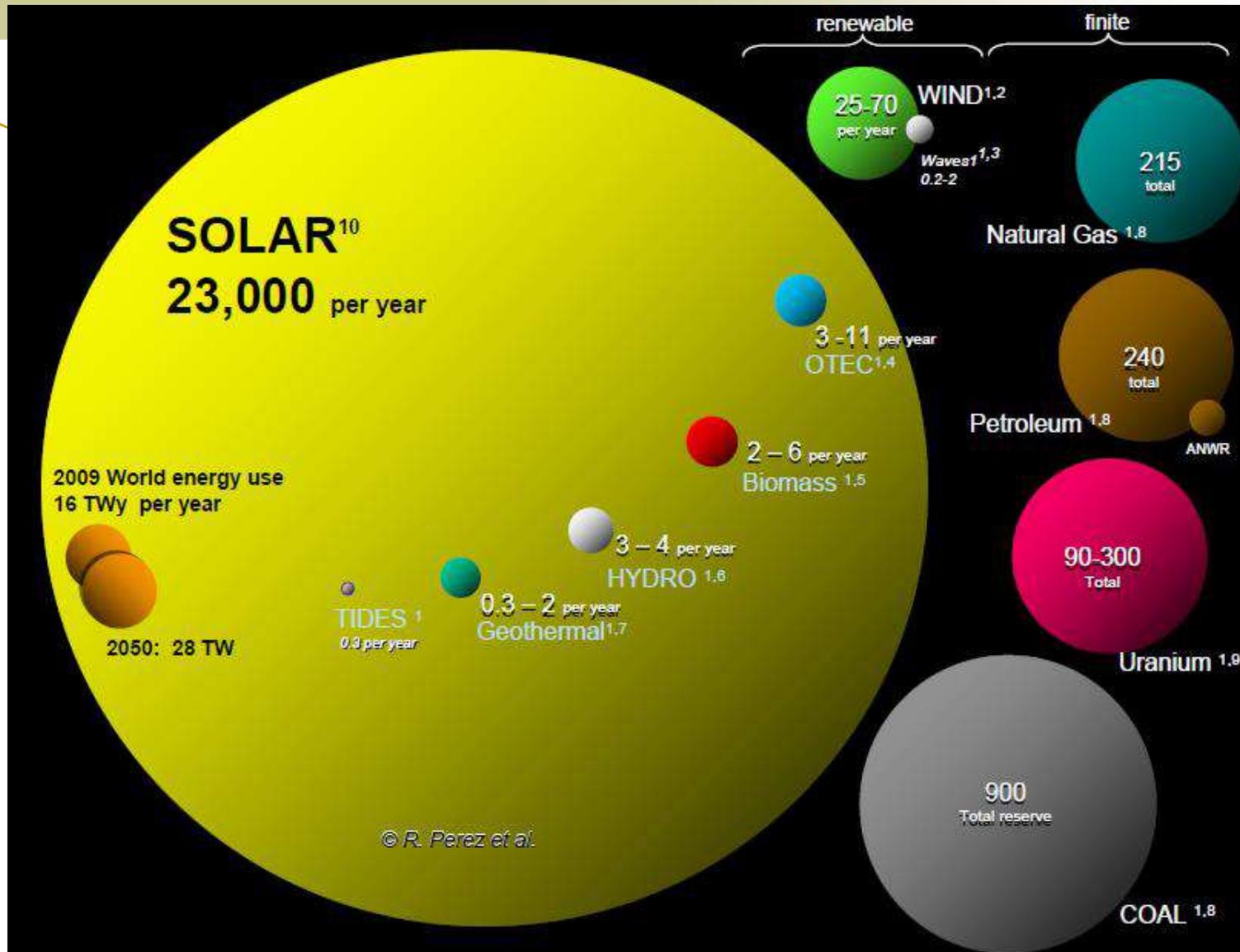
Consorzio di Pordenone
per la formazione
superiore, gli studi
universitari e la ricerca



Università degli Studi di
Trieste
Polo Didattico e
Culturale di Pordenone

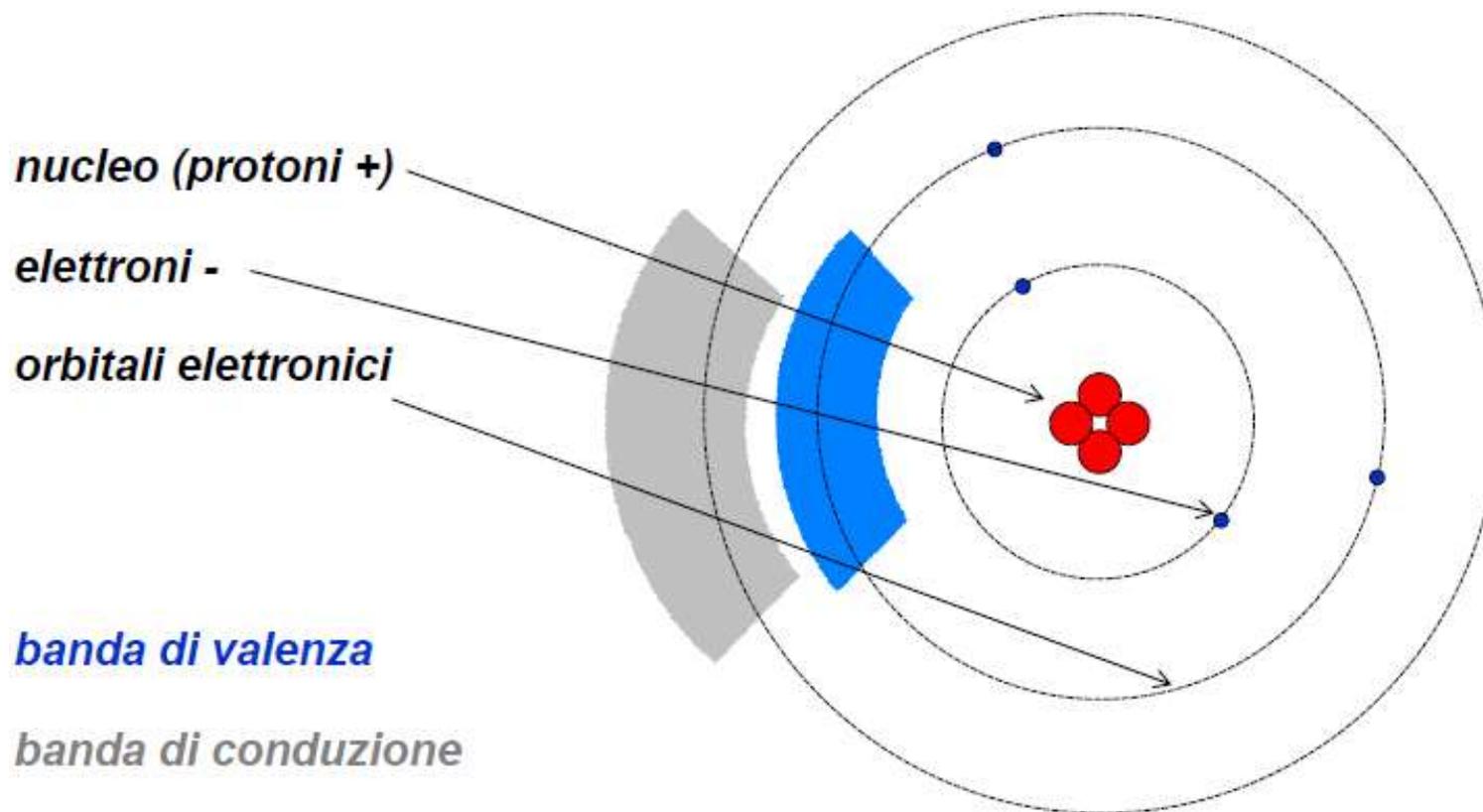


Potenziale delle FER

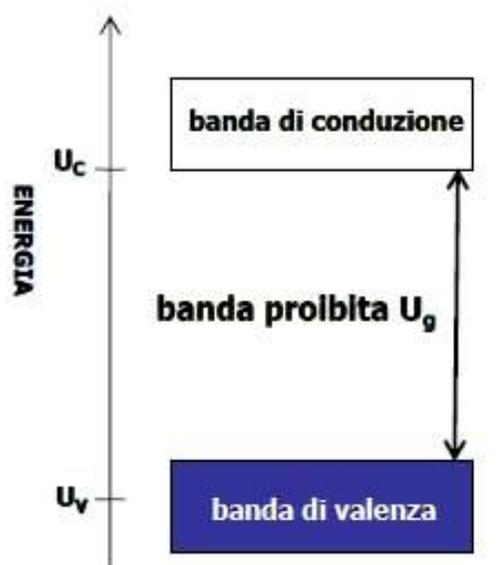


Principio di funzionamento delle celle PV - Effetto fotovoltaico

Il modello dell'atomo di Bohr



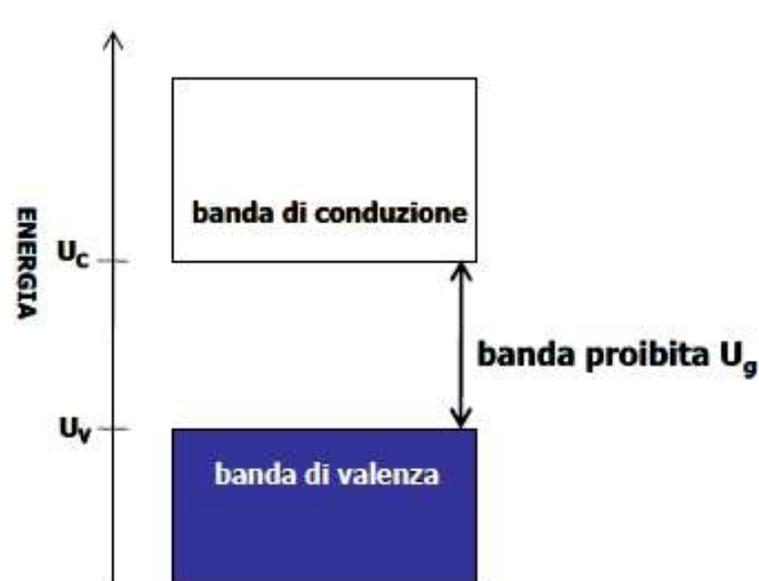
Principio di funzionamento delle celle PV - Effetto fotovoltaico



Materiali isolanti



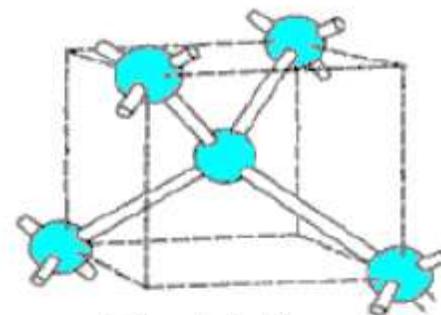
Materiali conduttori



Materiali semiconduttori

Principio di funzionamento delle celle PV - Effetto fotovoltaico

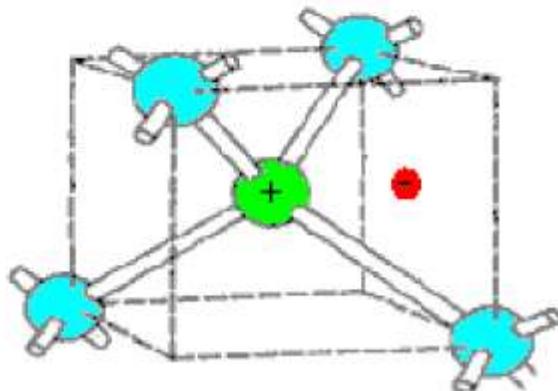
DROGAGGIO (*doping*) = aggiunta controllata di impurezze all'interno di un semiconduttore



Si cristallino

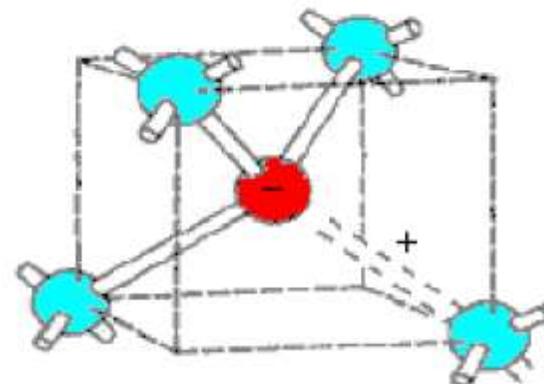
drogaggio tipo n

(atomo donatore) (*fosforo*)

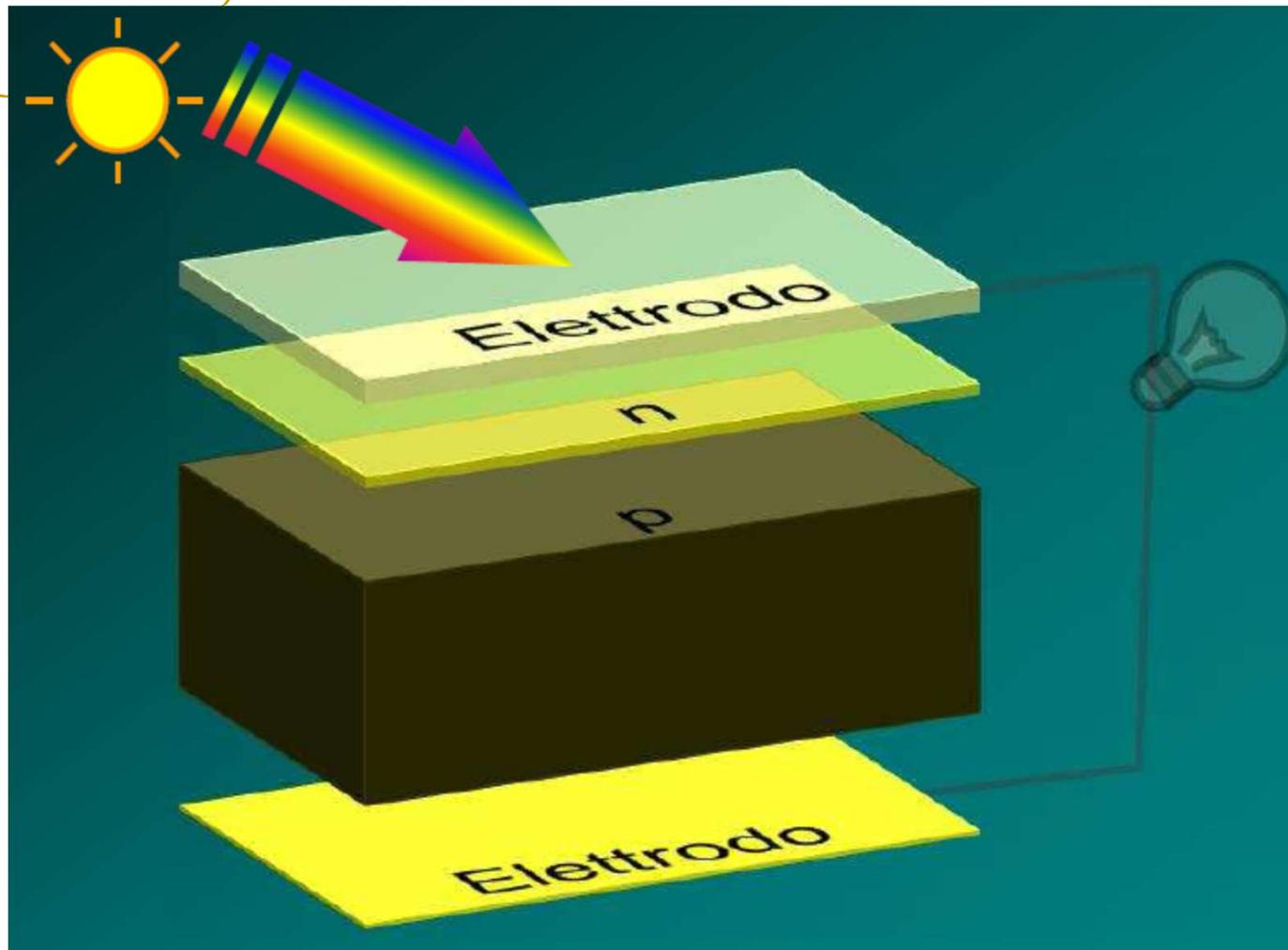


drogaggio tipo p

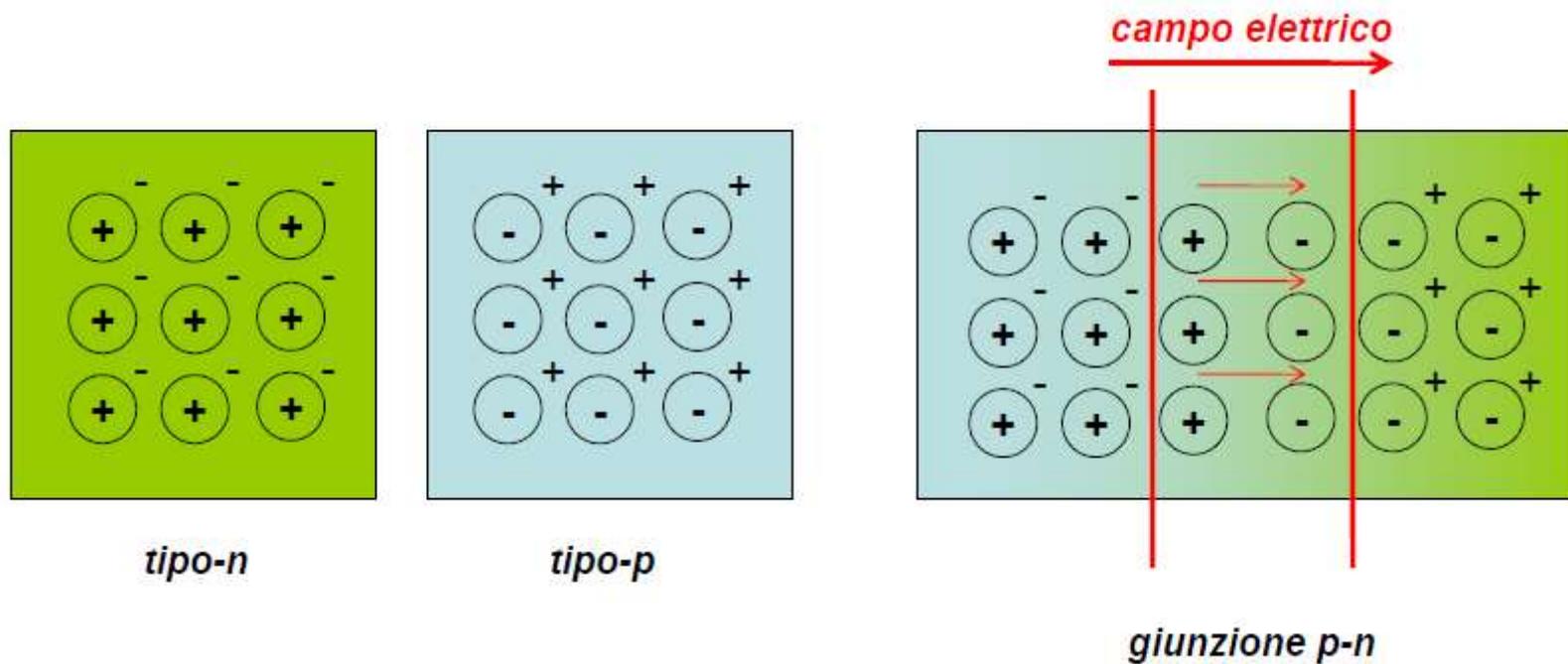
(atomo accettore) (*boro*)



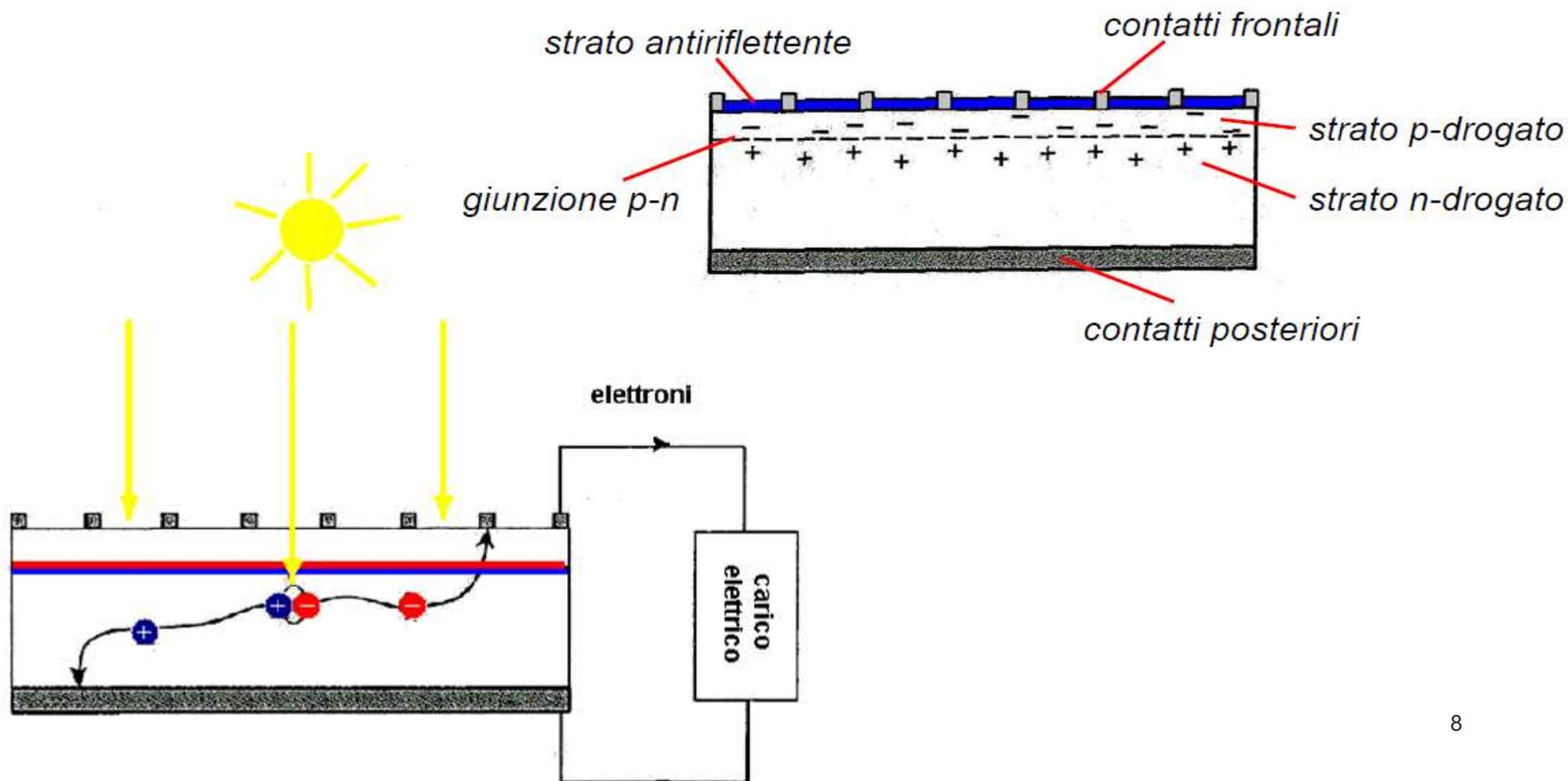
Principio di funzionamento delle celle PV - Effetto fotovoltaico



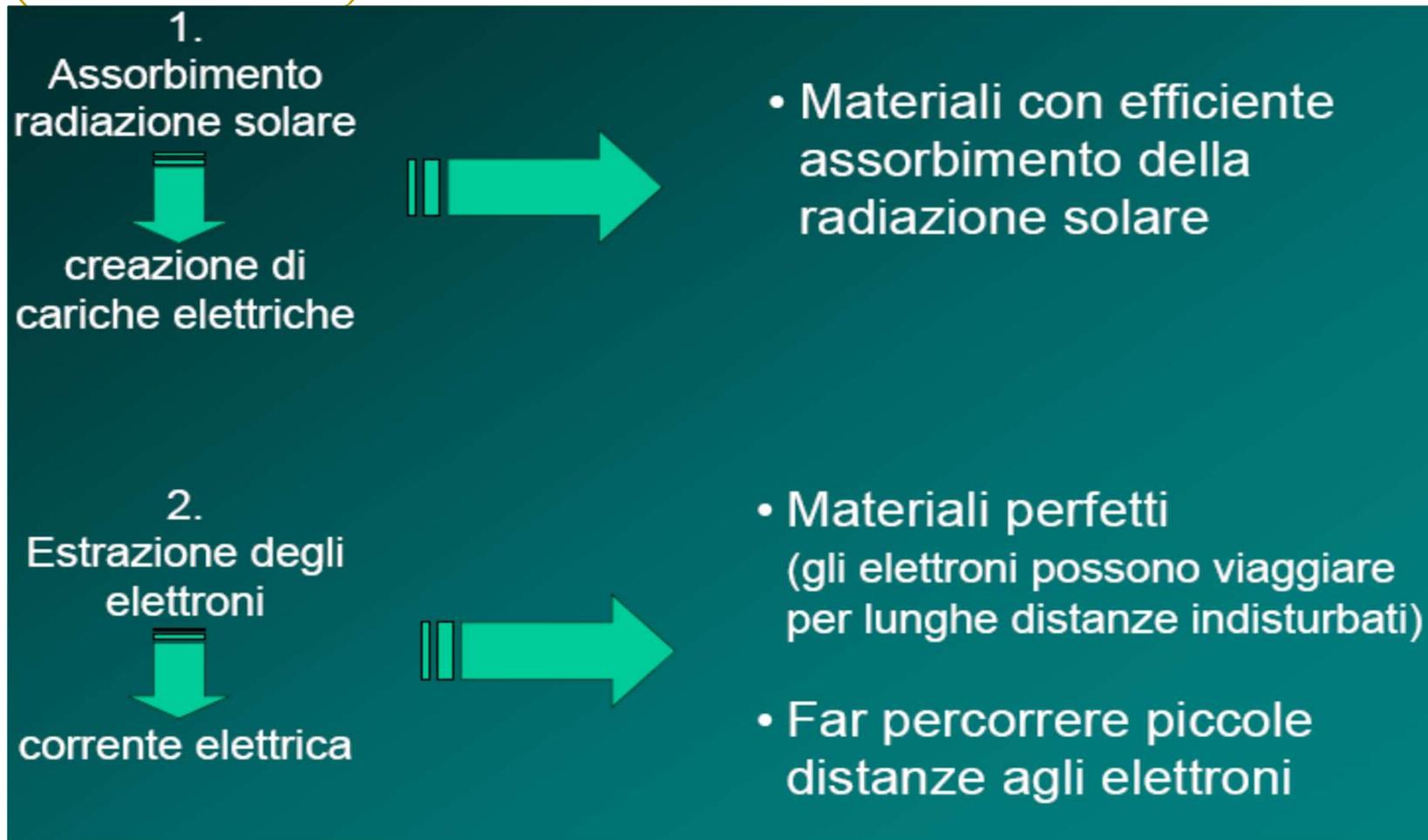
Principio di funzionamento delle celle PV - Effetto fotovoltaico



Principio di funzionamento delle celle PV - Effetto fotovoltaico

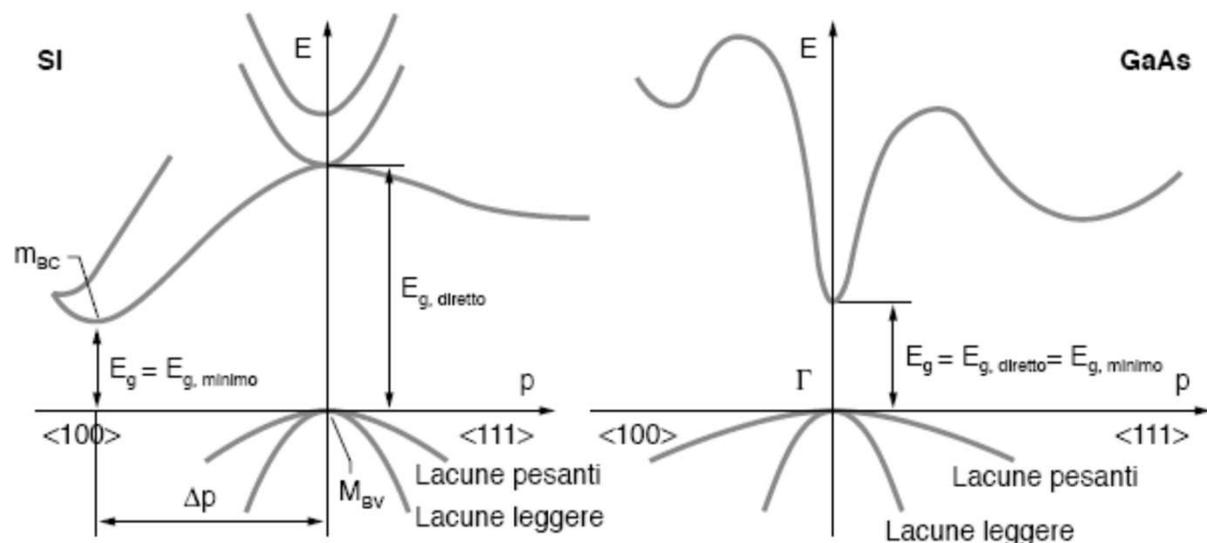
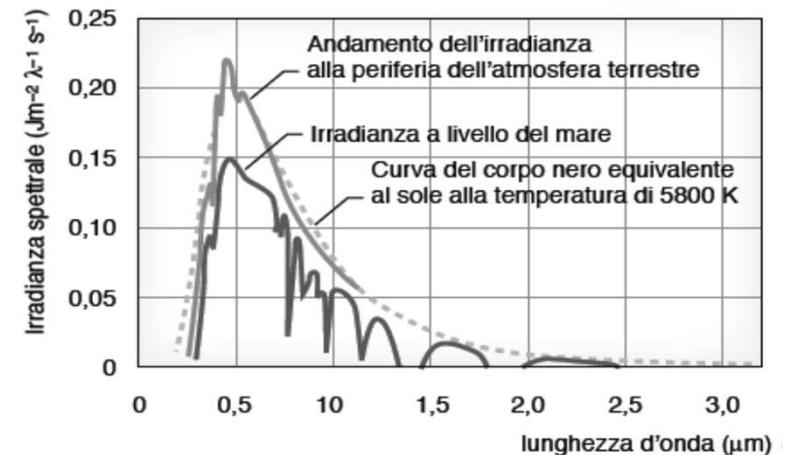


Principio di funzionamento delle celle PV

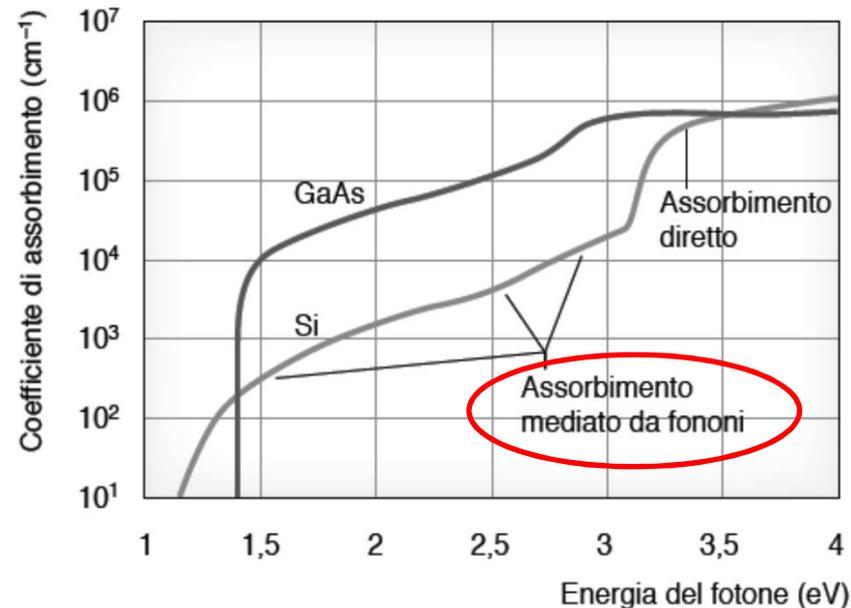
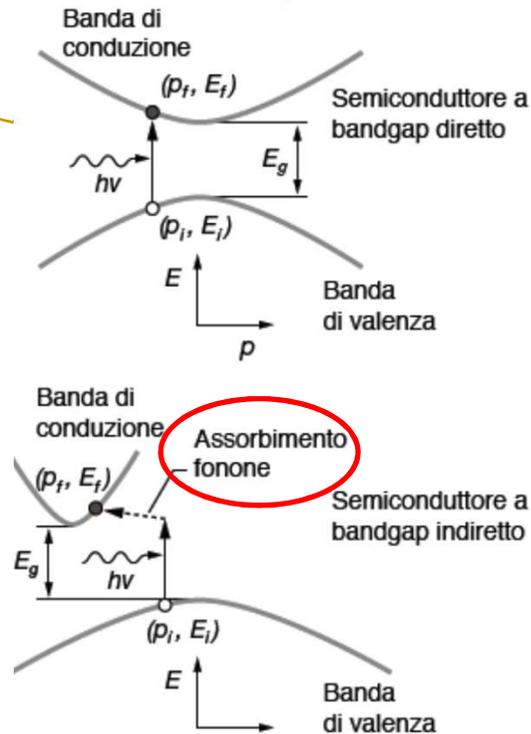


Principio di funzionamento delle celle PV – Band Gap

- Le Bande elettroniche determinano le possibilità di assorbimento dello spettro solare,
- Il Bandgap è la differenza tra M_{BV} e m_{BC} (massimo della banda di valenza e minimo della banda di conduzione).
- La max efficienza teorica di una cella PV corrisponde all'assorbimento di *tutte* le frequenze dello spettro con energia maggiore del Bandgap.



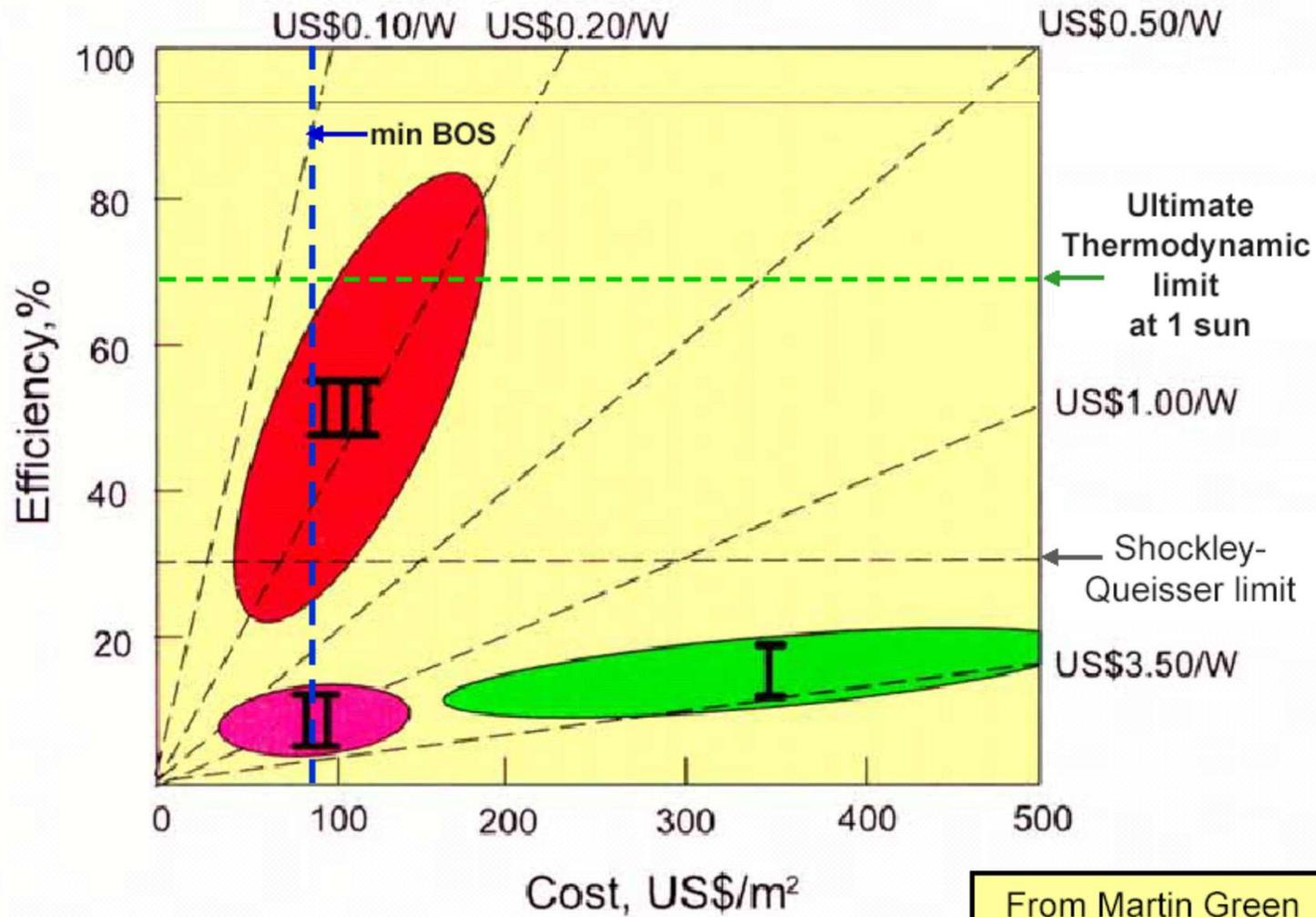
Principio di funzionamento delle celle PV – Band Gap diretto e indiretto



Assorbimento di un fotone ($h\nu$) in un semi-conduttore a band-gap diretto (GaAs) e indiretto (Si - è necessaria l'interazione con un "fonone" per compensare il momento cristallino dell'elettrone).

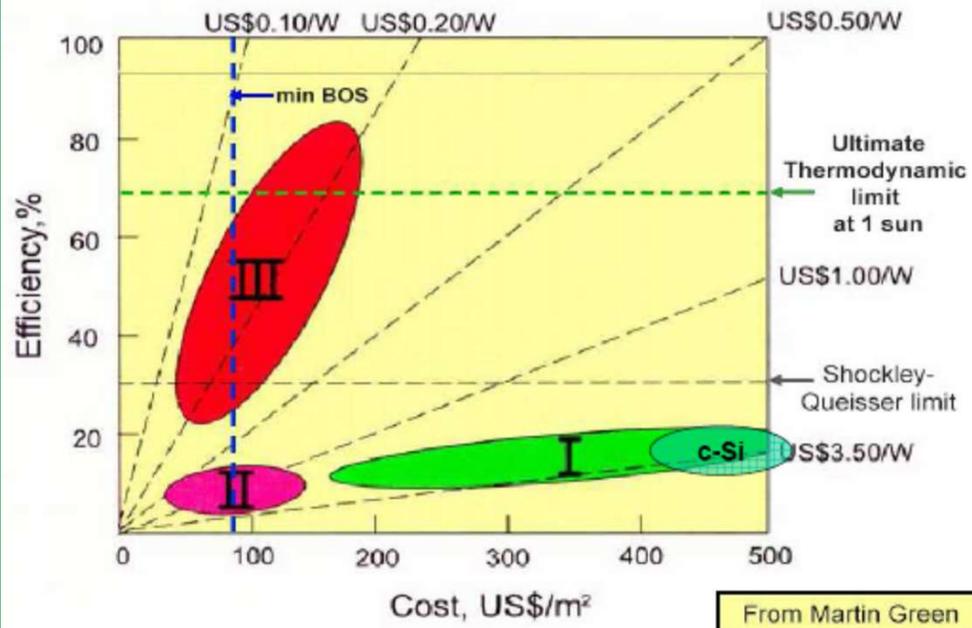
Coefficiente di assorbimento al variare della lunghezza d'onda per un semiconduttore a badgap diretto (GaAs) e indiretto (Si).

Classificazione dei sistemi fotovoltaici secondo Martin GREEN



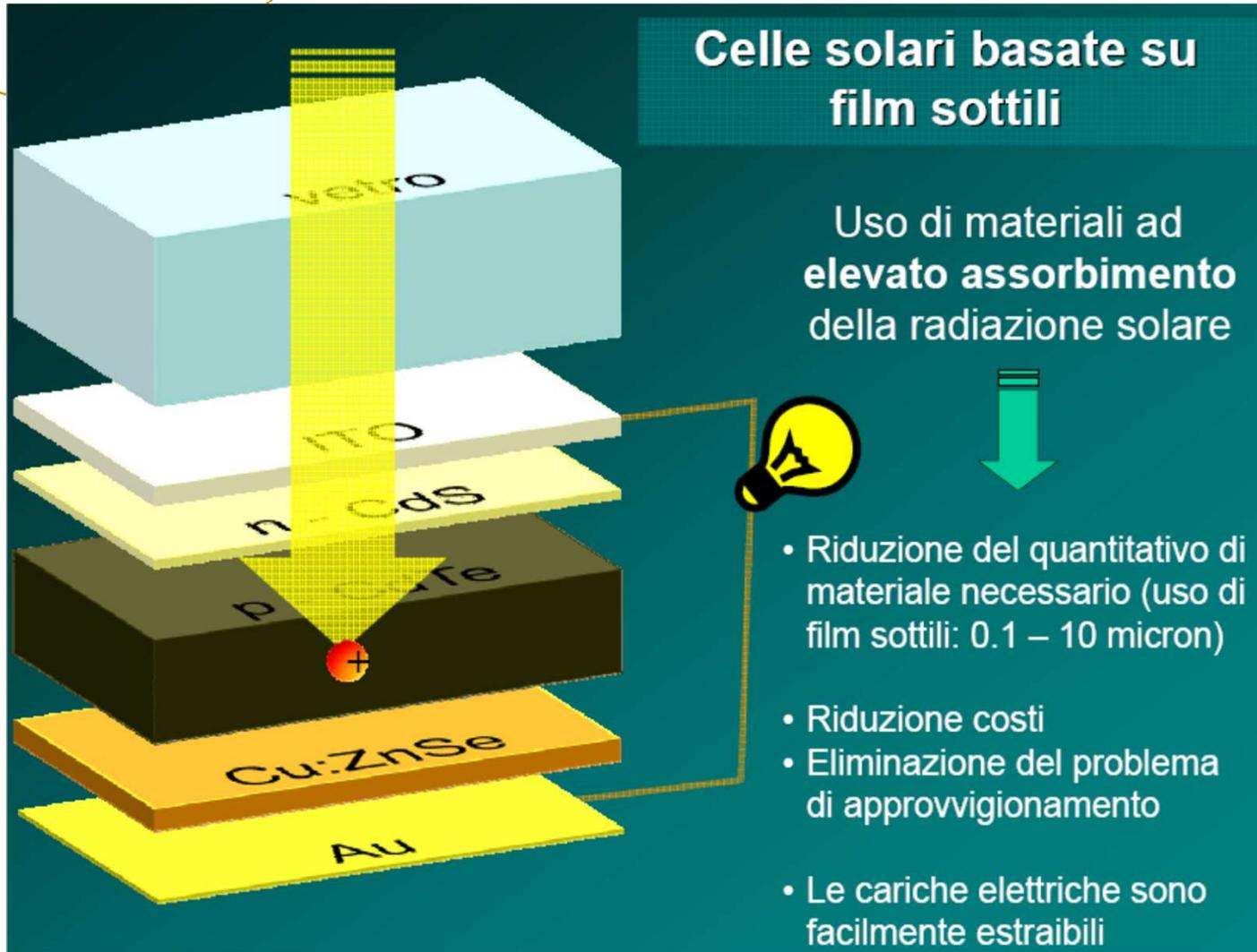
Celle PV in silicio policristallino

- Tecnologia matura (max rendimento > 80% rendimento max teorico),
- Necessità di utilizzare grandi quantitativi di silicio puro,
- Costi monetari ed economici elevati,
- Problemi di approvvigionamento della materia prima.



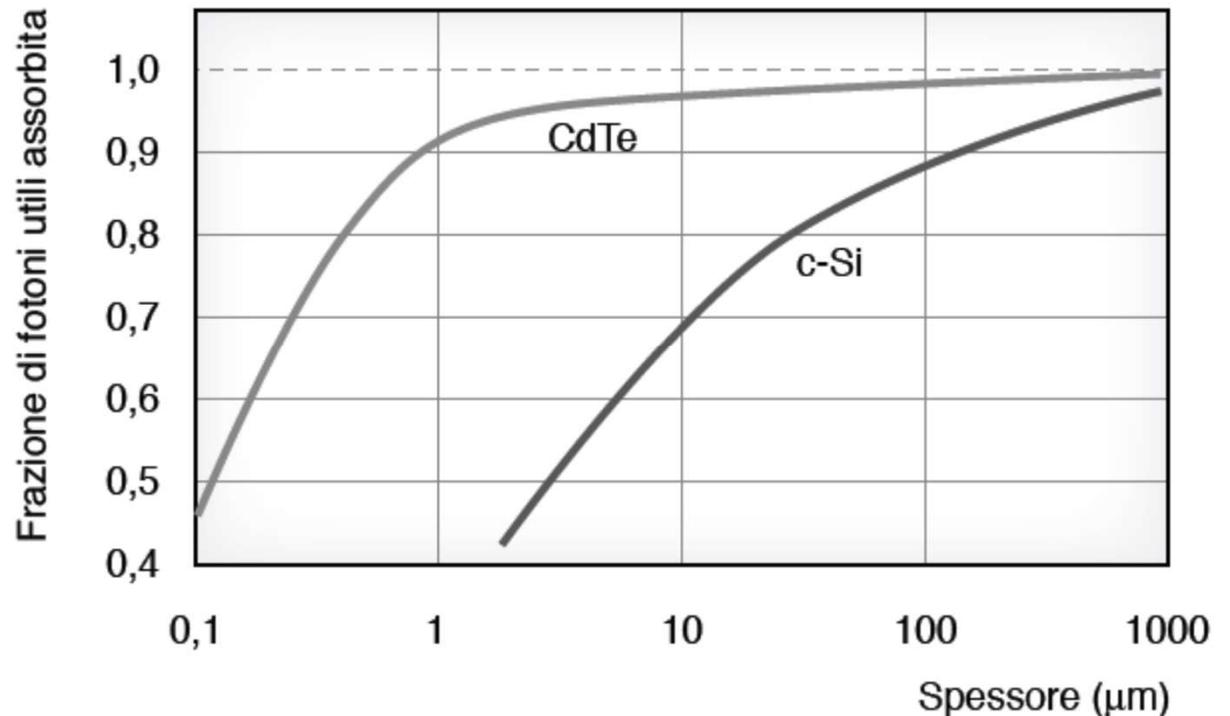
<u>Rendimento</u>	Silicio monocristallino	Silicio policristallino
Max. Cella	24.7%	20.3%
Max. Modulo	22.7%	15.3%
Moduli commerciali	15-18%	12-15

Celle PV a film sottili



Relazione del Band Gap con lo spessore dello strato fotosensibile

Frazione di fotoni utili ($\lambda < \lambda_{\text{gap}}$) assorbiti al variare dello spessore di semiconduttore.



- c-Si (bandgap indiretto e basso coefficiente di assorbimento) serve uno spessore $\sim 400 \mu\text{m}$ per assorbire almeno il 95% dei fotoni utili.
- CdTe (bandgap diretto ed elevato assorbimento), richiede $\sim 2 \mu\text{m}$ di spessore per assorbire una pari frazione di fotoni.

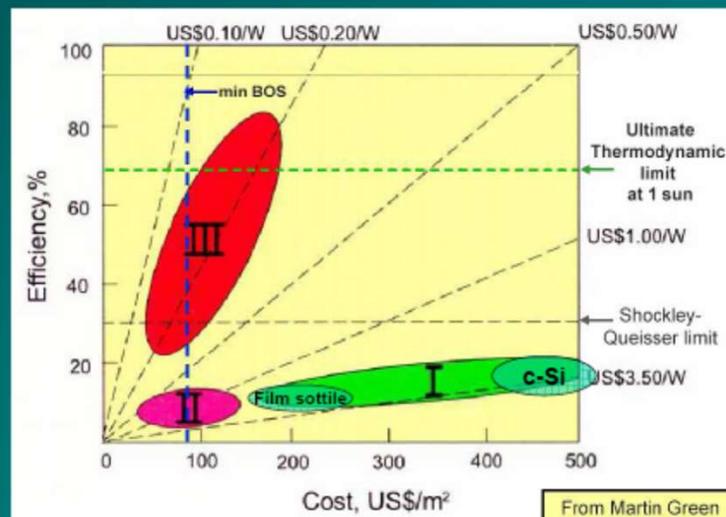
Celle PV a film sottili

- Proprietà elettroniche ideali (bandgap 1.5 eV),
- Tecnologia giovane (max rendimento 30-40% max teorico),
- Possono venir fabbricate su vari tipi di supporto, elementi architettonici, flex,
- Basso costo
- Rendimento massimo del 30%.

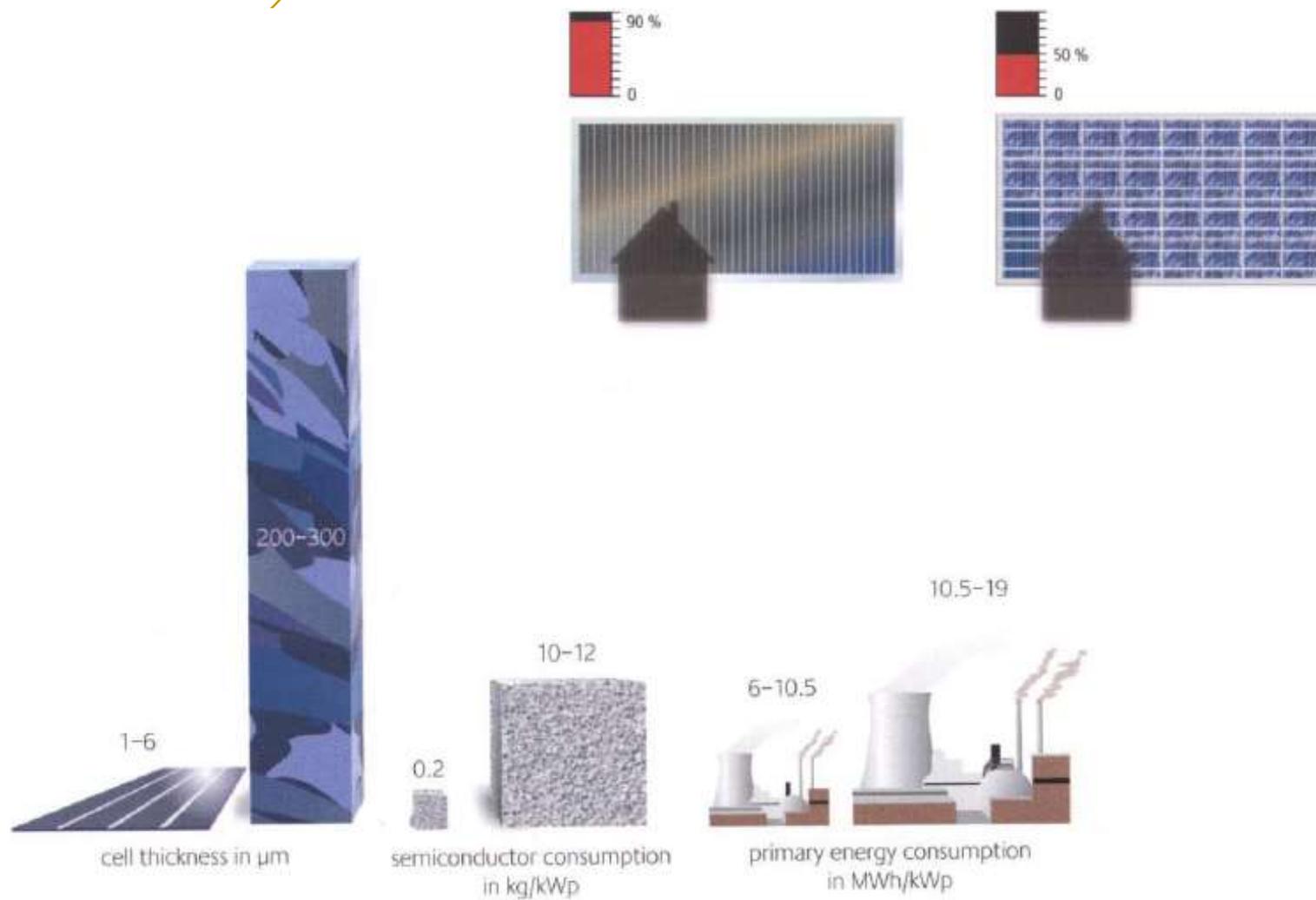
Celle solari basate su film sottili

Medio rendimento – basso costo

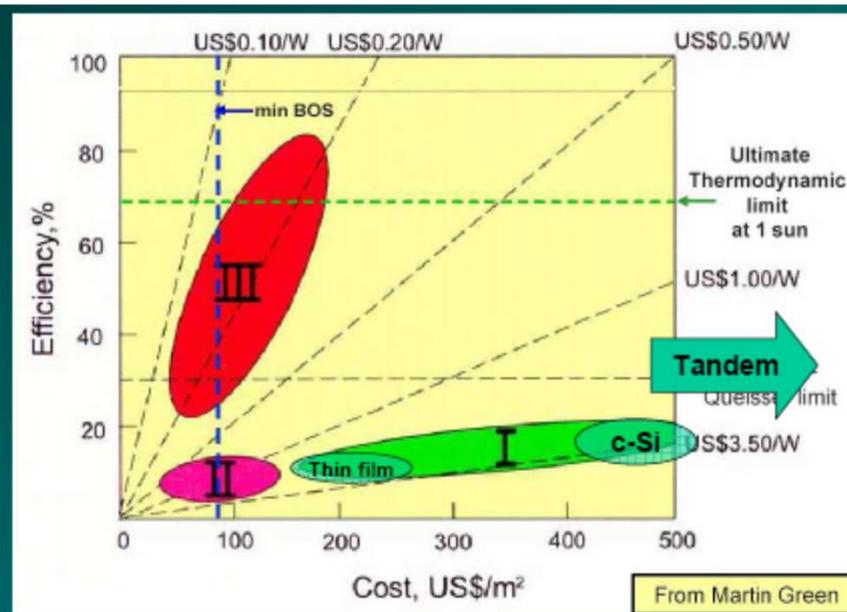
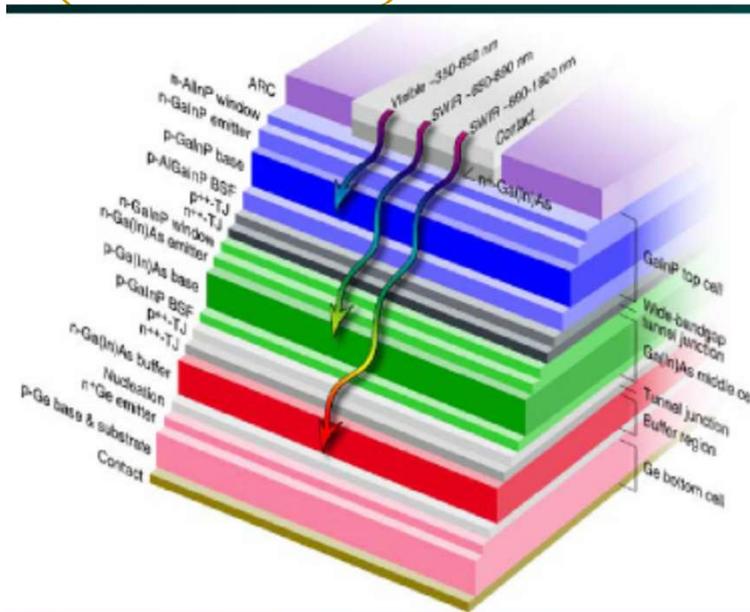
<u>Rendimento</u>	CdTe	CIGSS	Silicio amorfo
Max. Cella	16.5%	19.5%	9.5%
Max. Modulo	10.7%	13.4%	--
Moduli commerciali	8-10%	--	4-7%



Celle PV a film sottili

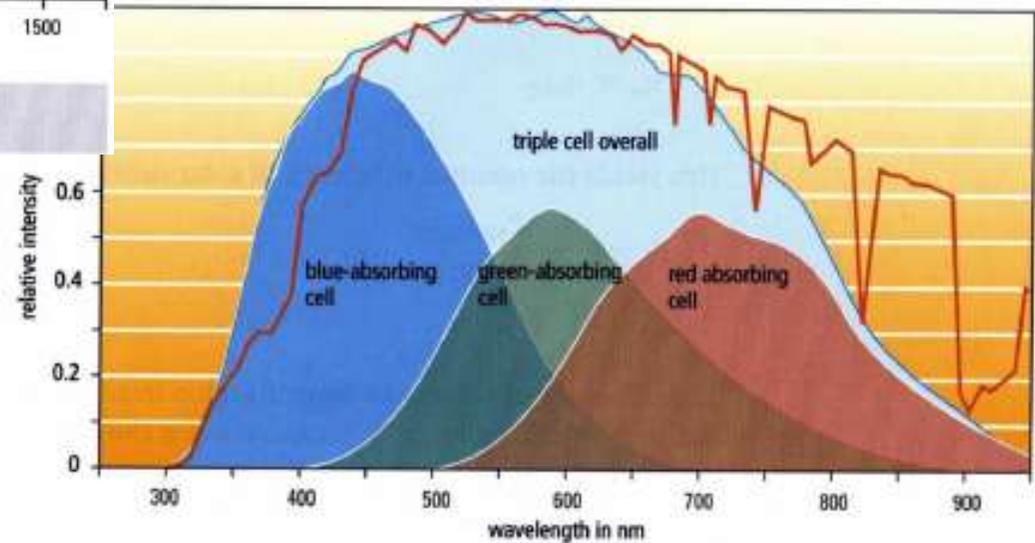
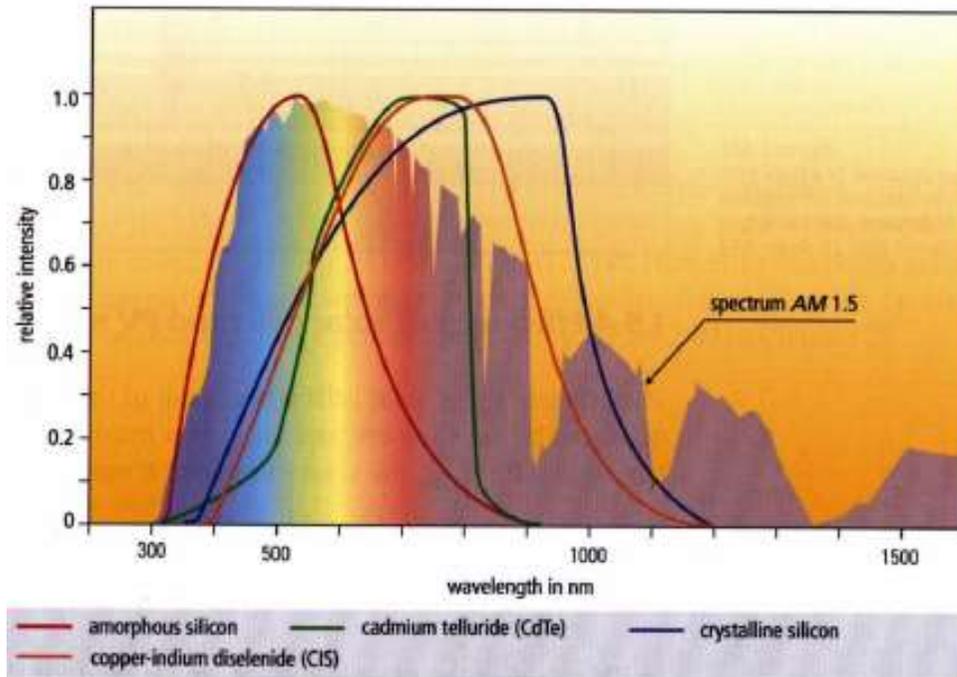


Celle PV TANDEM

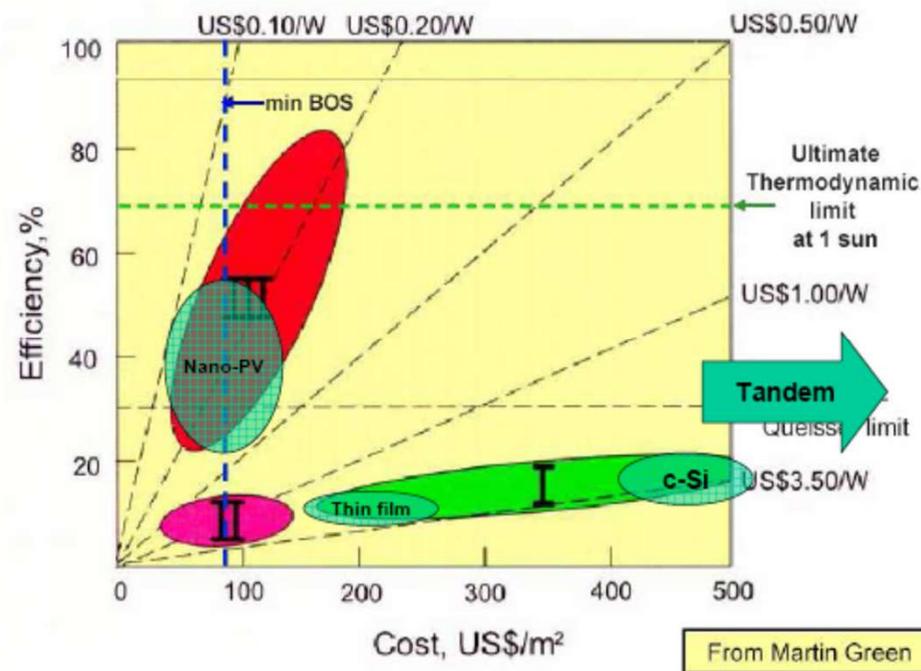
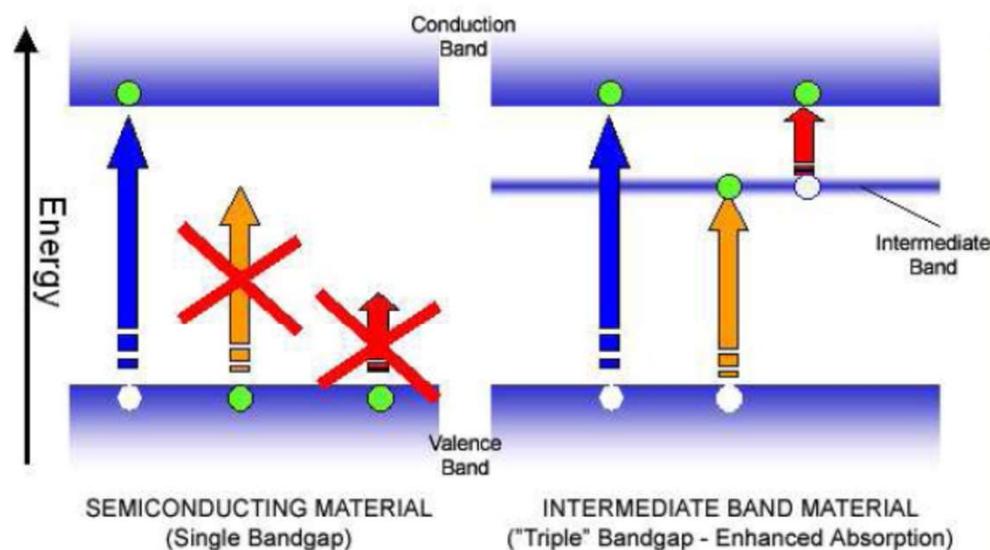


- Record corrente di efficienza > 40%
- Celle a multigiunzione – estremamente costose
- Applicazioni aerospaziali o terrestri in celle a concentrazione

Celle PV TANDEM



Celle PV a band gap intermedio basate su materiali nanotecnologici



- Max. efficienza teorica possibile: 63.2%,
- Costi di fabbricazione bassi,
- Attualmente in fase di sviluppo.

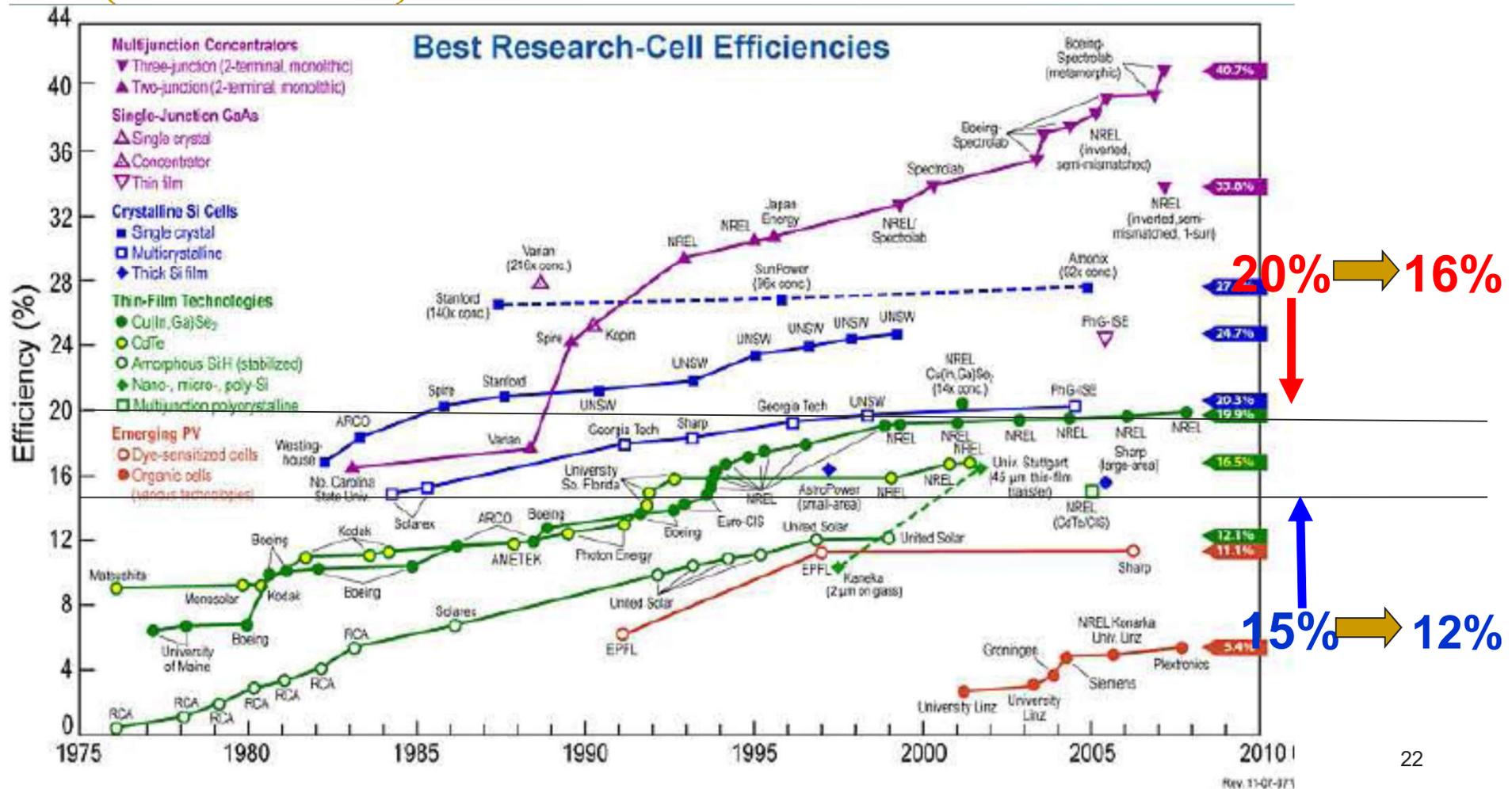
Riepilogo tecnologie PV

Tecnologia	Rendimento	Costo €/Wp	Tempo di ritorno dell'energia [anni]	Ritorno investimento energetico (EROI)
Silicio monocristallo	15-22%	4-5	2-5	5-15
Silicio policristallo	12-15%	4	1.7-3.5	8-17
Film sottili	5-13%	2-3	1-1.5	17-30
Celle tandem	30-42%	alto	?	?
DSSC	5-10%	(2-3)		
Materiali organici	3-6%	(1-2)	<1	>50
Nanomateriali	?	(<1)		

T di ritorno dell'energia = una quantità di energia uguale a quella richiesta per la produzione del sistema hardware [anni]

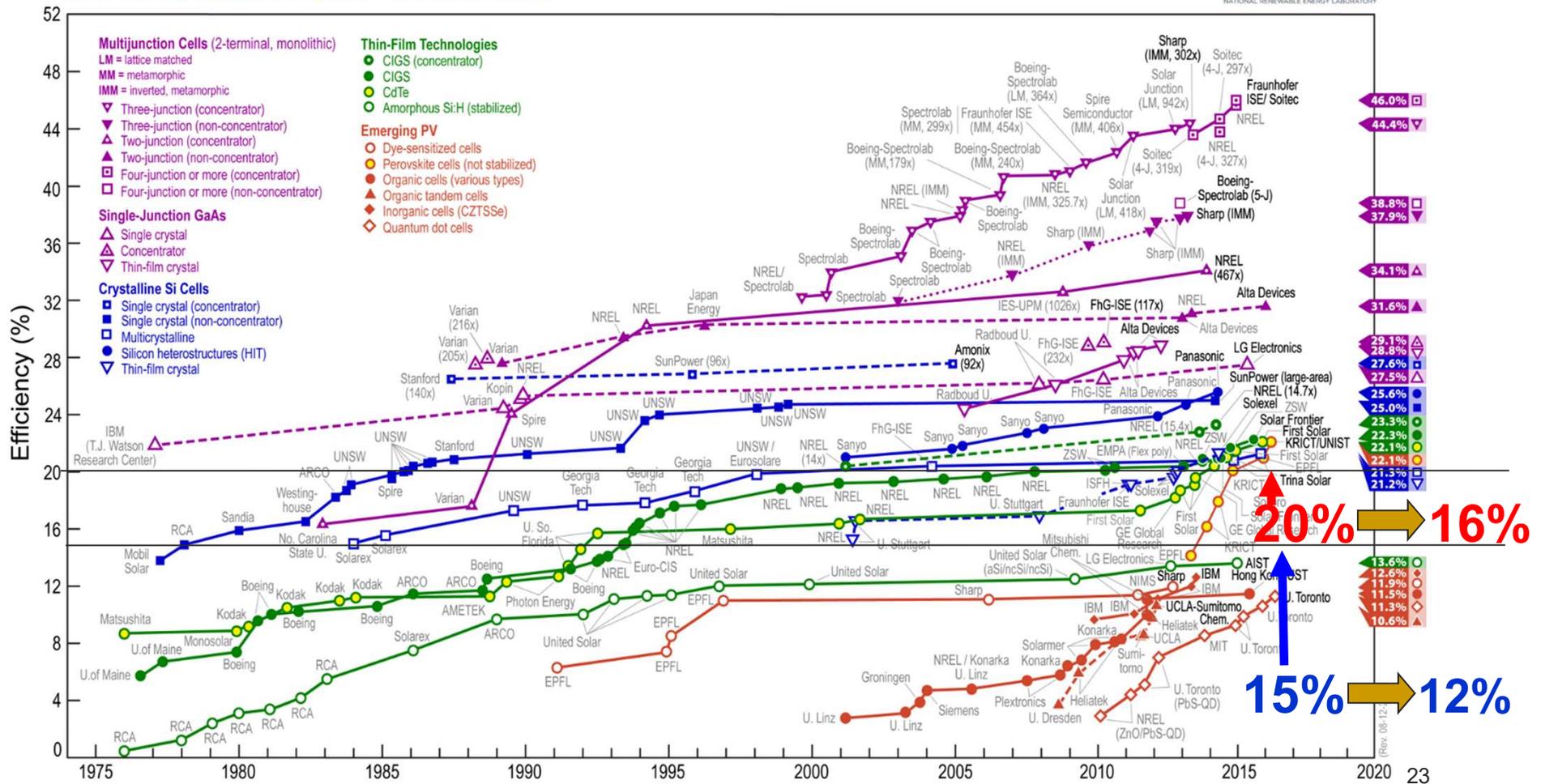
EROI = $\frac{\text{Energia generata nella vita}}{\text{energia richiesta per la produzione del sistema}}$

Massimi rendimenti per sistemi fotovoltaici

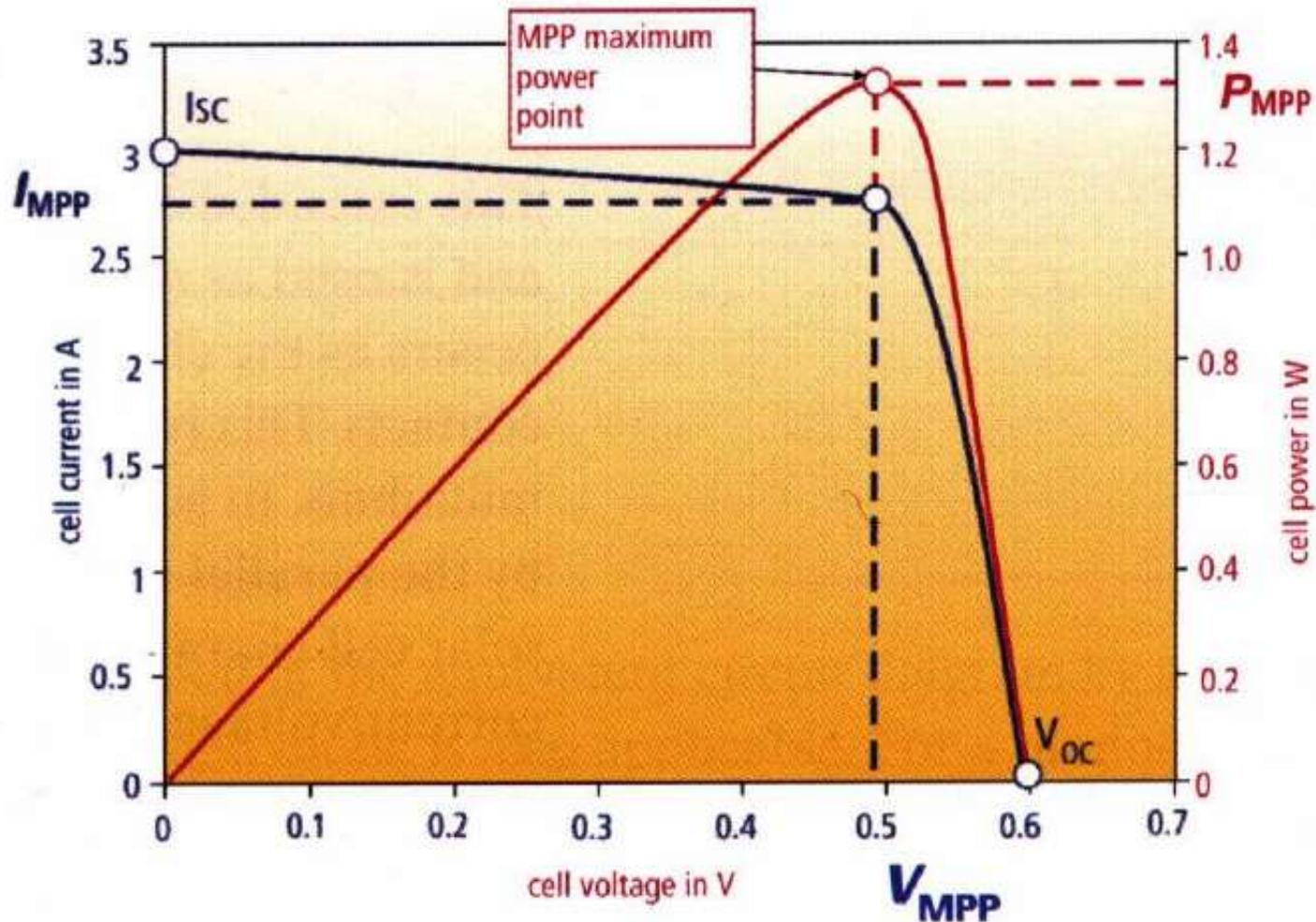


Massimi rendimenti per sistemi fotovoltaici

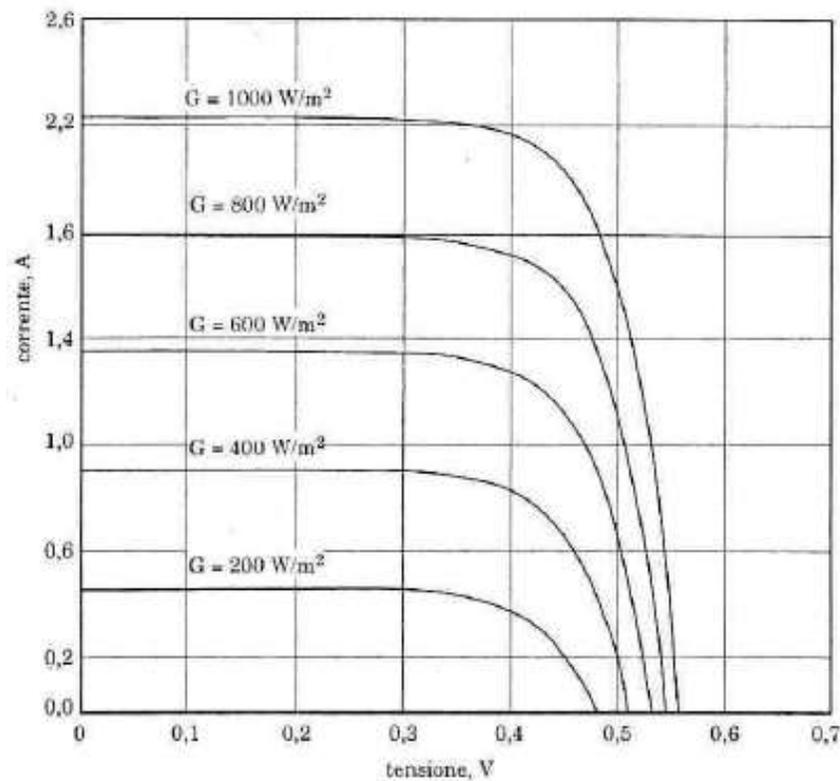
Best Research-Cell Efficiencies



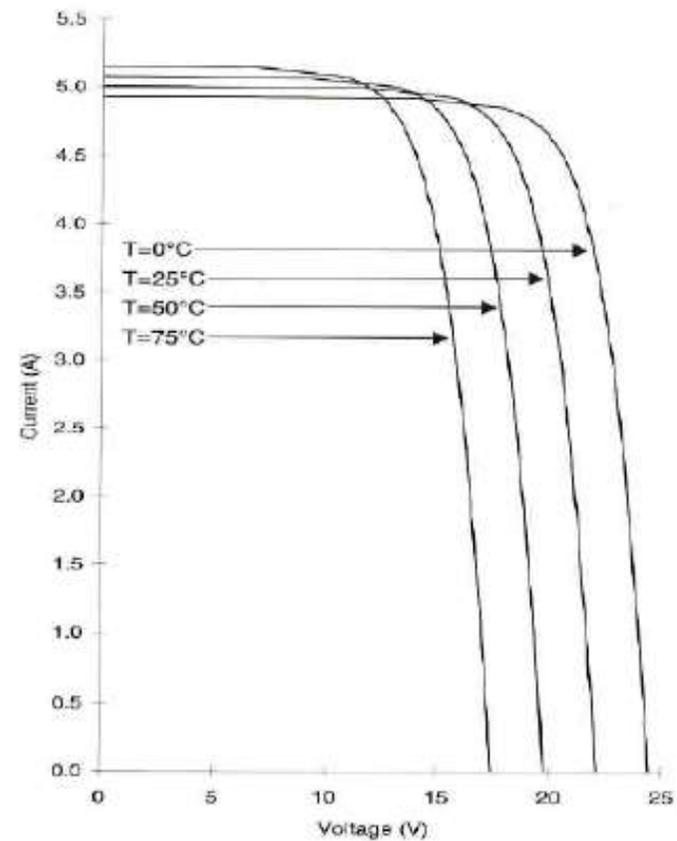
Caratteristica V-I (tensione-corrente)



Caratteristica V-I (tensione-corrente)

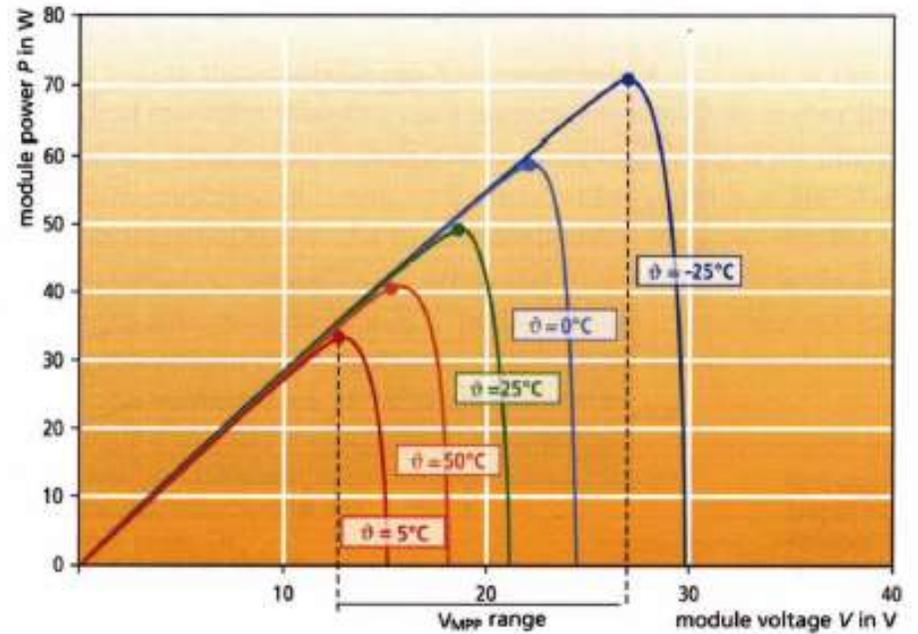
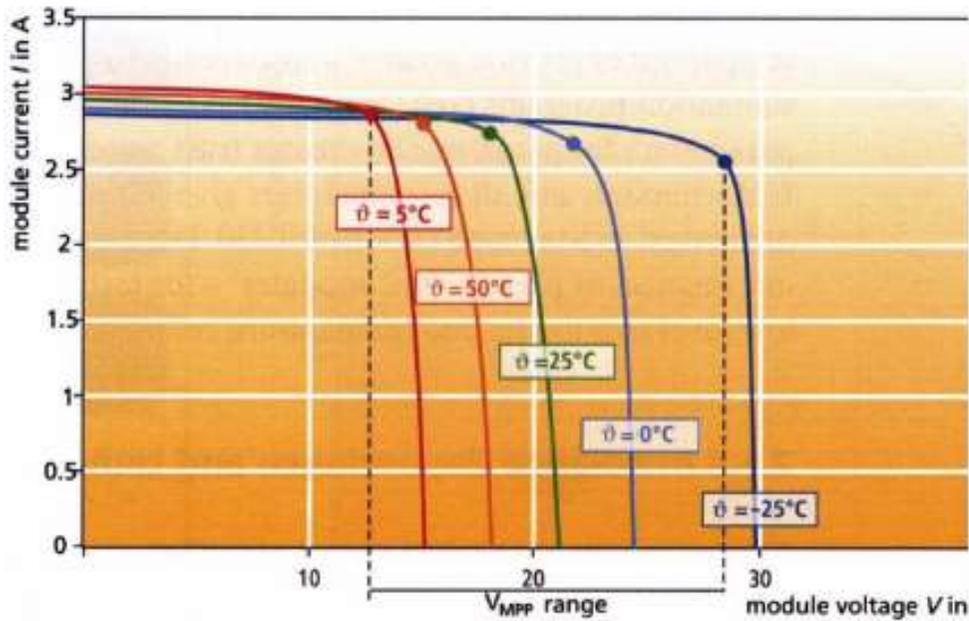


effetto della radiazione

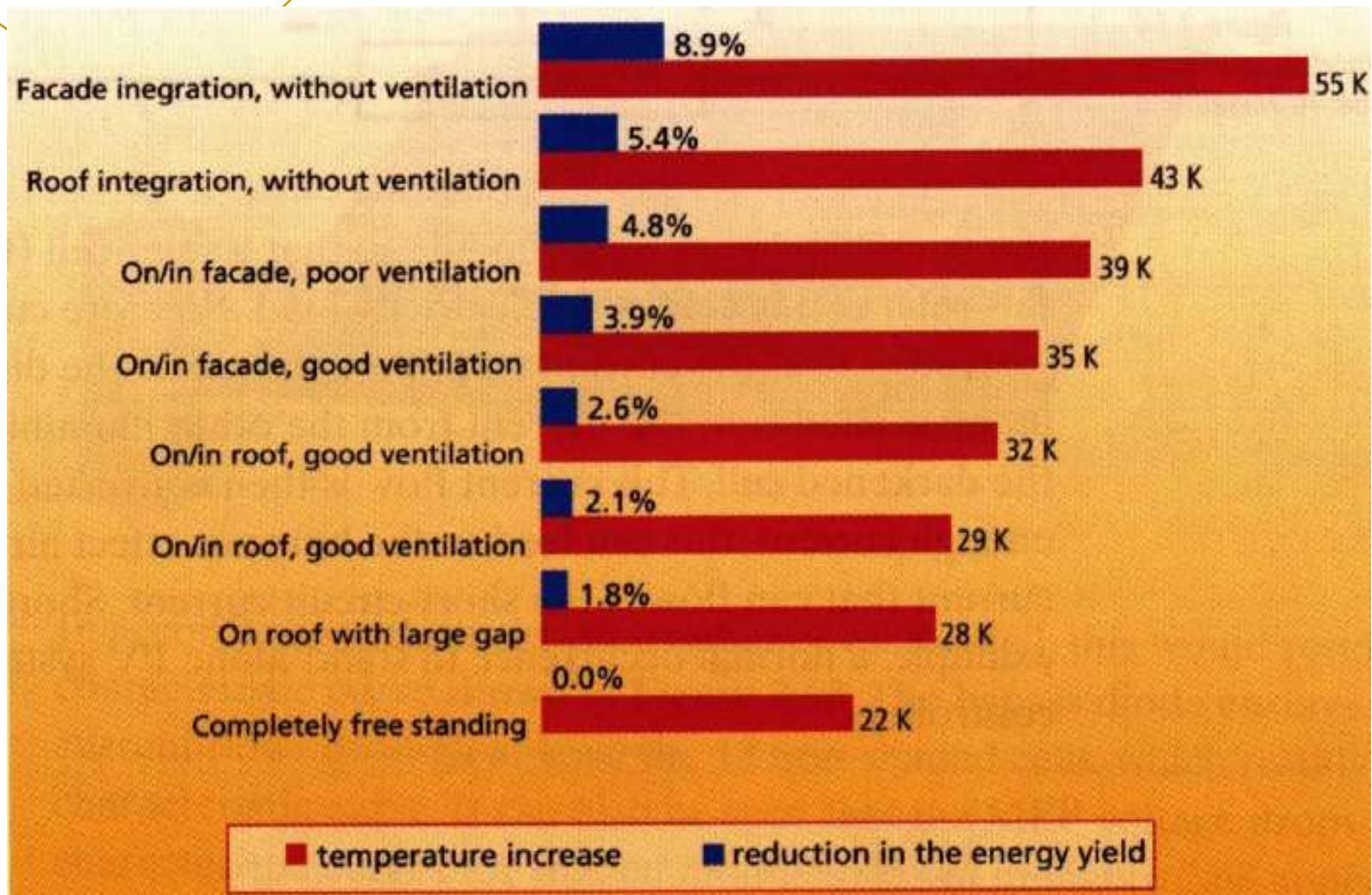


effetto della temperatura

Caratteristica V-I (tensione-corrente)

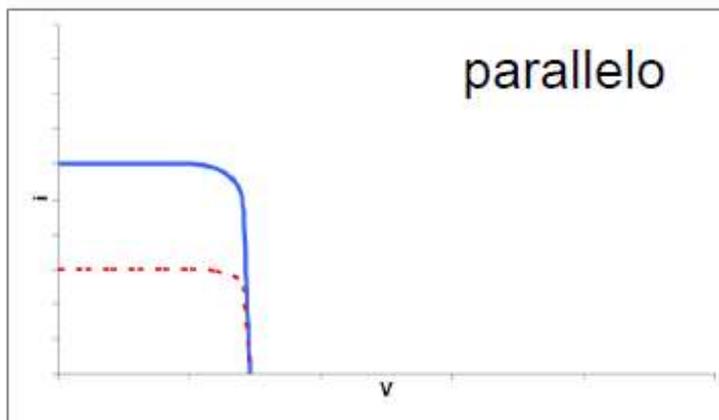
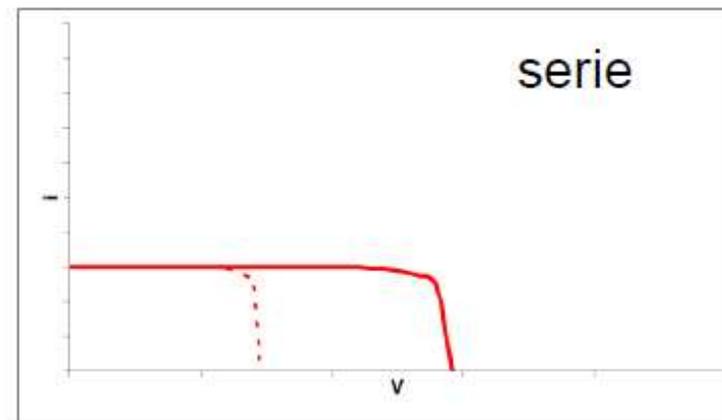
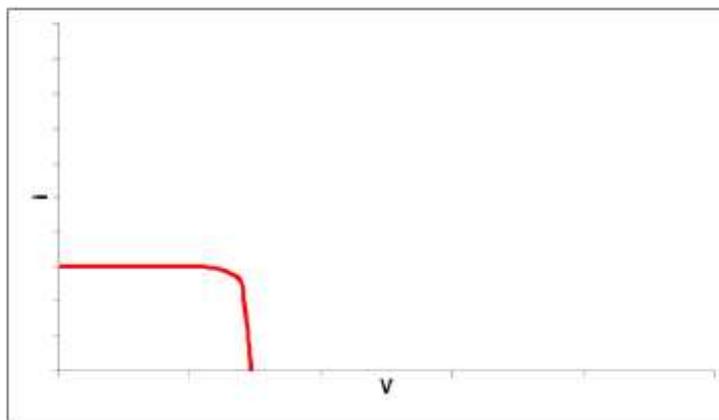


Caratteristica V-I (tensione-corrente)

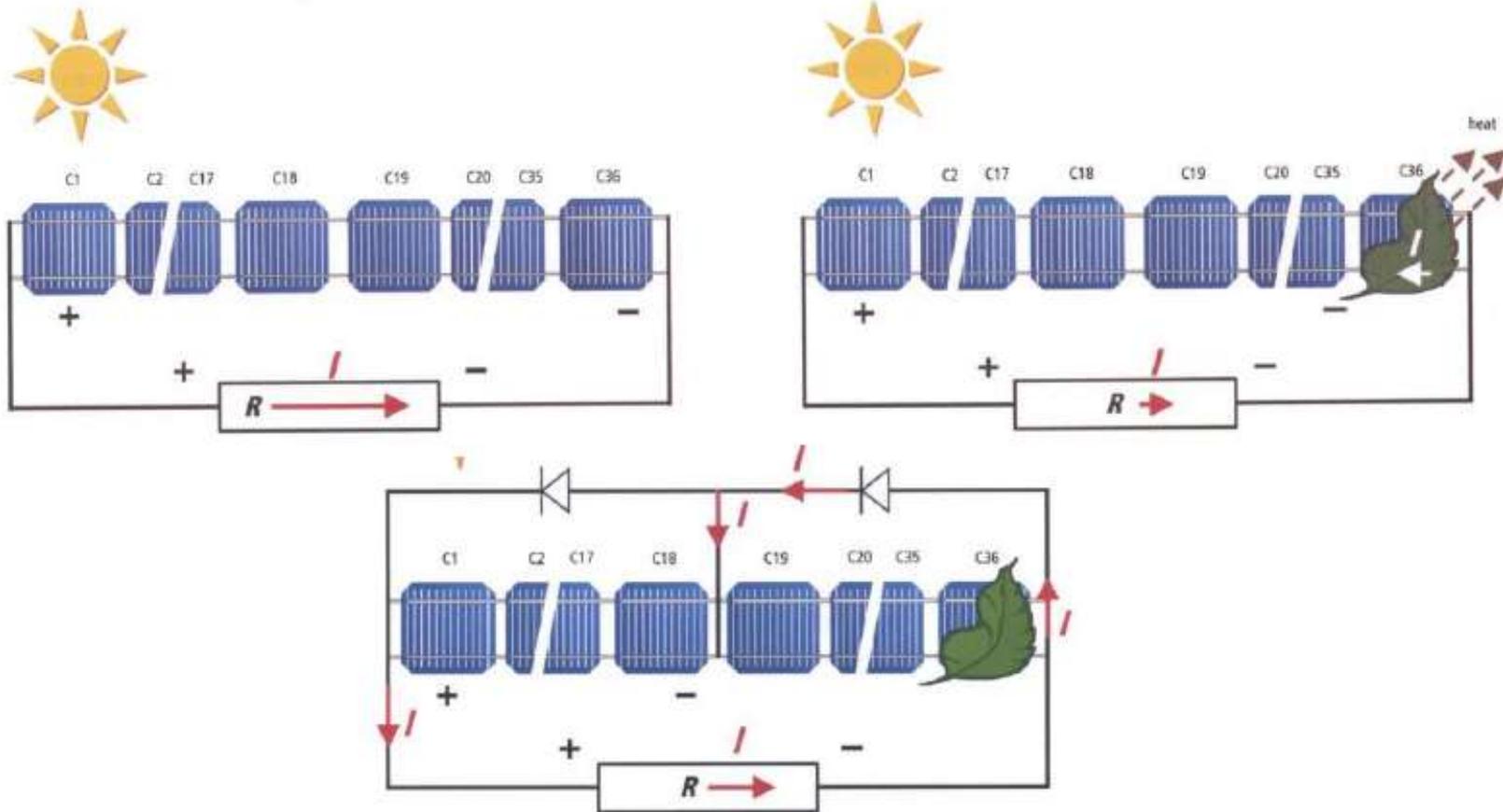


Caratteristica V-I (tensione-corrente)

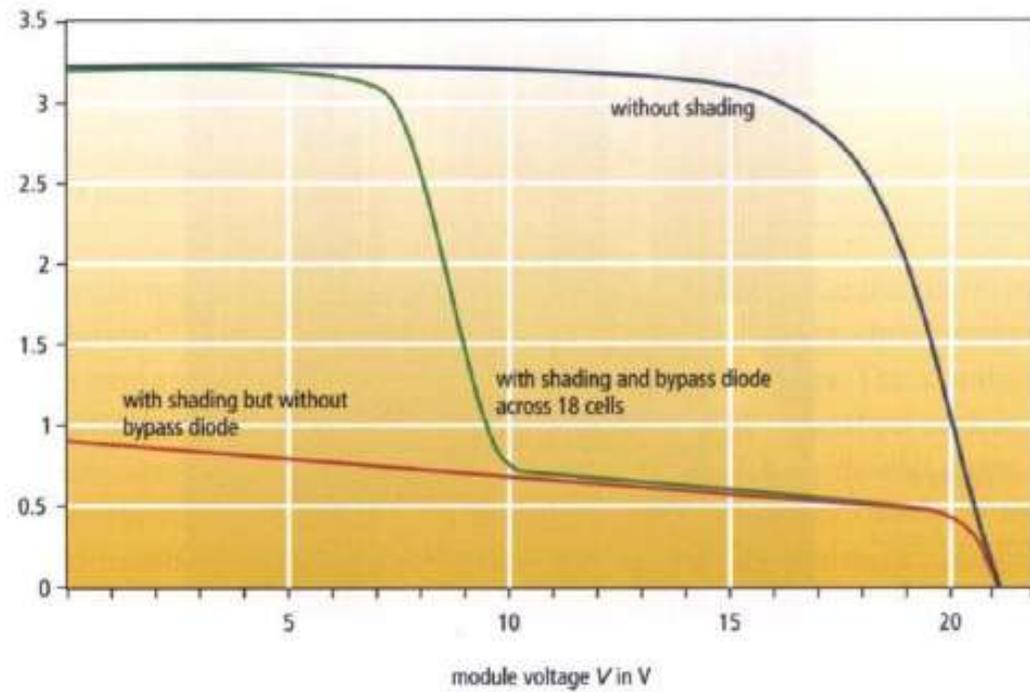
Interconnessioni delle celle fotovoltaiche



Ombreggiamento



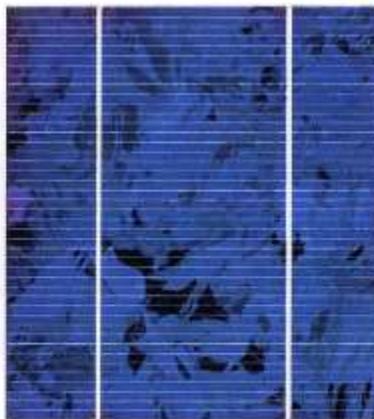
Ombreggiamento



Esempi di sistemi fotovoltaici innovativi



Si monocristallino



Si policristallino

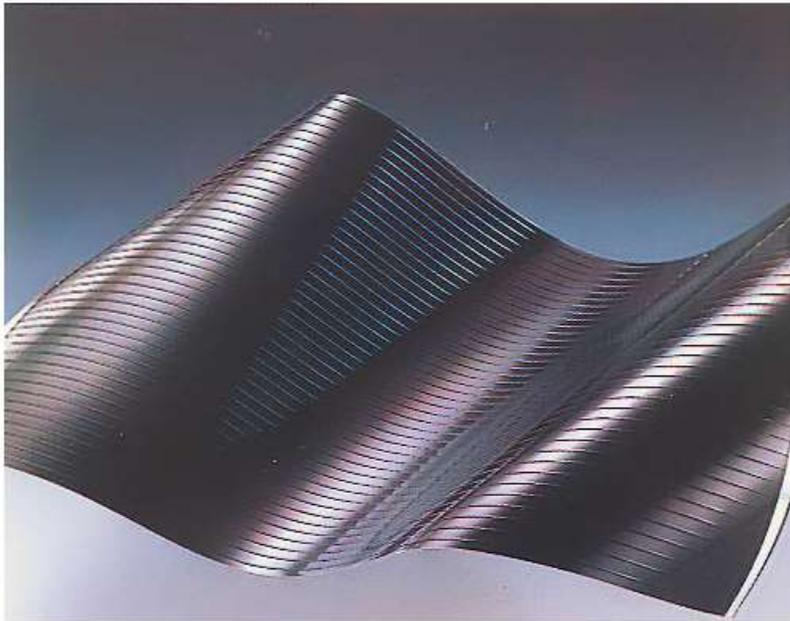


Si amorfo

CIS

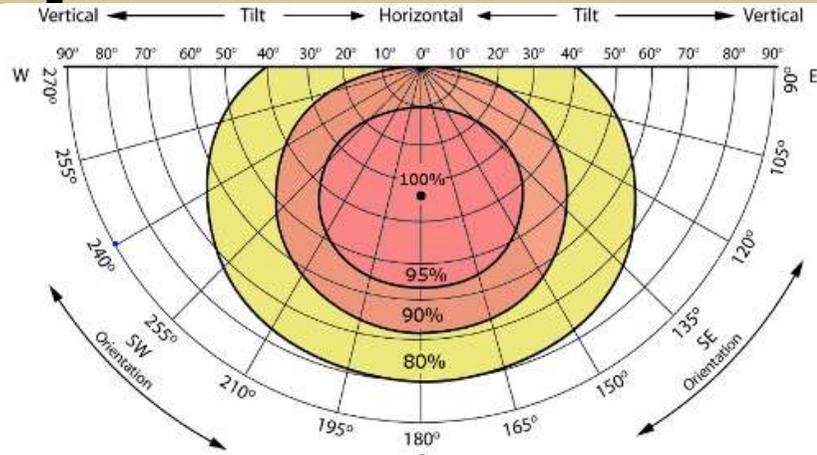


Esempi di sistemi fotovoltaici innovativi



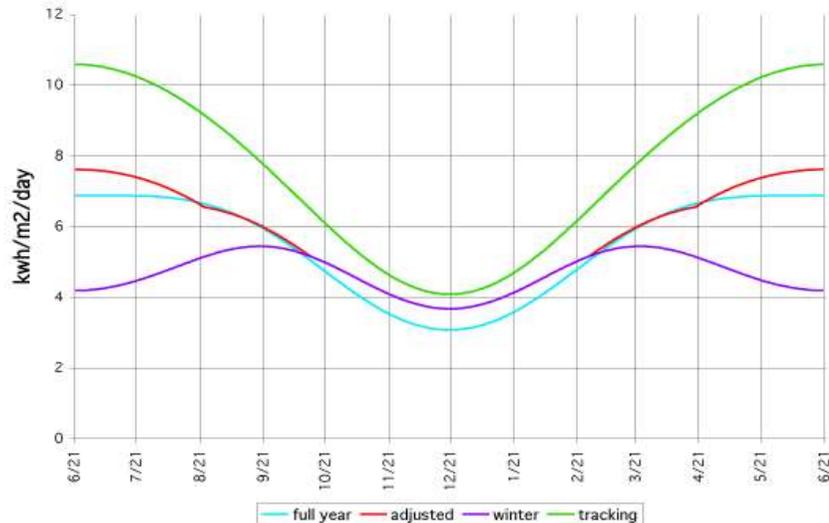
- Modulo flessibile in silicio amorfo
- Tegole fotovoltaiche

Solare Fotovoltaico: effetto dell'orientazione della superficie



Example: On a roof facing 240° SW with a tilt angle (pitch) of 40°, output from a PV roof will be 10% lower than on a perfectly south-facing roof with an optimum roof pitch of around 30°

based on Max Fordham & Partners (1999) 'Photovoltaics in Buildings: A Design Guide' DTI URN: 99/1274.



Posizione apparente del sole nel cielo

Seasonal Noon Sun Angles for a given North Latitude

Earth's Tilt relative to its plane of Orbit is 23°28'

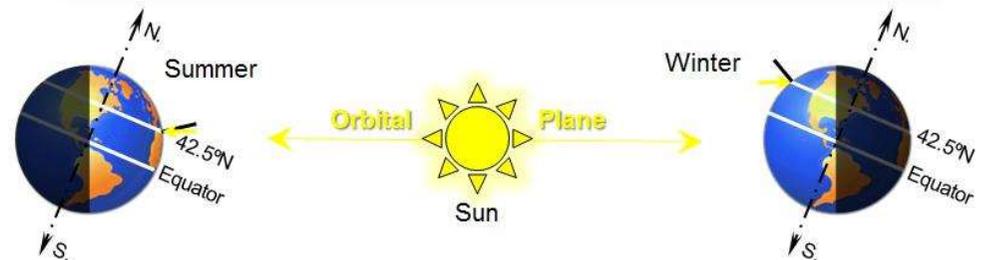
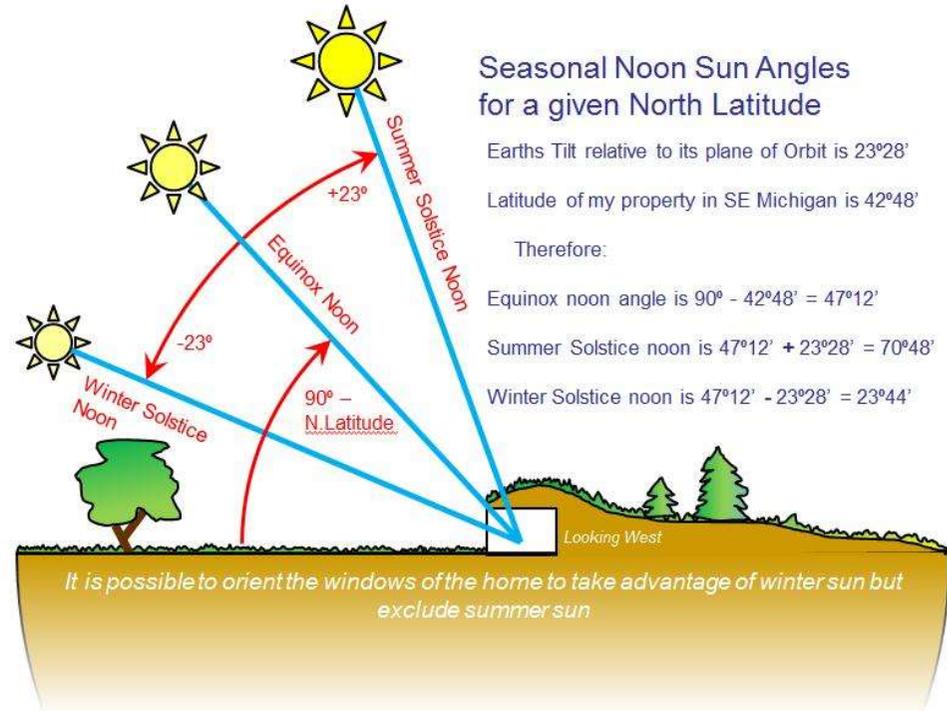
Latitude of my property in SE Michigan is 42°48'

Therefore:

Equinox noon angle is $90^\circ - 42^\circ 48' = 47^\circ 12'$

Summer Solstice noon is $47^\circ 12' + 23^\circ 28' = 70^\circ 48'$

Winter Solstice noon is $47^\circ 12' - 23^\circ 28' = 23^\circ 44'$



Solare Fotovoltaico: 3 generazioni di celle solari

✓ Prima generazione

Le celle solari attualmente sul mercato, realizzate in silicio cristallino, sono una tecnologia "matura". Hanno costi di produzione elevati necessari per creare celle di silicio con purezza sufficiente.

✓ Seconda generazione

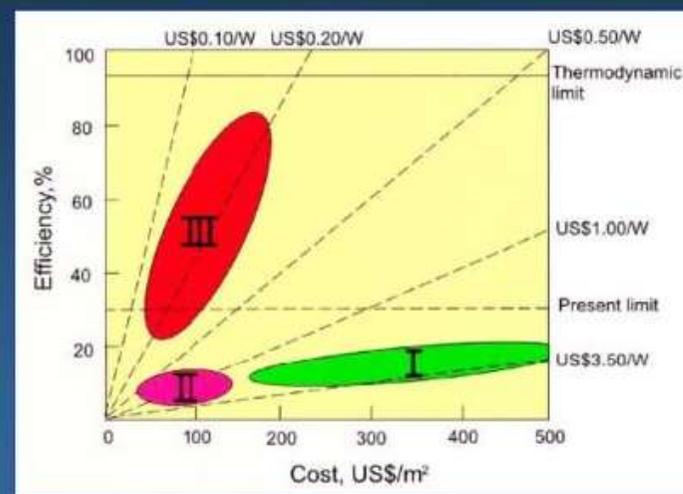
sono meno mature come tecnologia fotovoltaica, vengono generalmente create mediante deposizione sotto vuoto o deposizione chimica da vapore (CVD). Includono tecnologie CdTe o rame-indio-gallio-selenide (CIGS). I loro costi sono più bassi, così come le loro efficienze, ma sono più sottili e leggere delle celle al silicio. Lo smaltimento a fine vita è una questione aperta, a causa della tossicità di Cd, Te, Ga e Se, e ci sono preoccupazioni riguardanti la loro abbondanza sulla terra.

✓ Terza generazione

Sono in corso di sperimentazione e sviluppo.

**L'alta efficienza non è così importante.
L'obiettivo è quello di muoversi su linee con
basso costo unitario di produzione dell'energia!**

Cost/Efficiency of Photovoltaic Technology

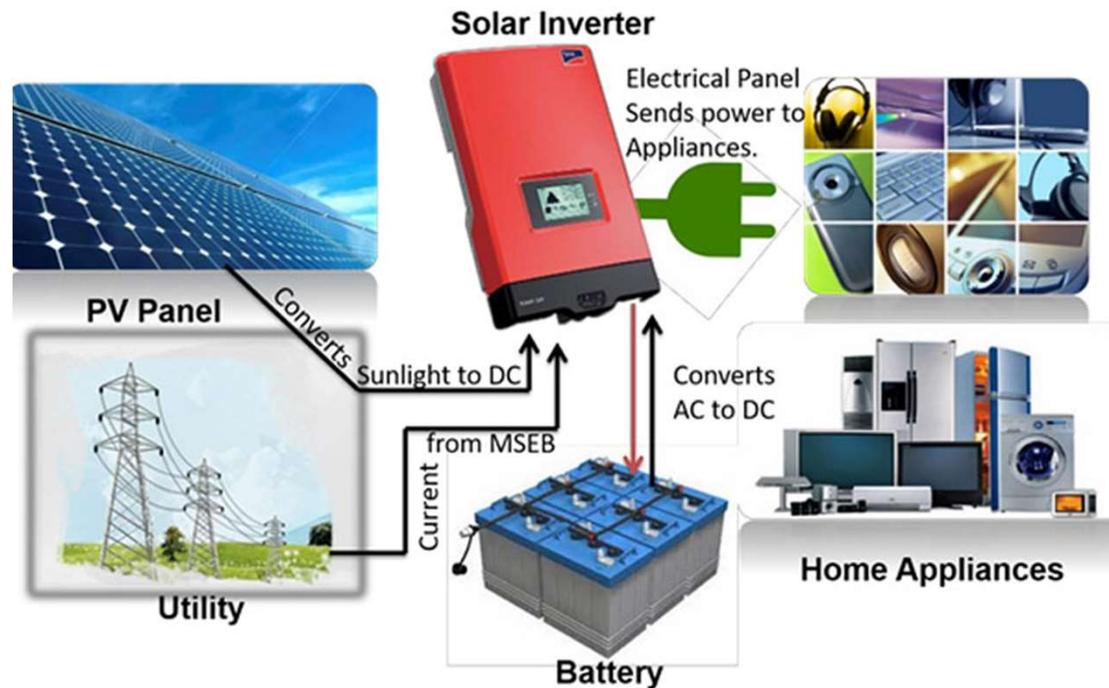


Costs are modules per peak W; installed is \$5-10/W; \$0.35-\$1.5/kW-hr

Solare Fotovoltaico: perdite di sistema

- Resistenza elettrica (Homica) di tutte le connessioni elettriche
- Perdite nell'inverter e nelle batterie
- Balance of System – BOS: perdite in tutti gli altri componenti ausiliari (contatori, connessioni, trasformatori, ...)

Riducono l'efficienza del sistema rispetto all'efficienza delle celle di circa il 10% o meno (film sottile) e di circa il 15% (silicio poli-cristallino)



Esempi di sistemi fotovoltaici innovativi

Moduli TELORURO DI CADMIO

MODEL NUMBERS AND RATINGS AT STC ^{1*}		FS-270	FS-272	FS-275	FS-277
Nominal Values					
Nominal Power(+/-5%)	$P_{MPP}(W)$	70	72.5	75	77.5
Voltage at P_{MAX}	$V_{MPP}(V)$	65.5	66.6	68.2	69.9
Current at P_{MAX}	$I_{MPP}(A)$	1.07	1.09	1.10	1.11
Open Circuit Voltage	$V_{OC}(V)$	88.0	88.7	89.6	90.5
Short Circuit Current	$I_{SC}(A)$	1.23	1.23	1.23	1.22
Maximum System Voltage	$V_{SYS}(V)$	1000			
Temperature Coefficient of P_{MPP}	$T_K(P_{MPP})$	-0.25%/°C			
Temperature Coefficient of V_{OC} , high temp (>25°C)	$T_K(V_{OC}, \text{high temp})$	-0.25%/°C			
Temperature Coefficient of V_{OC} , low temp (-40°C to +25°C)	$T_K(V_{OC}, \text{low temp})$	-0.20%/°C			
Temperature Coefficient of I_{SC}	$T_K(I_{SC})$	+0.04%/°C			
Limiting Reverse Current ²	$I_R(A)$	2			
Maximum Source Circuit Fuse	$I_{CF}(A)$	10 (2 IEC61730 ³)			



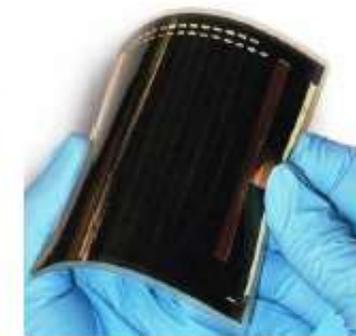
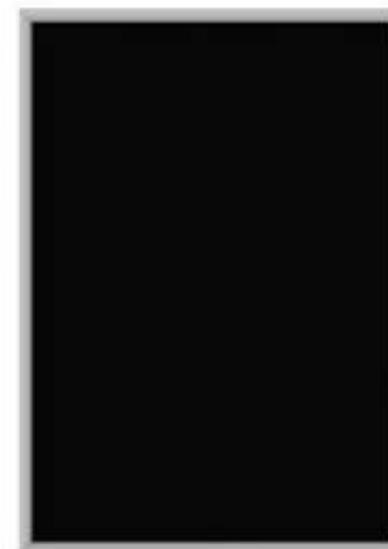
Esempi di sistemi fotovoltaici innovativi

Moduli CIS-CIGS

SOLYNDRA™



CIS = Copper Indium-Selenide
CIGS = Copper-Indium
Gallium-Diselenide



Esempi di sistemi fotovoltaici innovativi

Moduli CIS-CIGS

SOLYNDRA™

I tubi catturano la radiazione diretta, diffusa e riflessa a 360°. Ottimizzano l'assorbimento di energia solare per un periodo più lungo rispetto ai tradizionali pannelli fotovoltaici piani toccando un'efficienza del 12-14% e producendo da un pannello composto da 40 cilindri 1×2m 180W.

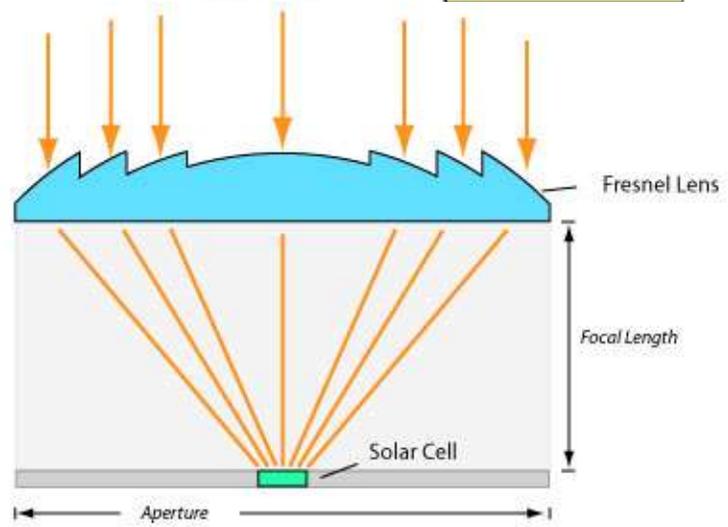
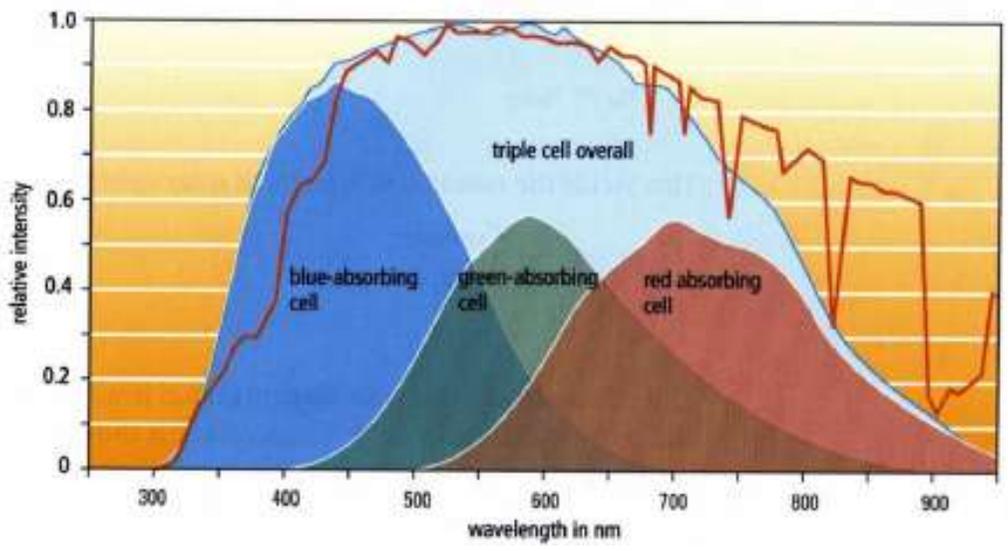
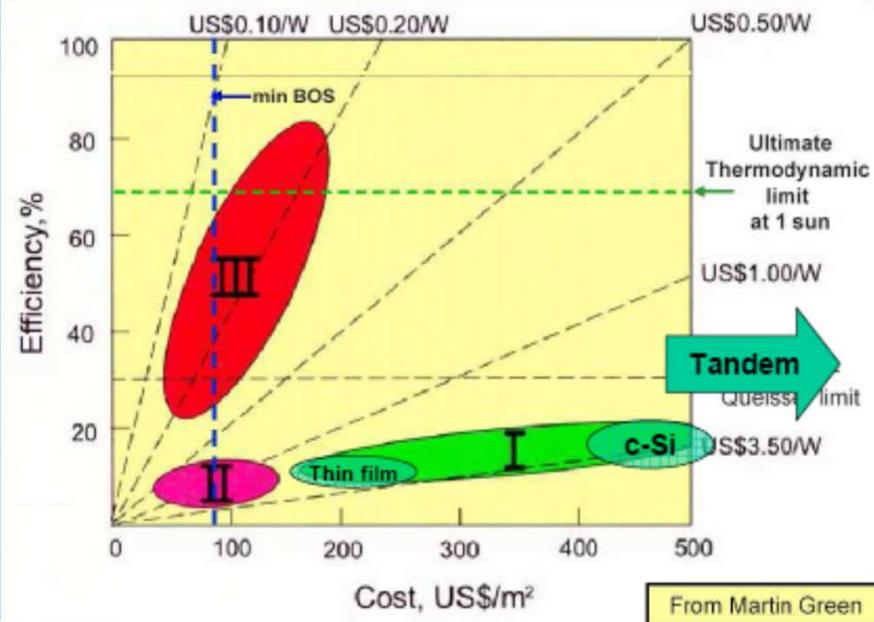
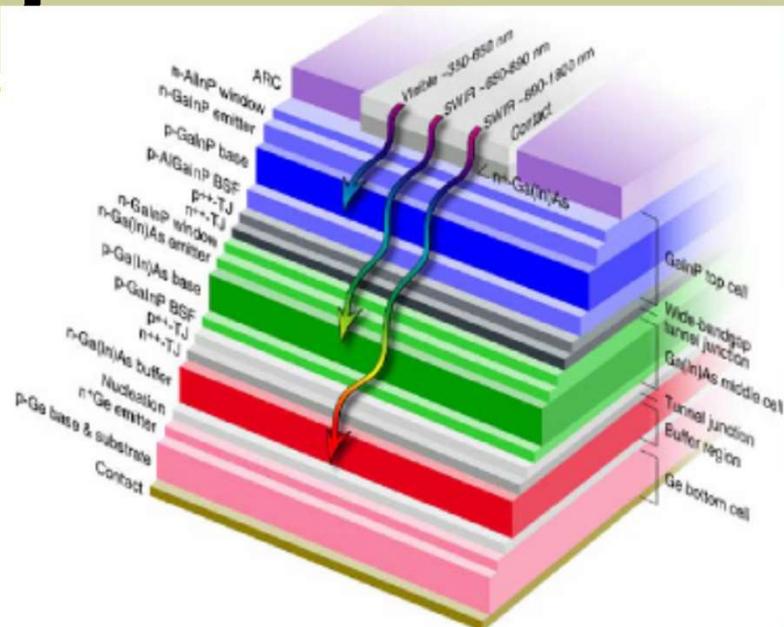


Esempi di sistemi fotovoltaici innovativi

Celle sferiche

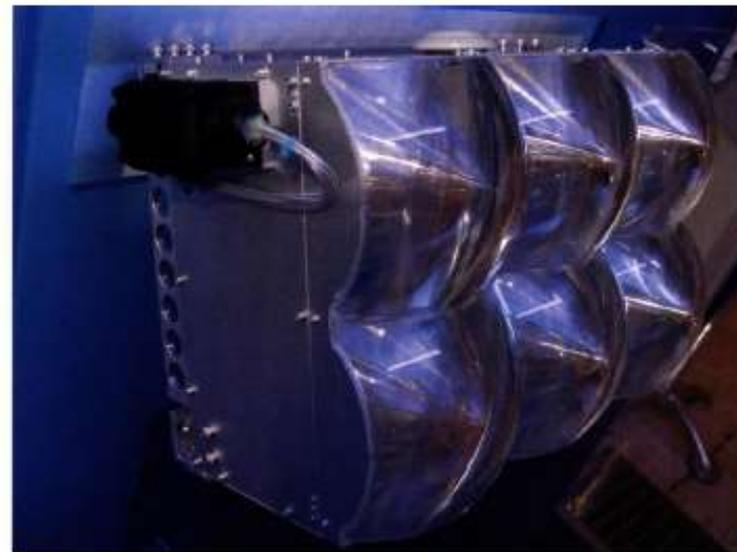


Solare Fotovoltaico: celle TANDEM

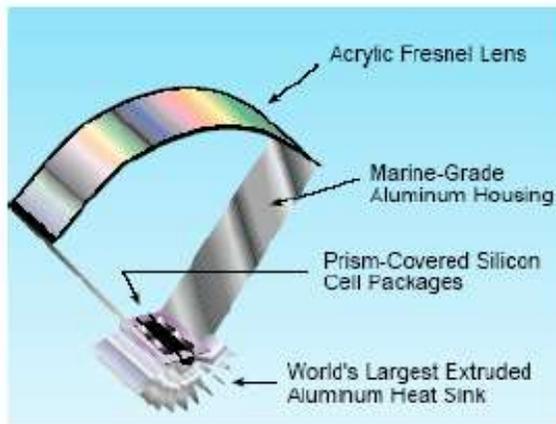


Esempi di sistemi fotovoltaici innovativi

PV a concentrazione



Esempi di sistemi fotovoltaici innovativi



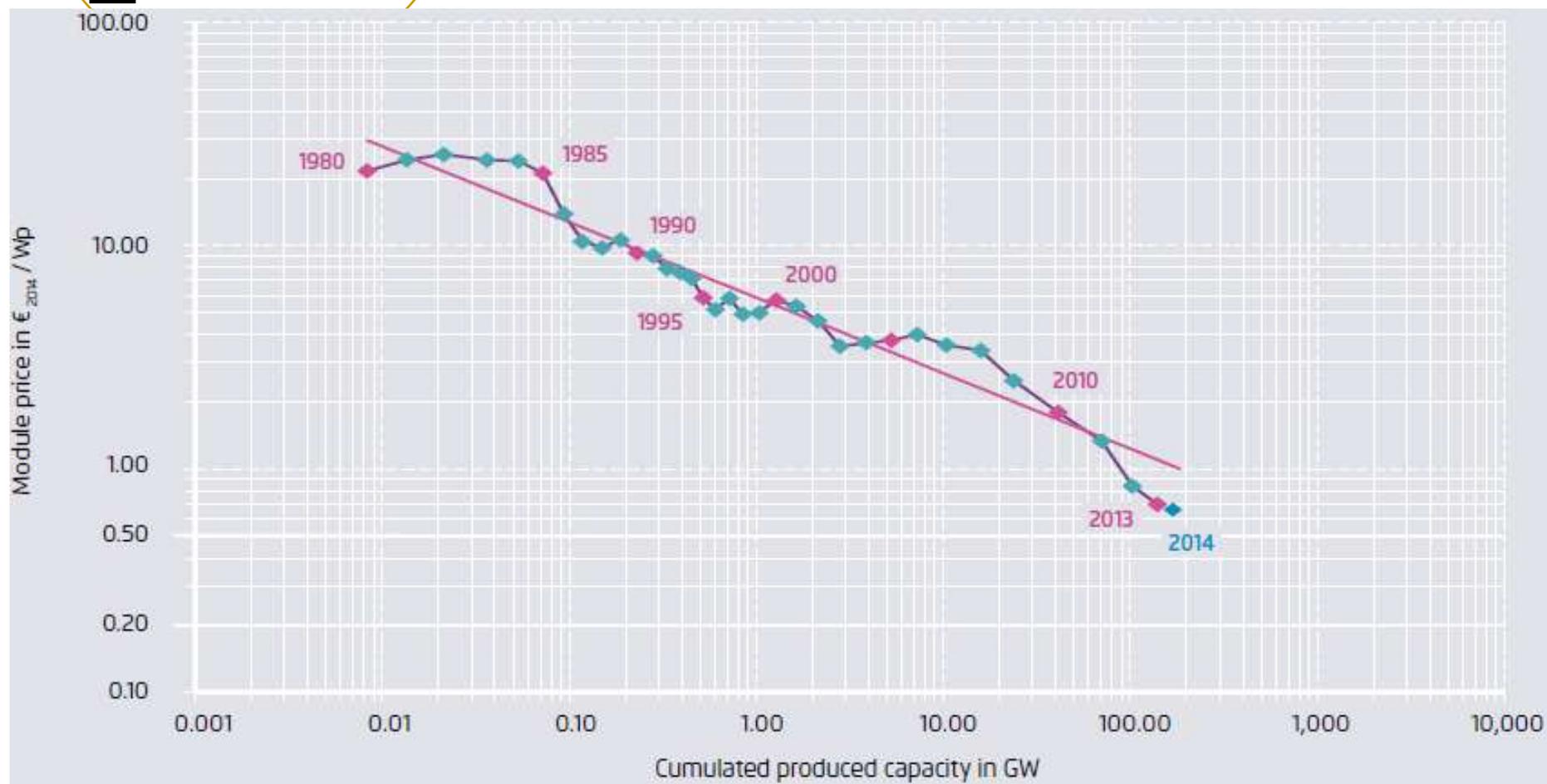
Caratteristiche delle diverse tecnologie di produzione dei pannelli PV

	Si mono	Si multi	Si amorfo	GaAs	CIS
Dimensioni lato cella	8-10 cm	12-15 cm	Variabili (standard comm. 30 cm)	Variabili	Variabili
Spessore cella	250-350 μm	250-350 μm	pochi μm	5-10 μm	5-10 μm
Rendimento cella	14-17%	10-14%	4-6% singolo 7-10% tandem	25%	8-10%
Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> - Alto rendimento - Stabilità - Tecnologia affidabile 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo minore - Fabbricaz. più semplice - Migliore occupazione dello spazio 	<ul style="list-style-type: none"> - Buon rendimento in caso di irragg. diffuso - Adatto a supporti flessibili 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta resistenza alle alte temperature - Adatto ad applicazioni aeronautiche 	<ul style="list-style-type: none"> - Molto stabile - Utilizzabile su substrati flessibili
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> - Costo - Energia grigia - Elevata quantità di materiale necessario - Complessità di produzione 	<ul style="list-style-type: none"> - Minor rendimento - Sensibilità alle impurità 	<ul style="list-style-type: none"> - Basso rendimento complessivo - Degrado iniziale delle prestazioni - Scarsa stabilità negli anni 	<ul style="list-style-type: none"> - Tossicità - Scarsa disponibilità del materiale - Costi estremamente elevati 	<ul style="list-style-type: none"> - Tossicità
COSTI MEDI per kW_p	5,4	4,5	3,6	n.d.	6,5

* Dati elaborati da CETA

Riduzione del prezzo dei moduli

- «learning curve»: effetto delle economie di scala -



Thin film technology: CIGS, a-Si, CdTe

- confronto con i costi del silicio -

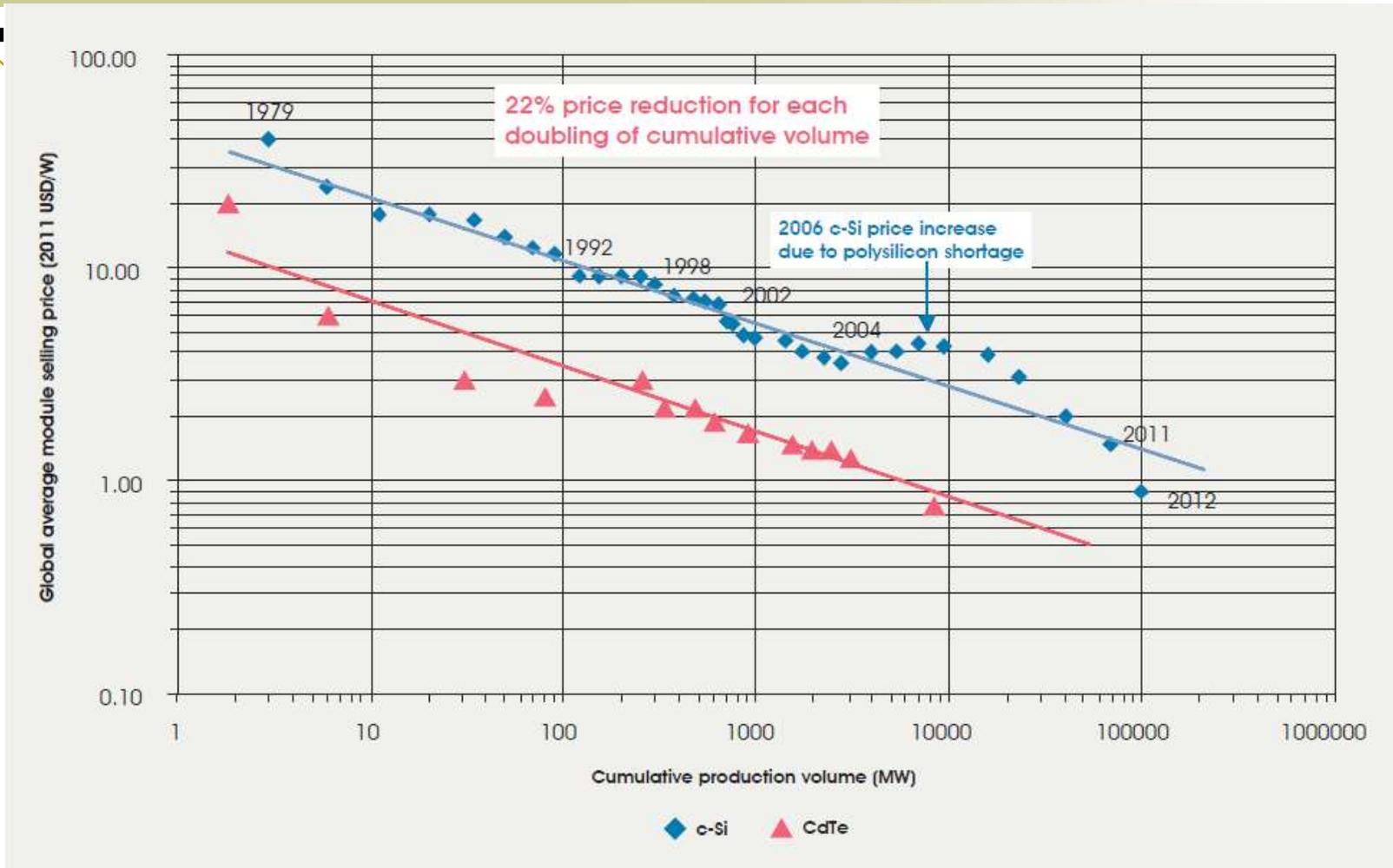


FIGURE 6.2: SOLAR PV MODULE COST LEARNING CURVE FOR CRYSTALLINE SILICON AND THIN-FILM

45

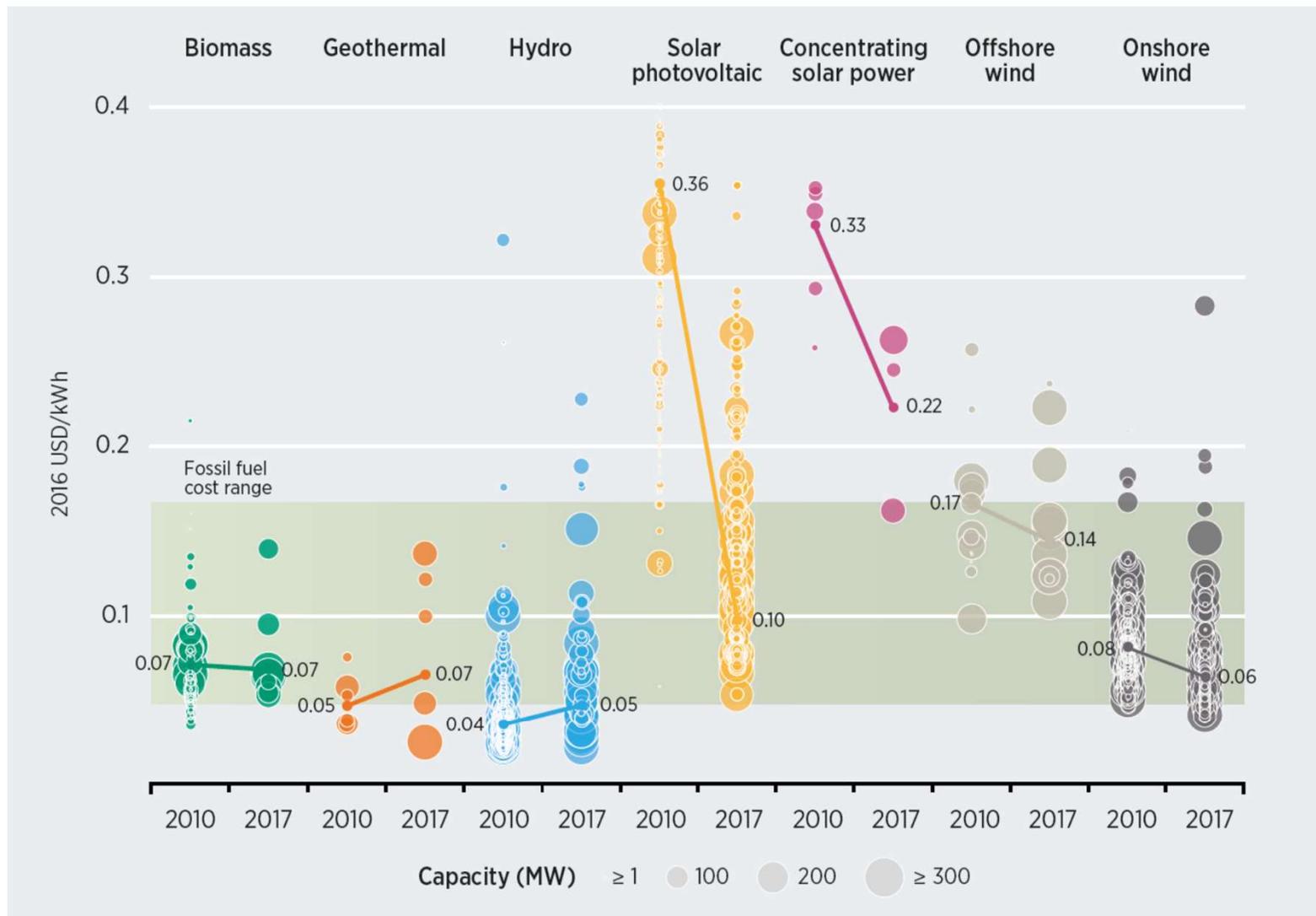
SOURCE: BASED ON DATA FROM EPIA AND PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY PLATFORM, 2011; LIEBREICH, 2011; SOLOGICO, 2012 AND IRENA ANALYSIS.

Solar Photovoltaic

- La Cina ha appena acceso la più grande centrale solare galleggiante al mondo
- La struttura si trova nella città di Huainan, nella provincia cinese orientale dell'Anhui. Ha una capacità di 40 megawatt (MW), sufficiente per alimentare una piccola città. E in una realizzazione di grande valore simbolico, l'impianto galleggia sopra una ex regione di miniera di carbone allagata.



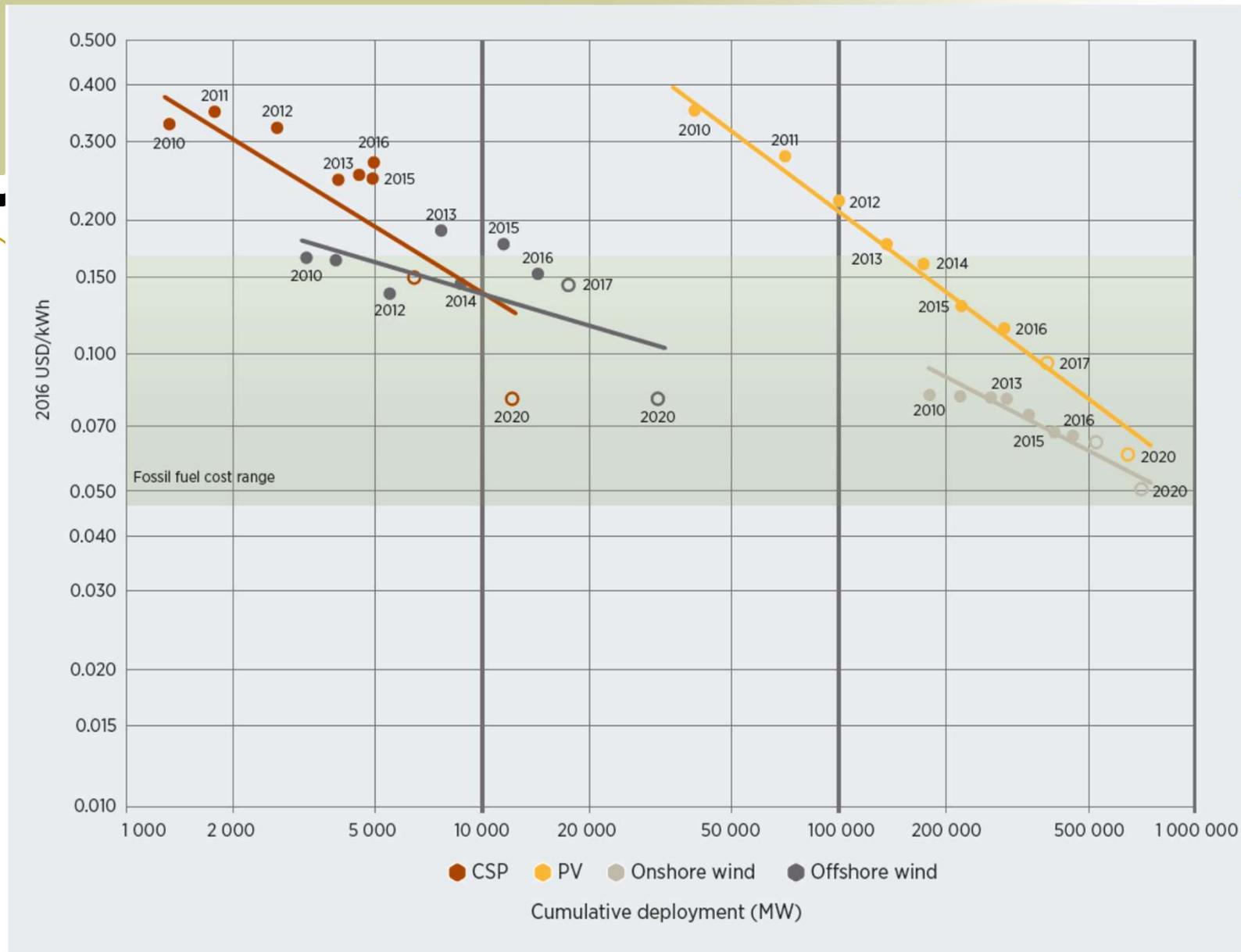
Global levelised cost of electricity from utility-scale renewable power generation technologies, 2010-2017



Source: IRENA Renewable Cost Database.

Note: The diameter of the circle represents the size of the project, with its centre the value for the cost of each project on the Y axis. The thick lines are the global weighted average LCOE value for plants commissioned in each year. Real weighted average cost of capital is 7.5% for OECD countries and China and 10% for the rest of the world. The band represents the fossil fuel-fired power generation cost range.

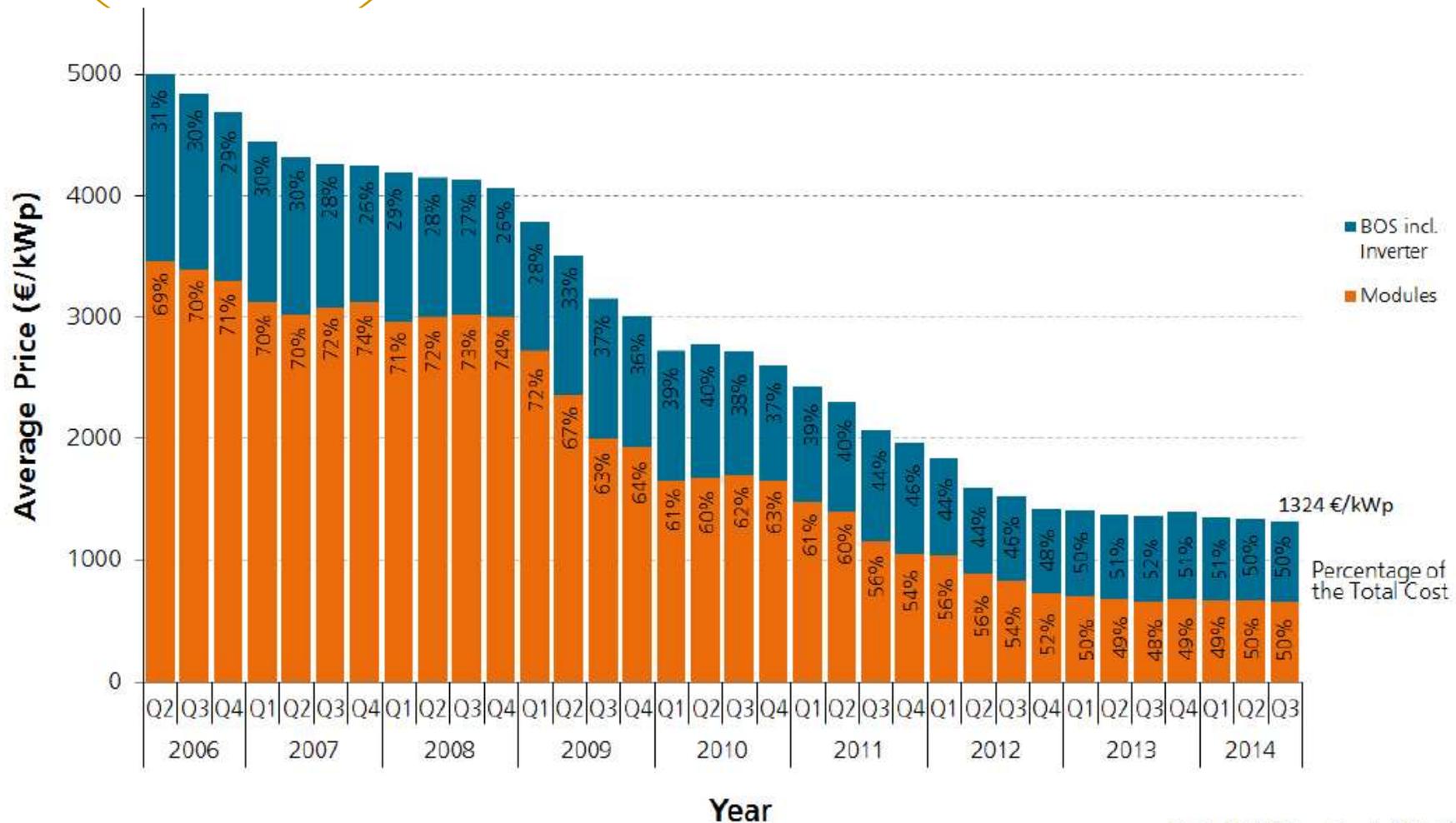
Global Learning curves for the global weighted average levelized cost of electricity from CSP, solar PV and onshore and offshore wind, 2010-2020



Source: IRENA Renewable Cost Database; IRENA Auctions Database; GWEC, 2017; WindEurope, 2017; MAKE Consulting, 2017; and SPE, 2017.

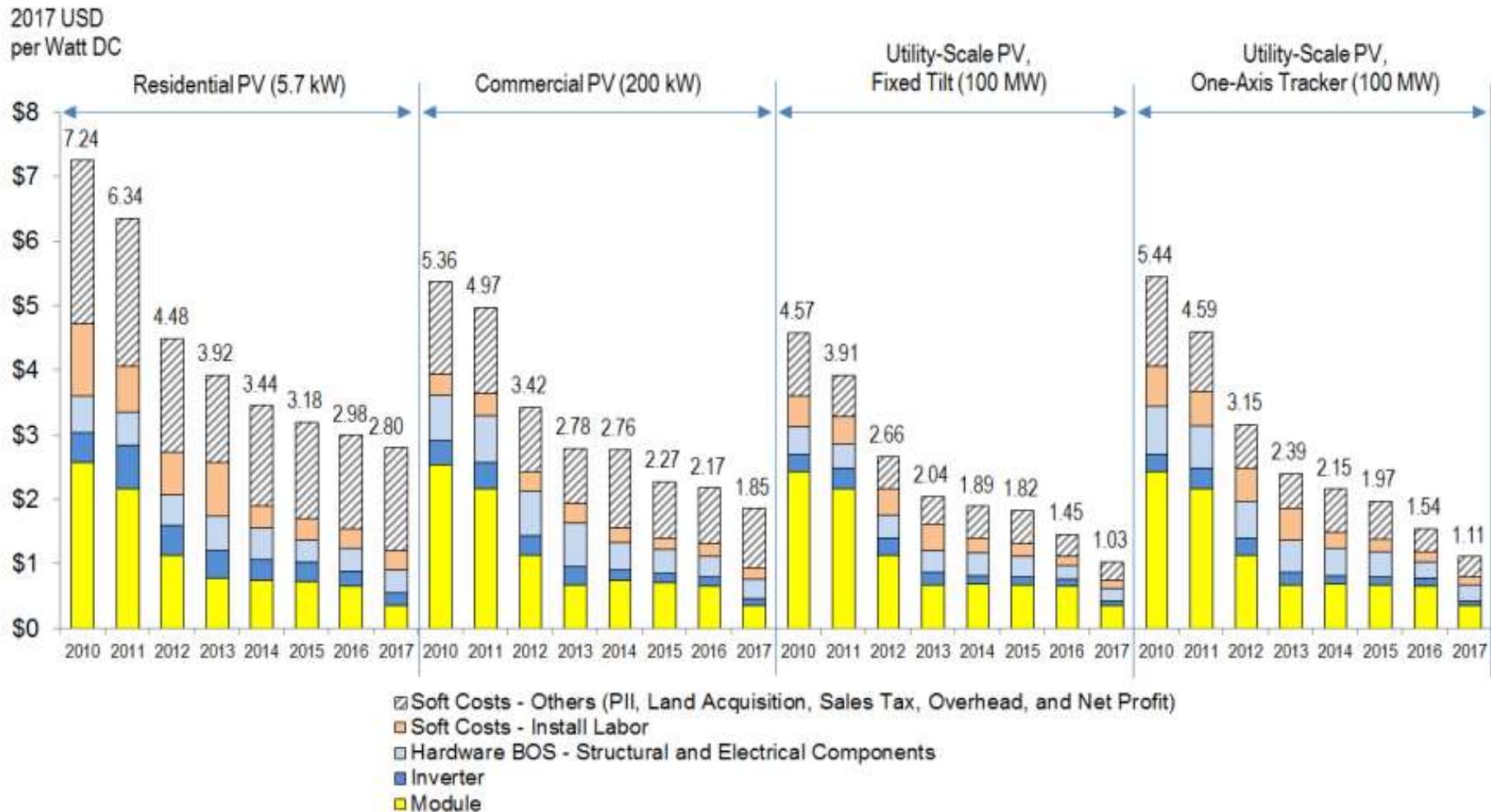
Ruolo del Balance of System

- Il costo del BoS oggi è comparabile con quello dei moduli -

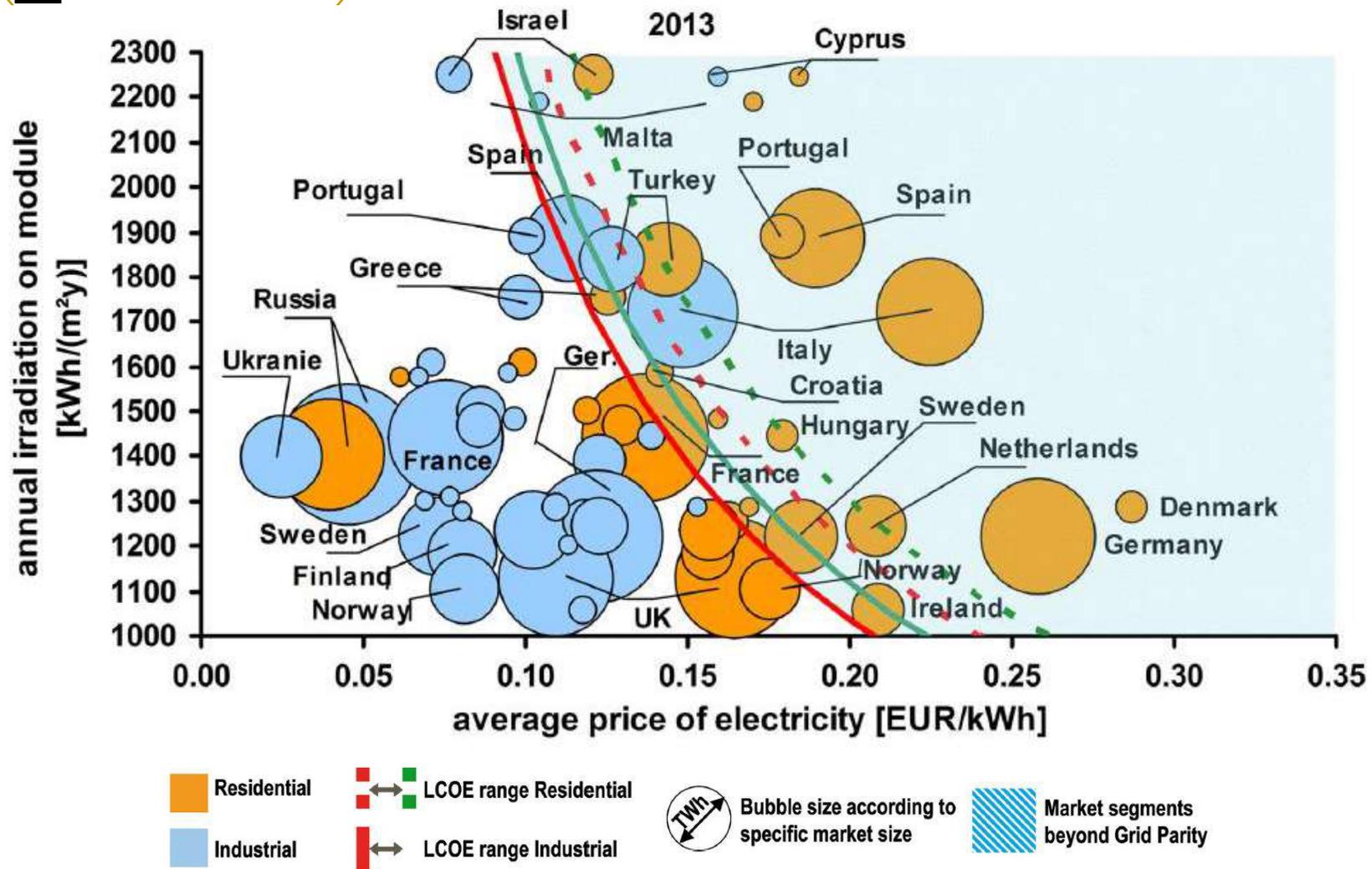


Ruolo del Balance of System

- NREL BOS Benchmarks Costs (2017)



Grid parity



Conclusioni

- • Il costo dell'energia da fotovoltaico ha ormai consentito di raggiungere in molti paesi il grid parity;
- • Nonostante gran parte della riduzione di costo sia stata dovuta ad economie di scala, le innovazioni tecnologiche possono ancora favorire una ulteriore riduzione dei costi e un'ulteriore diffusione;
- • Le tecnologie attuali presentano vari miglioramenti, tuttavia di natura incrementale;
- • Le tecnologie «emergenti» devono ancora dimostrare una maggior durata, ma comunque non sembrano destinate ad essere attori importanti nell'ambito della «power generation» se non in settori di nicchia, almeno nell'immediato;