



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



# Celle e pannelli solari innovativi ad elevata efficienza

Dott. Simone Barbarossa

Università di Palermo

11/04/2025



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Obiettivi:

Trovare alternative al sistema mainstream basato sul silicio, che possano soddisfare:

Versatilità di utilizzo

Rischi ambientali e di salute

Efficienze di conversione

Semplicità di fabbricazione

Stabilità a lungo termine

Costo e abbondanza del materiale



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Obiettivi:

Trovare alternative al sistema mainstream basato sul silicio, che possano soddisfare:





Finanziato dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca

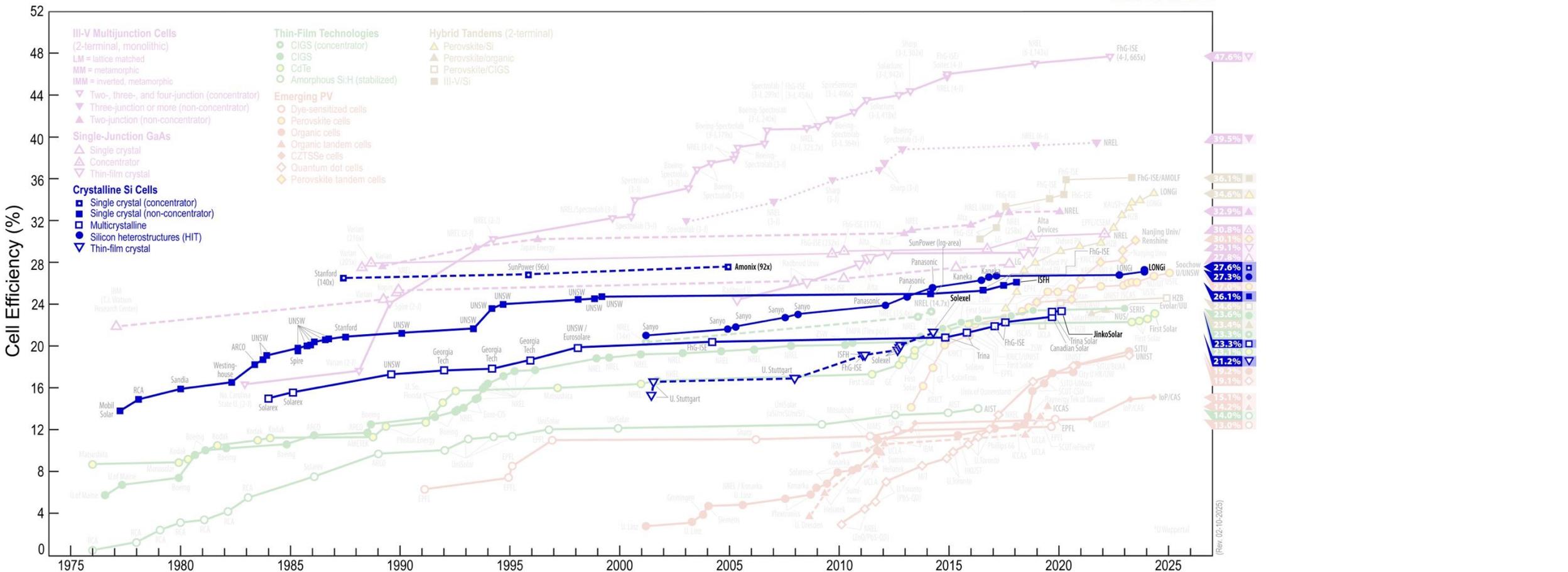


Italiadomani  
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



# Celle fotovoltaiche al Silicio: confronto con altre tecnologie

## Best Research-Cell Efficiencies





Finanziato dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca

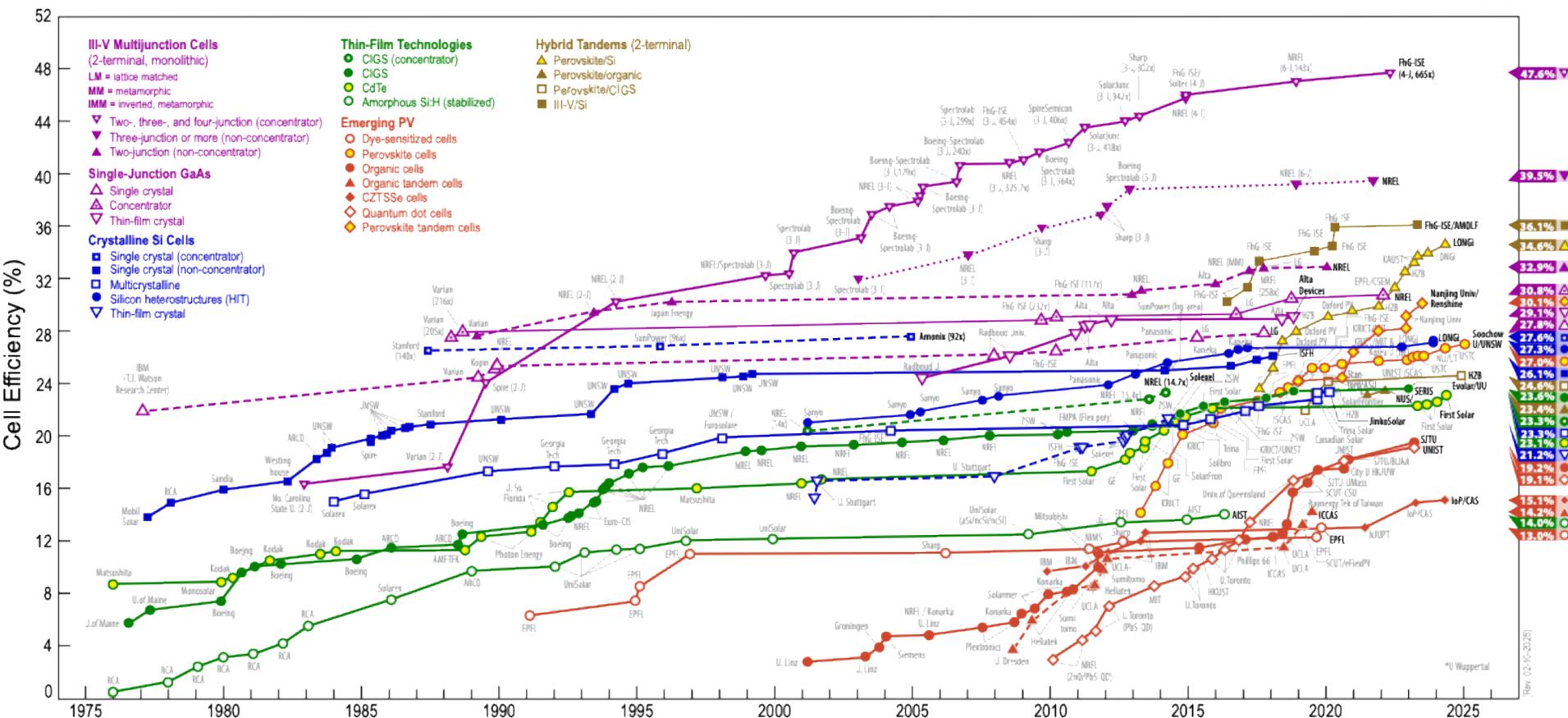


Italiadomani  
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



# Panoramica delle tecnologie per celle fotovoltaiche

## Best Research-Cell Efficiencies



GaAs

Film sottili

- CIGS
- CdTe

Altre tecnologie emergenti

- Perovskiti
- Organiche
- Quantum dot
- CZTSSe

Celle Tandem ibride

Altre...



Finanziato dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca

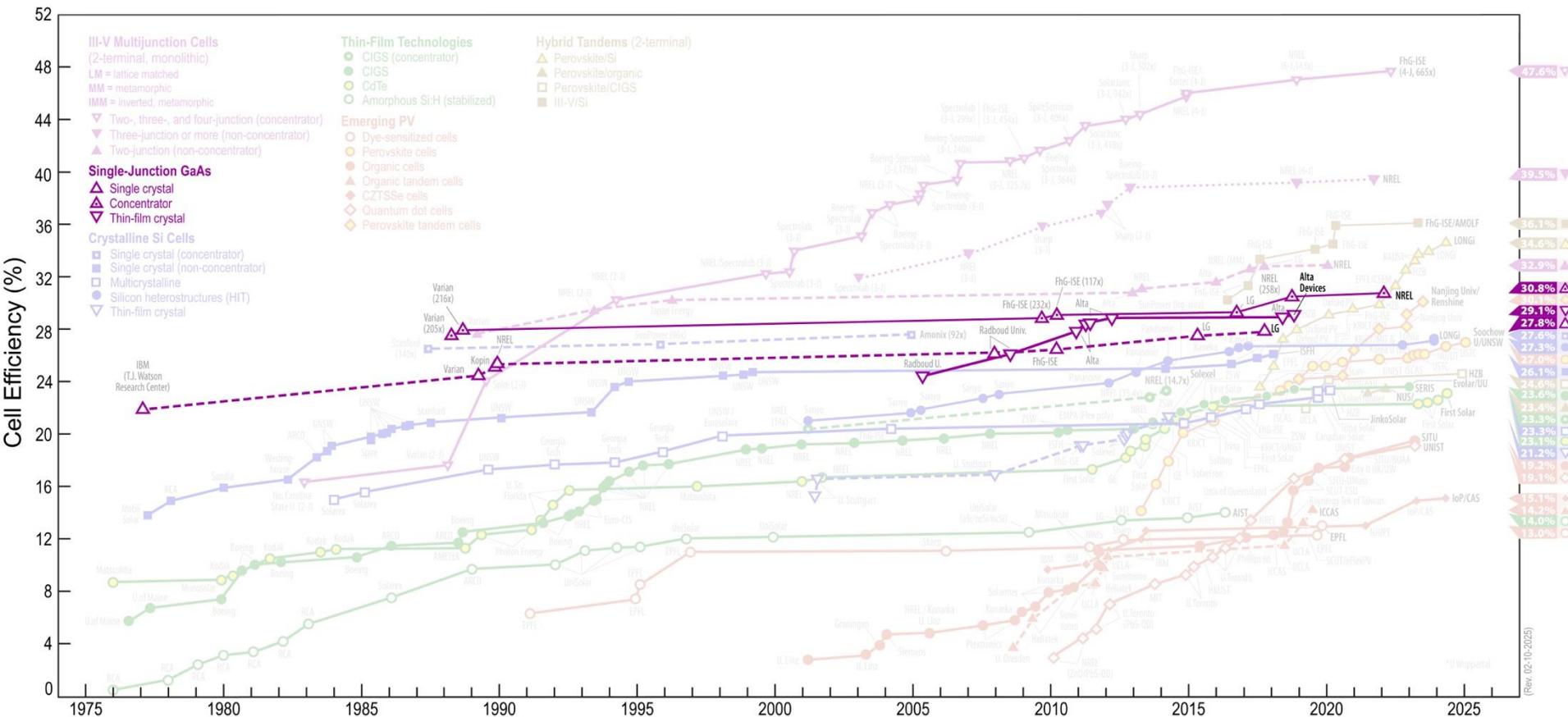


Italiadomani  
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



# Panoramica delle tecnologie per celle fotovoltaiche

## Best Research-Cell Efficiencies



GaAs



Finanziato dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca



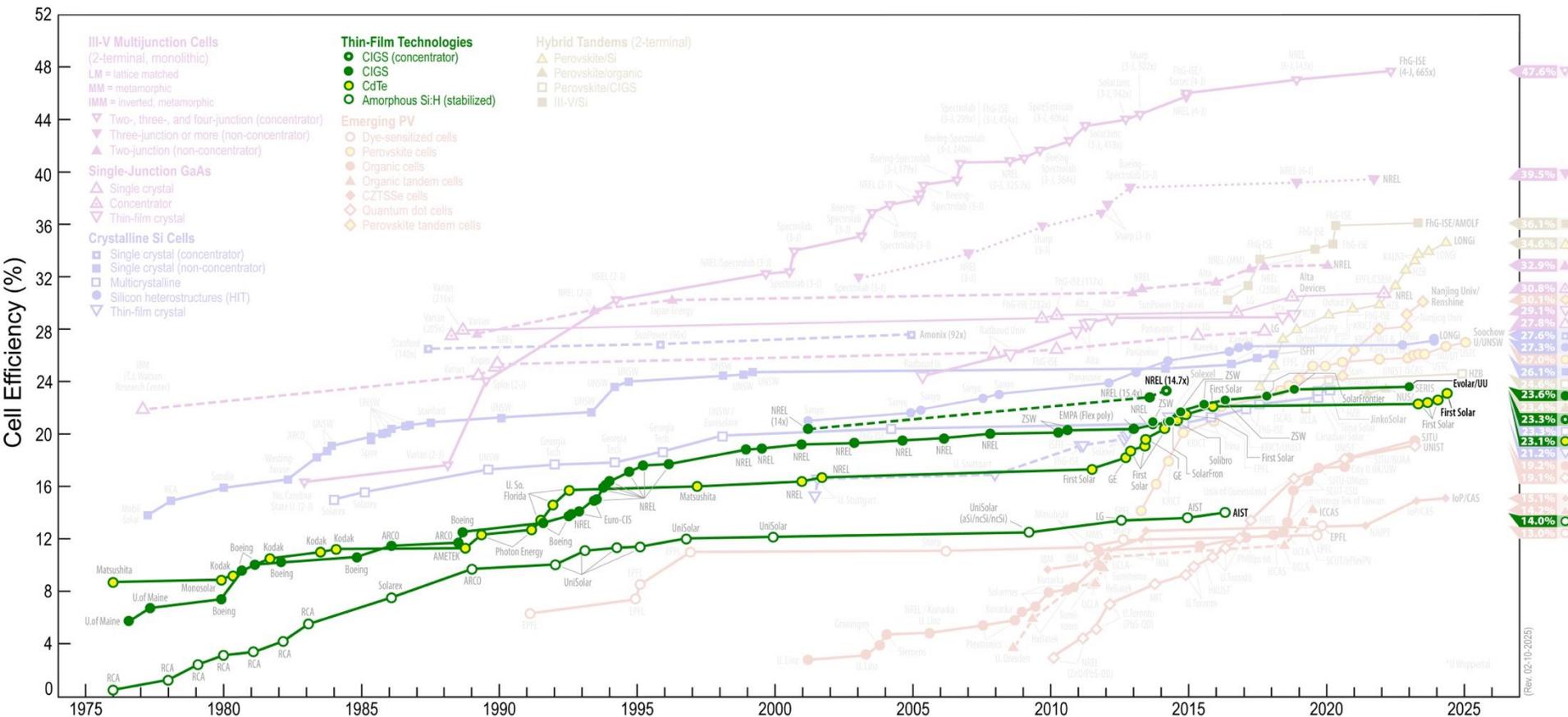
Italiadomani  
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

# Panoramica delle tecnologie per celle fotovoltaiche

## Best Research-Cell Efficiencies



GaAs

Film sottili

- CIGS

- CdTe



Finanziato dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca



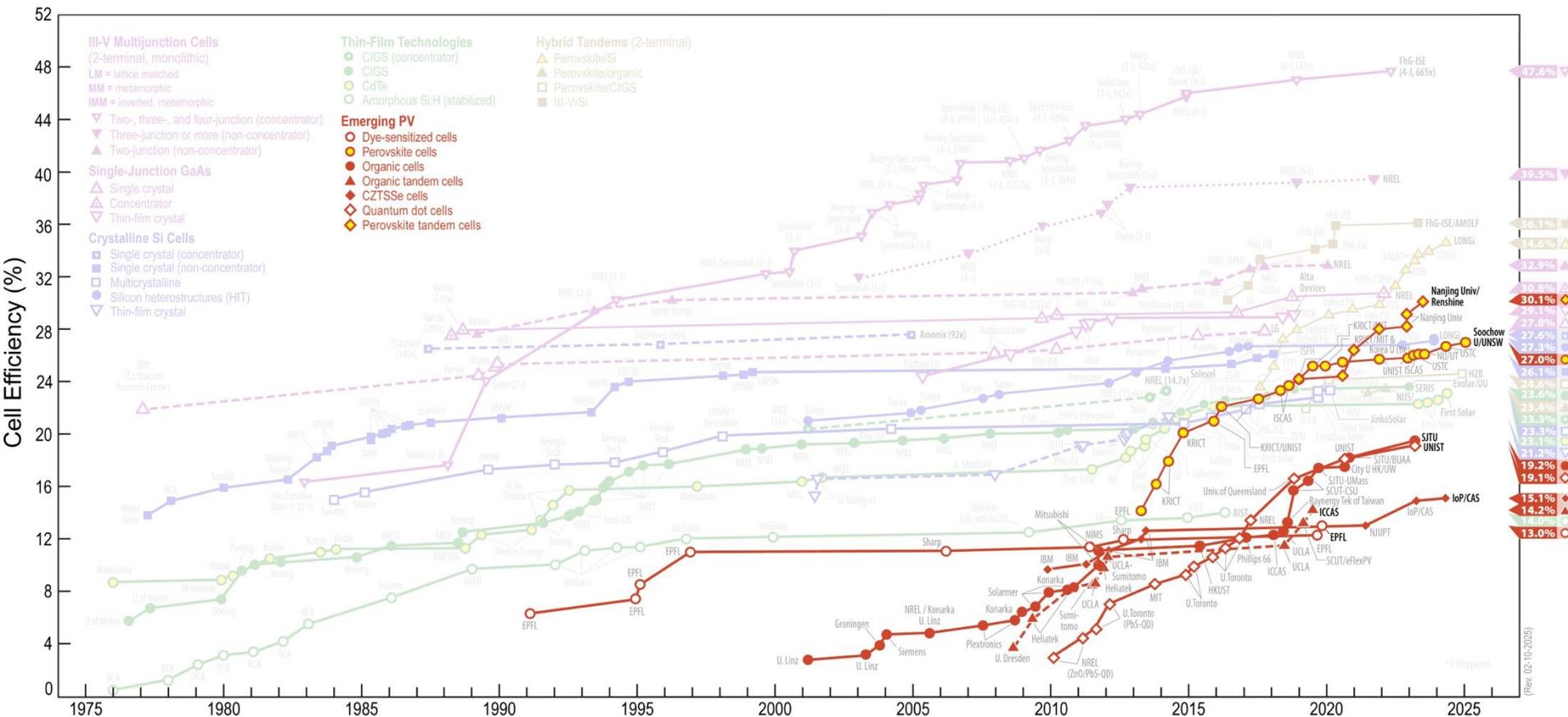
Italiadomani  
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

# Panoramica delle tecnologie per celle fotovoltaiche

## Best Research-Cell Efficiencies



GaAs

Film sottili

- CIGS
- CdTe

Altre tecnologie emergenti

- Perovskiti
- Organiche
- Quantum dot
- CZTSSe



Finanziato dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca

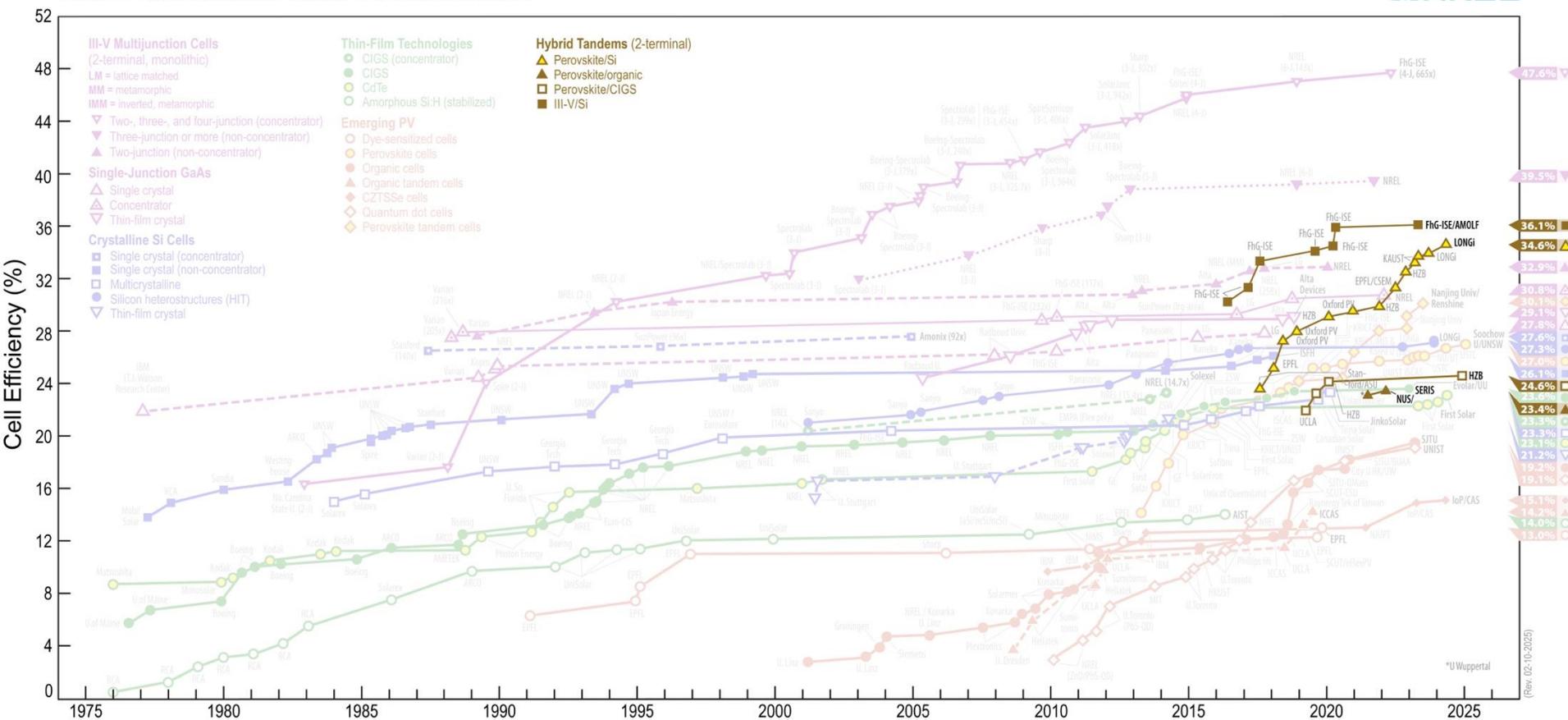


Italiadomani  
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



# Panoramica delle tecnologie per celle fotovoltaiche

## Best Research-Cell Efficiencies



GaAs

Film sottili

- CIGS
- CdTe

Altre tecnologie emergenti

- Perovskiti
- Organiche
- Quantum dot
- CZTSSe

Celle Tandem ibride

Altre...



Finanziato dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca



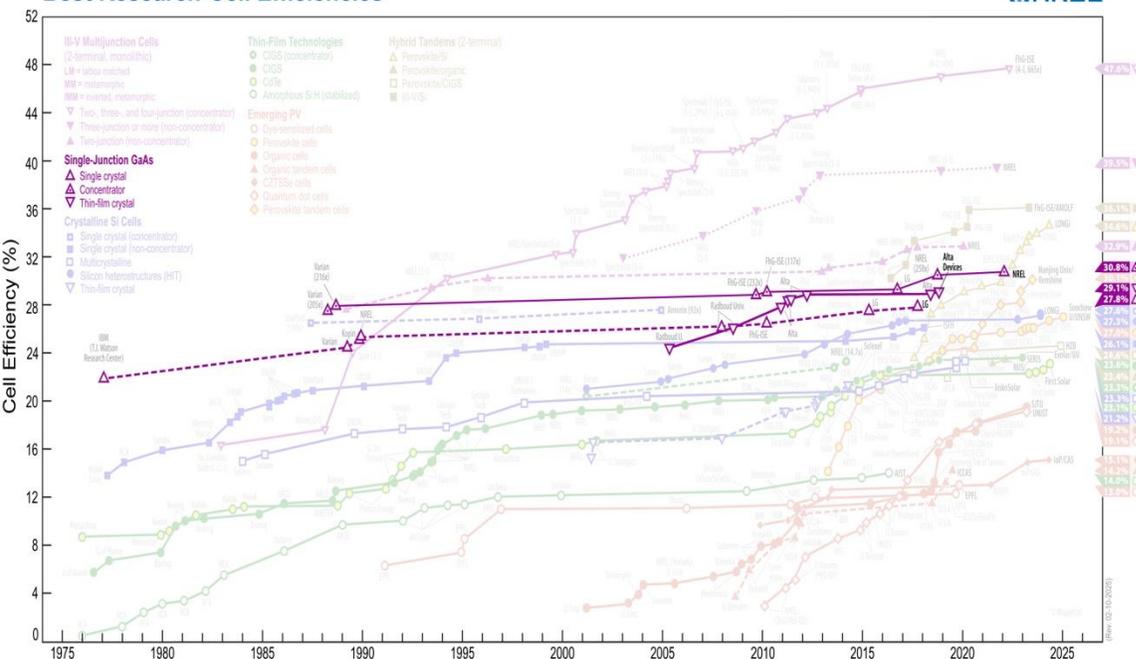
Italiadomani  
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



## Celle solari all'Arsenuro di Gallio

- Tecnologia fotovoltaica nata in concomitanza con il silicio
- Band gap **1.42 eV**
- Record di efficienze a singola cella 29.1%
- Alta resistenza a condizioni ambientali avverse (radiazioni, calore e umidità)
- Buona versatilità di band gap tramite combinazione di elementi quali Al o In

Best Research-Cell Efficiencies





Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Limitazioni di impiego della tecnologia a base GaAs

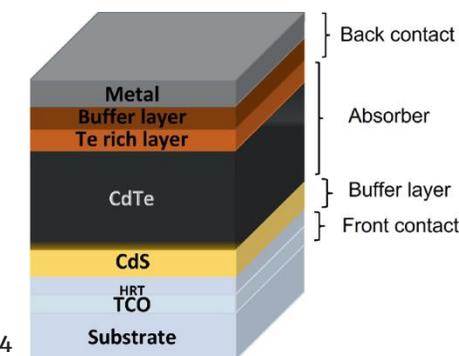
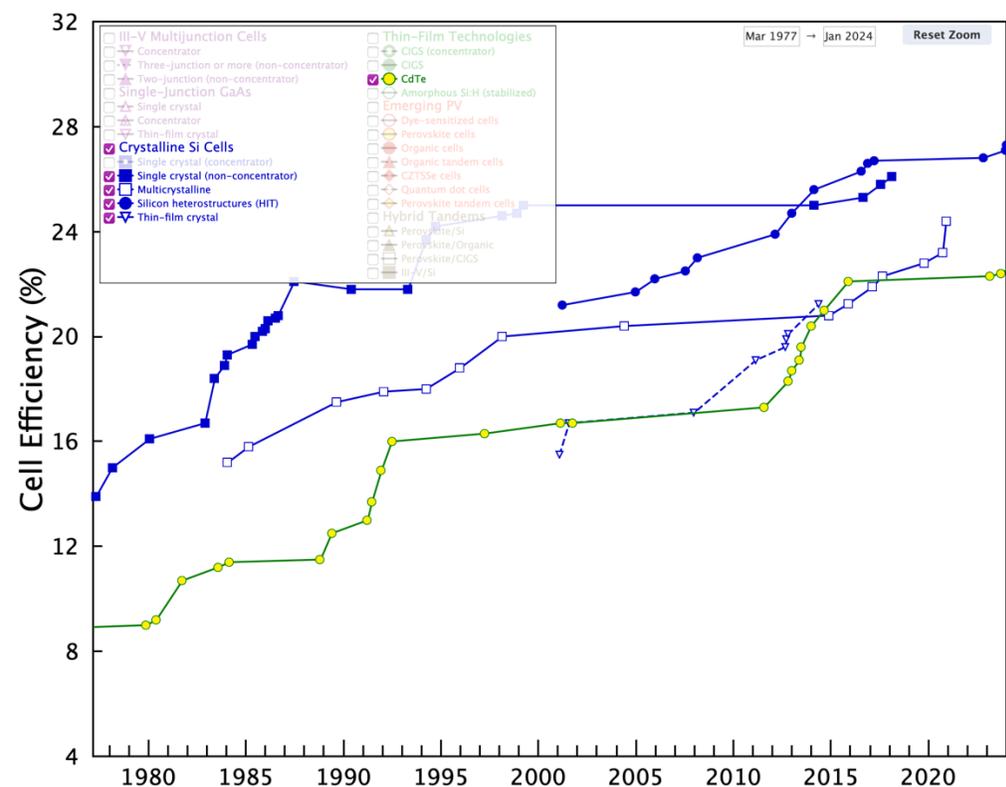
- Sistemi molto complessi da fabbricare, con costi annessi elevati
- Scarsità degli elementi di partenza, come Ga e As
- Fragilità meccanica dei moduli

- ✗ Non attraente all'impiego di massa per il commercio comune
- ✓ Impiego in ambiti specifici quali applicazioni spaziali



# Film sottili a base Tellururo di Cadmio

- Secondo tipo di tecnologia più utilizzata in massa, dopo il silicio
- Band gap  $\sim 1.45$  eV
- Efficienze del  $\sim 22\%$
- Metodo di fabbricazione relativamente più semplice del silicio, con minor consumo energetico
- Ottime prestazioni in climi caldi e buona resistenza a condizioni ambientali





Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA

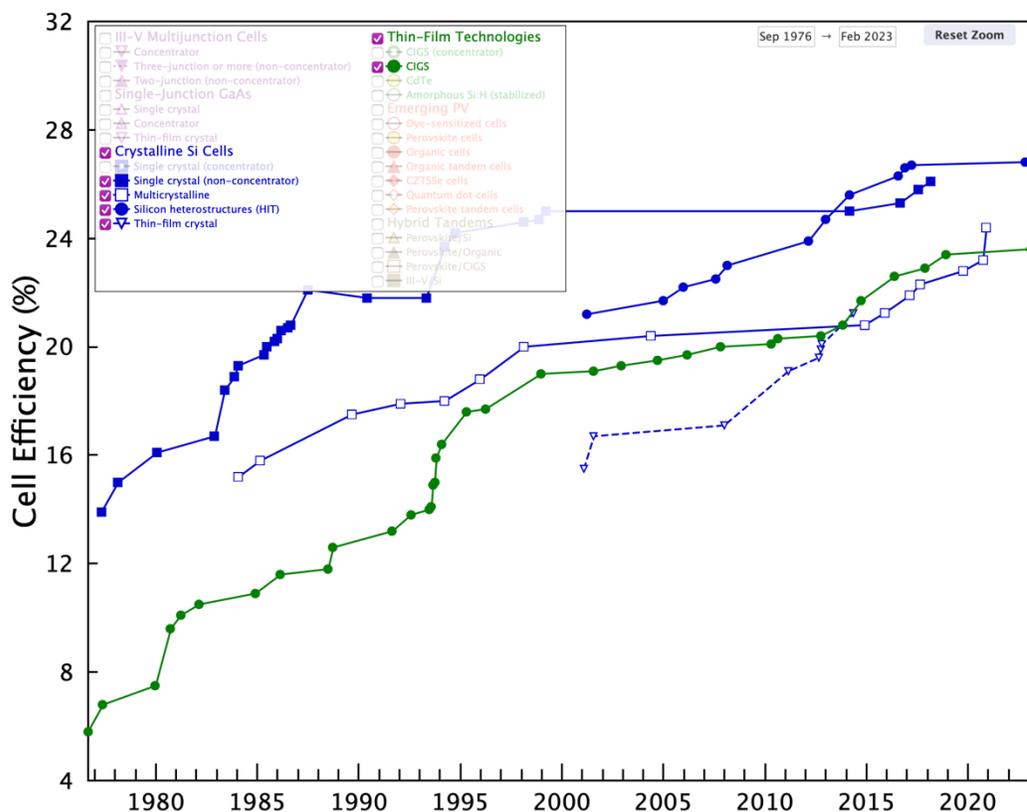


## Film sottili a base Tellururo di Cadmio: Limitazioni

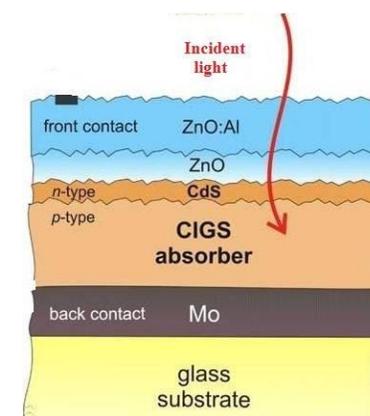
- Difficoltà di scalabilità per reperimento dei materiali, in particolare il Tellurio
- Problemi di tossicità del Cd, sia in fase di fabbricazione che di smaltimento
- Miglioramento dell'efficienza limitato



## Film sottili a base CIGS: $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$



- Tra le prime tecnologie fotovoltaiche ad essere sviluppate
- Band gap **1-1.7 eV**, dipendendo dalle composizioni
- Efficienza massima: 23.6%
- Film leggero e flessibile, con spessore assorbitore  $\sim 1\text{-}2 \mu\text{m}$
- Grande efficienza di lavoro in condizione di bassa illuminazione come per BIPV





Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA

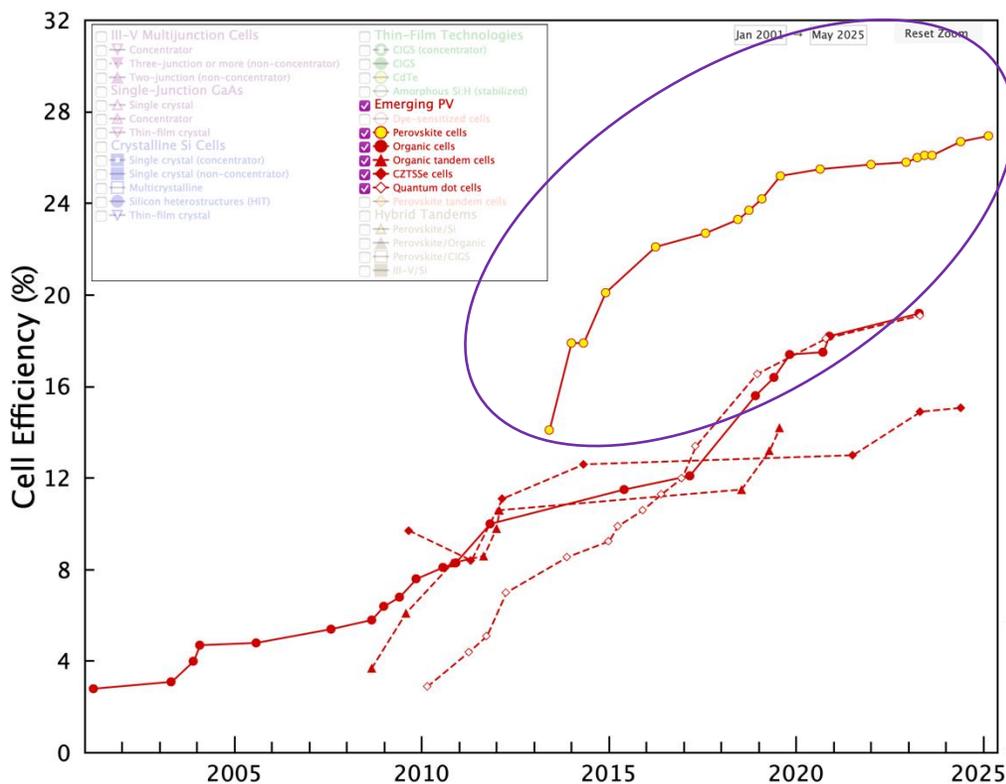


## Film sottili CIGS: Limiti

Problemi	Cause
Stabilità	Umidità, temperatura.
Tossicità	Uso del cadmio in uno dei layer del dispositivo
Scalabilità	Costi e reperibilità dei materiali rari quali In e Ga. Alto livello di controllo della composizione e spessori degli strati



## Celle solari a base Perovskiti



- Tra i materiali più promettenti per le celle fotovoltaiche del futuro
- Band gap variabile da alta versatilità di composizione
- Efficienze massime 27%
- Performance di assorbimento elevate
- Metodi produttivi relativamente semplici e a basso costo



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



# Perovskiti come materiali per il fotovoltaico

Composti ibridi organico-inorganico



$\text{CaTiO}_3$



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca

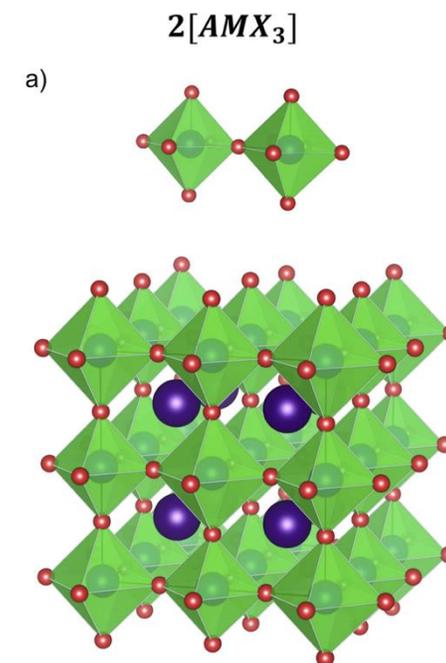


Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA

**NEST**  
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

## Perovskiti come materiali per il fotovoltaico

Composti ibridi organico-inorganico





Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Perovskiti come materiali per il fotovoltaico

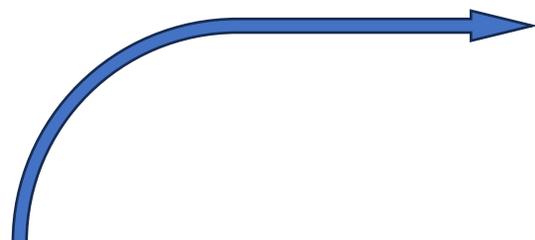
Composti ibridi organico-inorganico



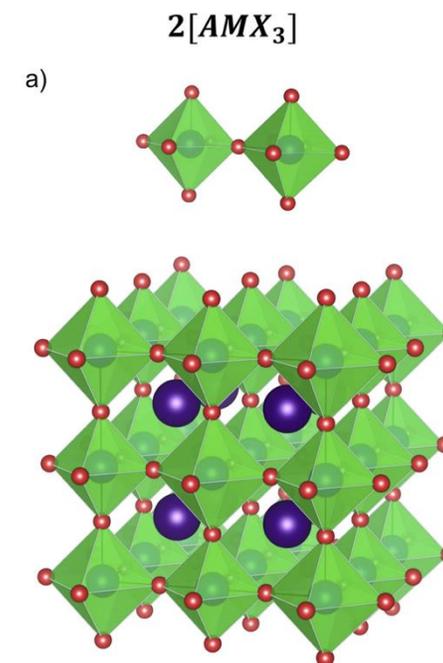
$\text{CaTiO}_3$



$\text{A M X}_3$



Formamidinio (FA), Metilammonio (MA), Cesio, etc..





Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Perovskiti come materiali per il fotovoltaico

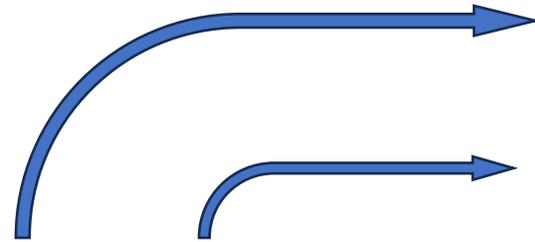
Composti ibridi organico-inorganico



$\text{CaTiO}_3$

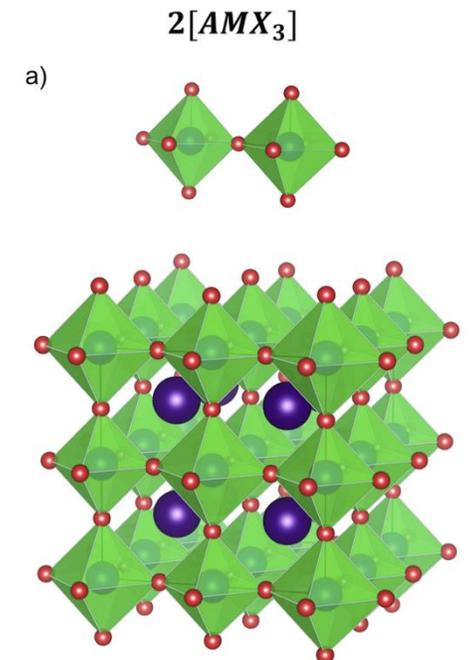


$\text{A M X}_3$



Formamidinio (FA), Metilammonio (MA), Cesio, etc..

Alogenuri: Iodio, Cloro o Bromo



## Perovskiti come materiali per il fotovoltaico

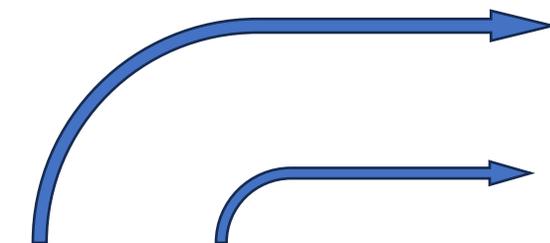
Composti ibridi organico-inorganico



$\text{CaTiO}_3$



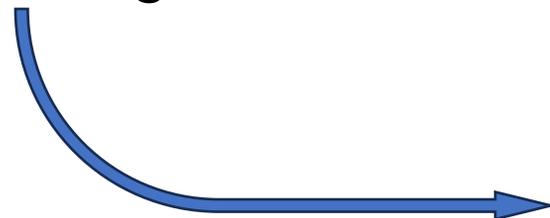
$\text{A M X}_3$



Formamidinio (FA), Metilammonio (MA), Cesio, etc..



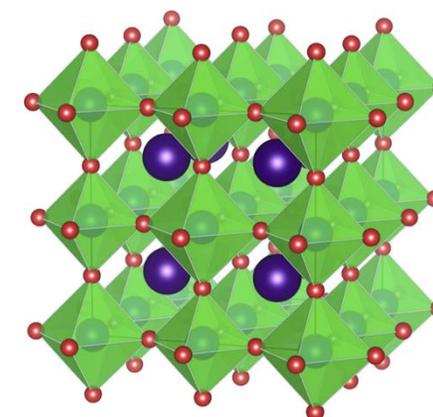
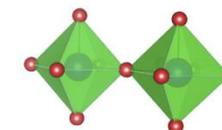
Alogenuri: Iodio, Cloro o Bromo



Piombo, Stagno, etc..

a)

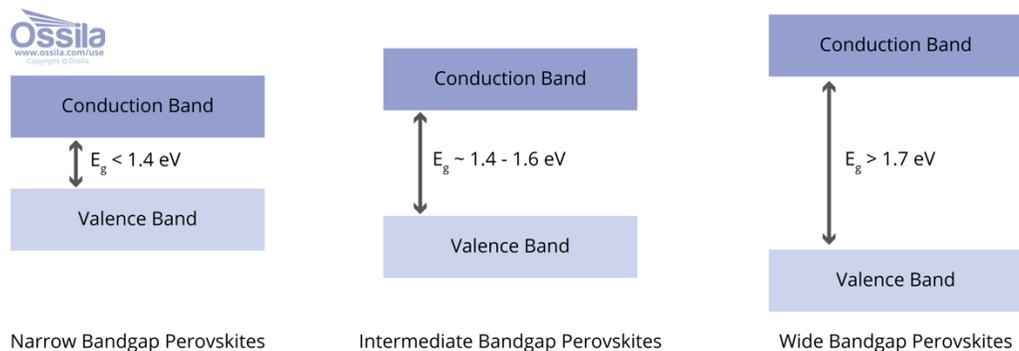
$2[\text{AMX}_3]$



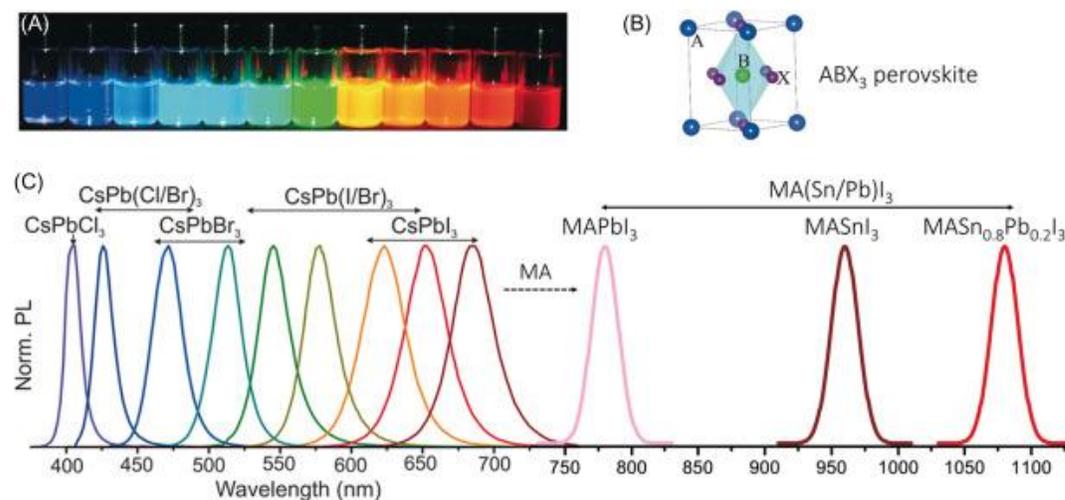
## Vantaggi della composizione

Band gap Silicio: 1.12 eV

Band gap perovskiti: Variabile



Scegliere il band gap desiderato in base alla necessità

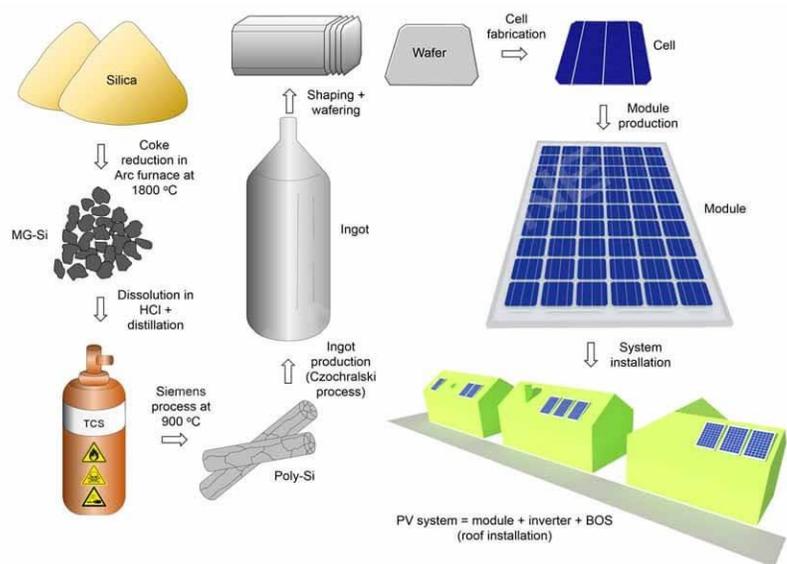


<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814727-6.00001-3>

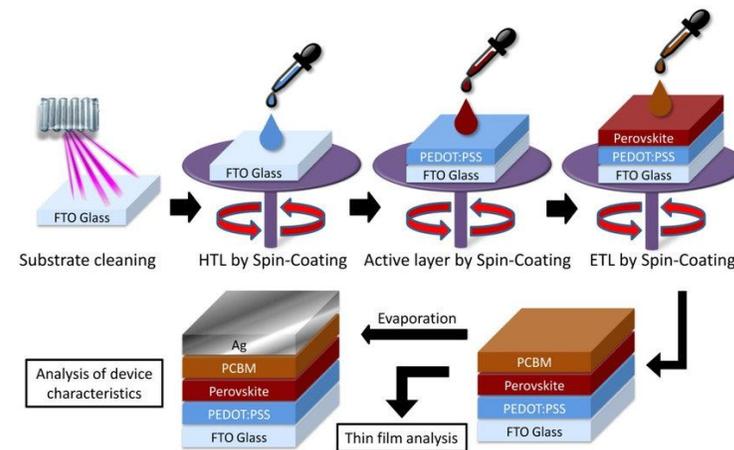
# Fabbricazione delle celle solari a perovskite

Produzione a partire da soluzioni, applicabili tramite:

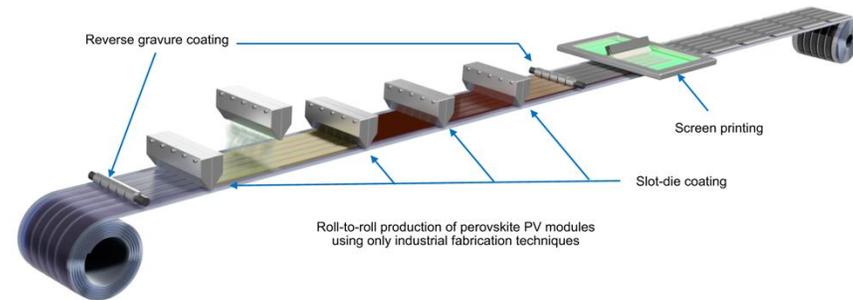
## Confronto con il Silicio



## Spin-coating



## Blade-coating

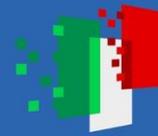




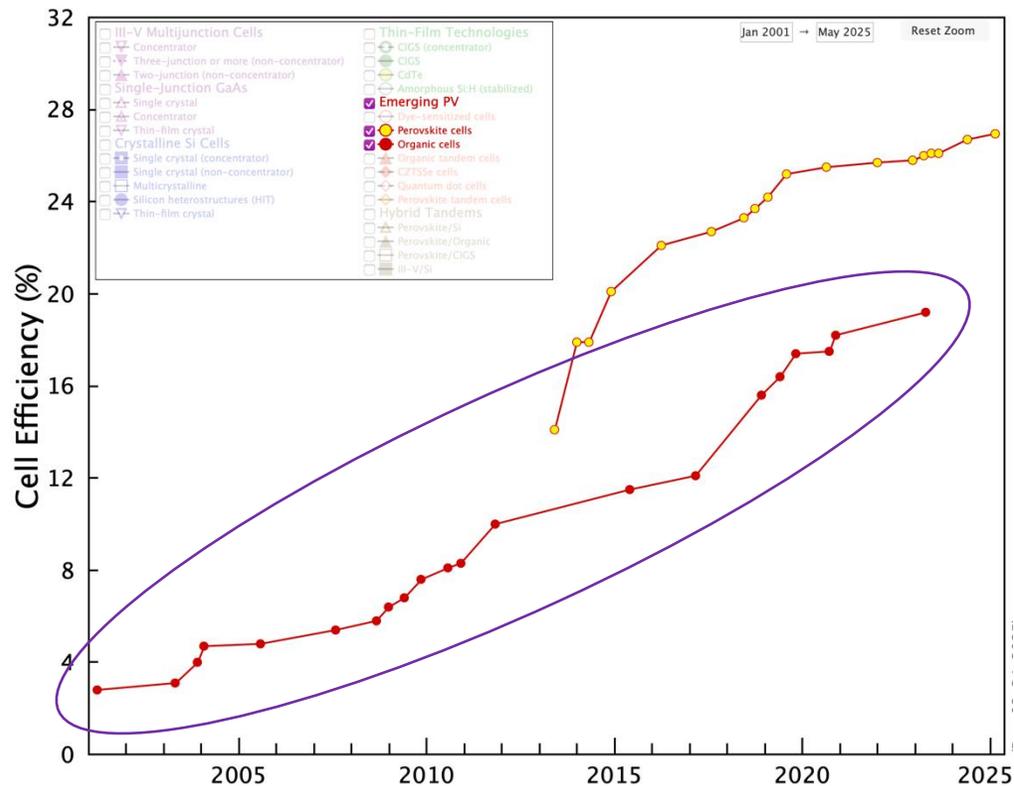
## Tecnologia a perovskite: Problemi da superare

Problemi	Cause
Stabilità termica ed illuminazione	Umidità, temperatura, degradazione UV.
Tossicità	Uso del piombo
Scalabilità	Difetti e disomogeneità nel materiale
Riduzione delle performance	Migrazione degli ioni ed isteresi
Durabilità	Tempo di vita limitato

*Nonostante questo, si prospettano come materiali rivoluzionari per le applicazioni fotovoltaiche*



## Celle solari a base organica

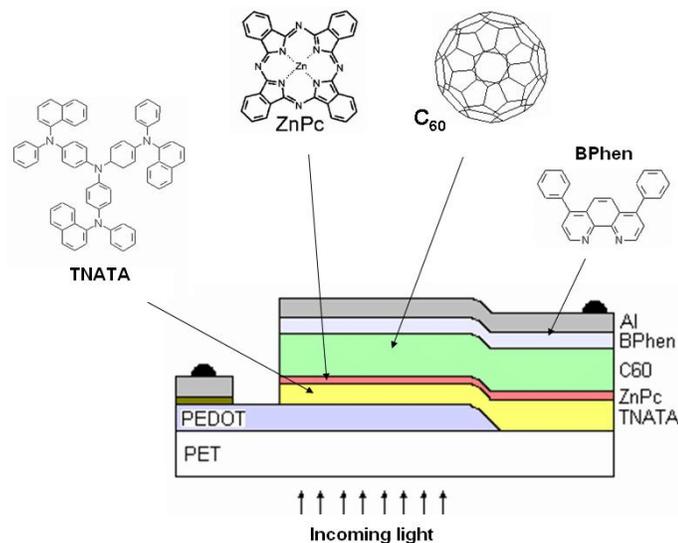


- Basate su polimeri organici a base carbonio
- Efficienze del 19.2%
- Promettenti per semplicità e basso costo di produzione
- Versatilità di composizione
- Particolarmente adatto per applicazioni di moduli solari flessibili
- Processo produttivo a basso impatto ambientale



## Celle solari a base organica

Materiale	Band Gap (eV)
PM6	~1.35 eV*
Y6	~1.33 eV*
PTB7-Th	~1.58 eV**
ITIC	~1.60 eV**
PCE10 (PTB7-Th derivative)	~1.55 eV**
PBDB-T	~1.63 eV**
PCBM	~1.75 eV***

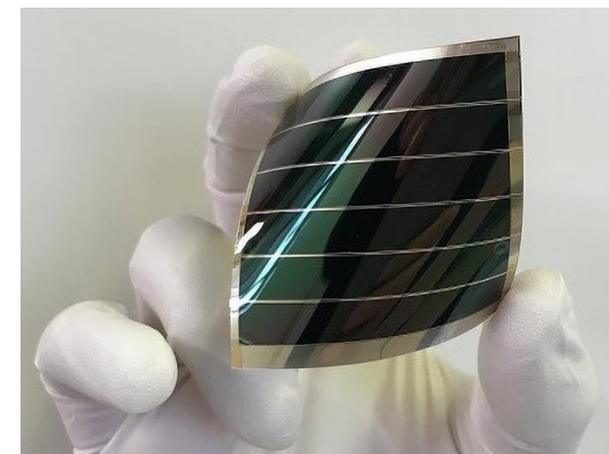


DOI: [10.1117/12.781275](https://doi.org/10.1117/12.781275)

\*<https://doi.org/10.1002/adma.202302005>

\*\* DOI: [10.1002/adfm.201806804](https://doi.org/10.1002/adfm.201806804)

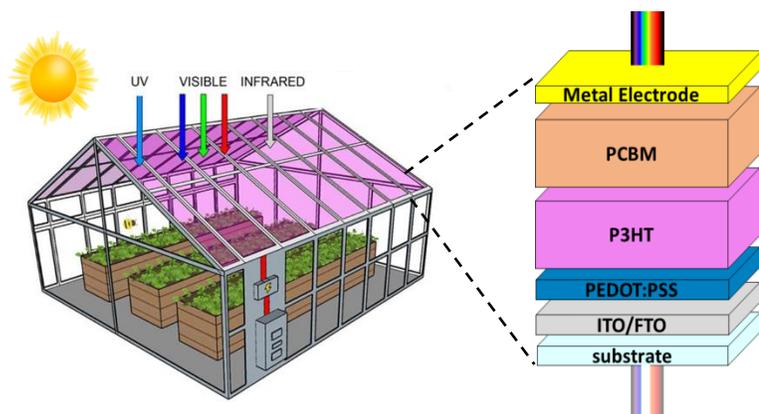
\*\*\*doi:10.1038/s41563-020-00835-x



Prototipo Toyobo company

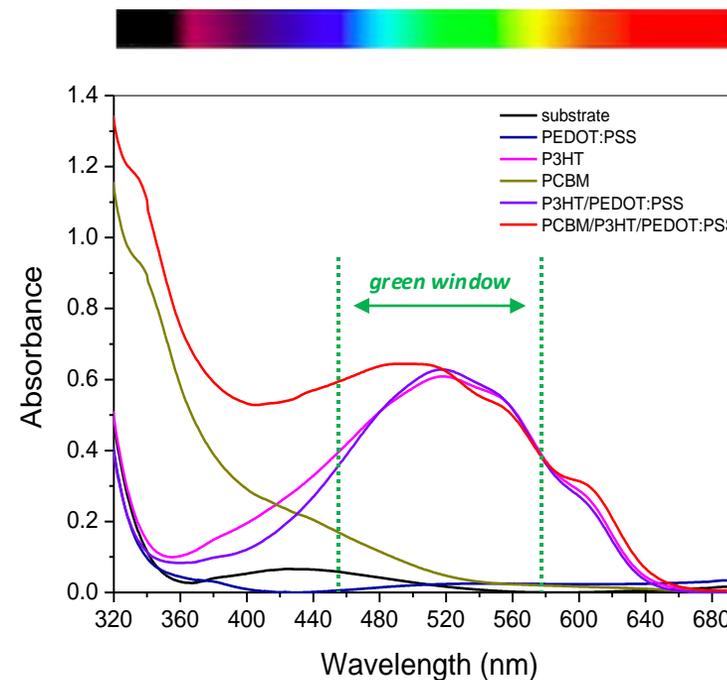
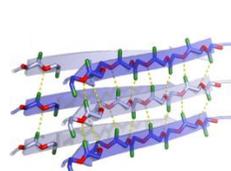
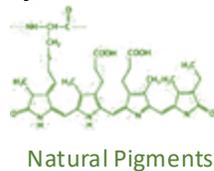
# Celle solari spettralmente selettive basate su assorbitore P3HT

Sfruttare la "finestra verde"



**Biomolecular Third Component**

- Higher Durability
- Increasing Efficiency
- Eco-compatibility

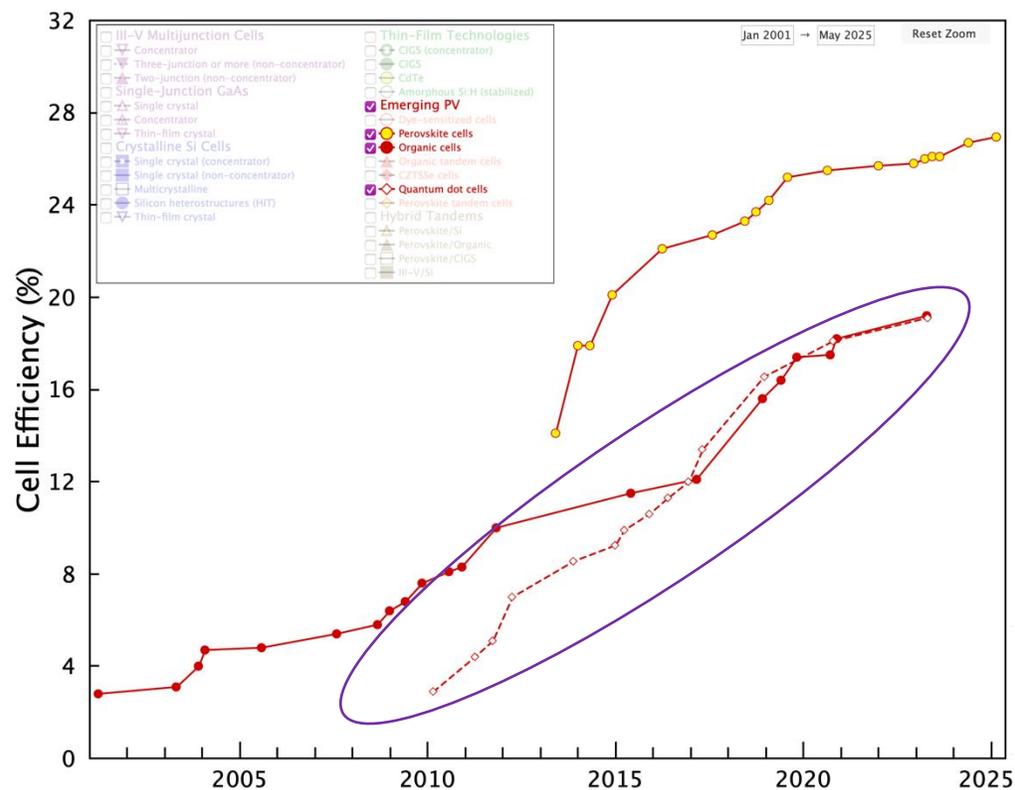




## Celle solari a base organica: difficoltà ancora presenti

Problemi	Cause
Stabilità termica ed illuminazione	Umidità, temperatura, degradazione UV.
Bassa efficienza (<20%)	Band gap elevato. Ricombinazioni di carica
Scalabilità	Disomogeneità nel materiale e nelle prestazioni
Riduzione delle performance	Basse conducibilità in raccolta
Durabilità	Tempo di vita limitato

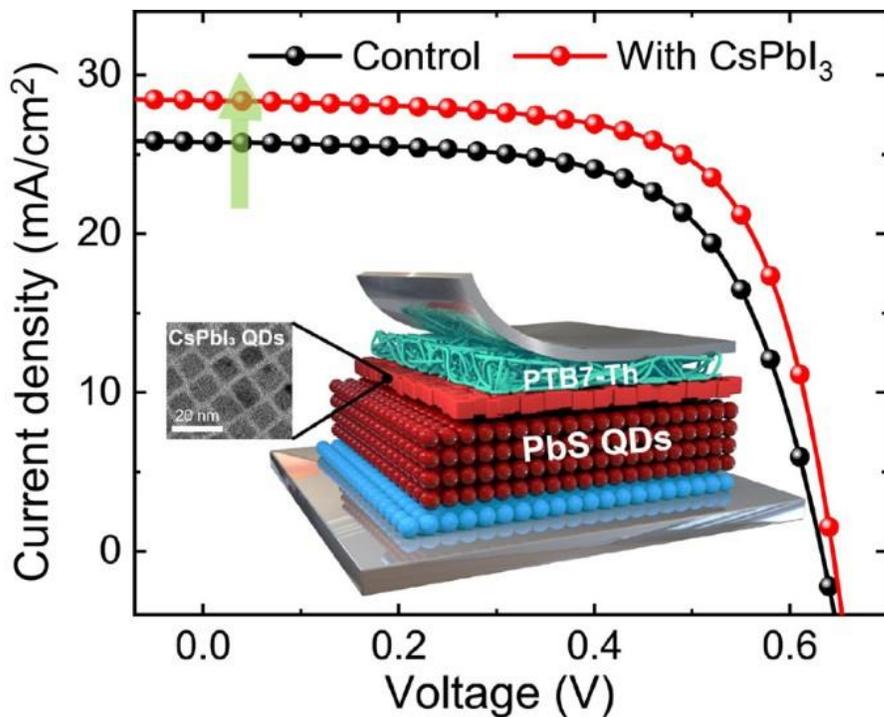
## Celle solari con Quantum dots (QDs)



- Basate su particelle di dimensioni nanometriche (QD)
- Alta versatilità di assorbimento tramite variazione del band gap
- Alta efficienza di conversione (Multiple Exciton Generation)
- Basso costo dei materiali e di produzione
- Celle solari leggere e flessibili



# Quantum dots

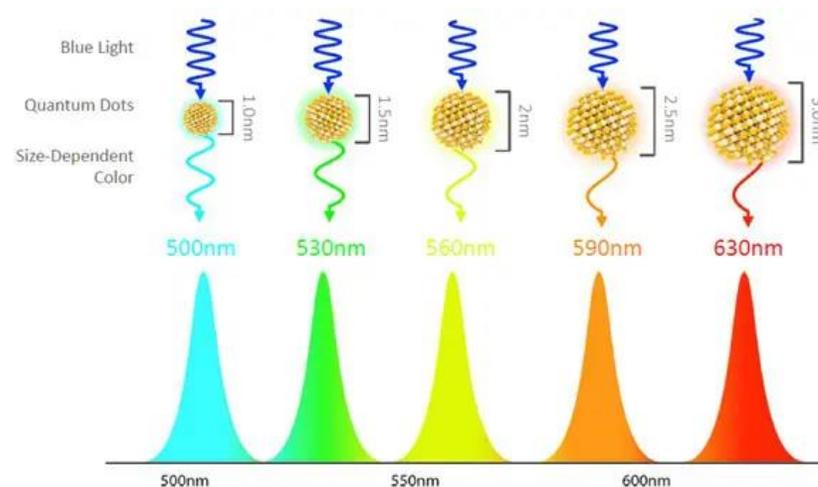


<https://doi.org/10.1007/s12274-022-4195-8>

Quantum dot composti da:  
Sulfuro di Piombo (**PbS**) o Selenuro di cadmio (**CdSe**)

Basato su effetti di confinamento quantico

Band gap in base alla dimensione delle singole particelle



[https://www.cd-bioparticles.com/t/Properties-and-Applications-of-Quantum-Dots\\_56.html](https://www.cd-bioparticles.com/t/Properties-and-Applications-of-Quantum-Dots_56.html)



## Quantum dots: vantaggi e svantaggi

### Vantaggi di questi sistemi

- Alta efficienza di generazione di coppie e-h
- Versatilità nella composizione dei materiali ospiti in cui incapsularlo
- Precisione di selezione del band gap

### Problemi associati

- Tossicità dei composti quali Cadmio e Piombo
- Degradazione da fenomeni quali umidità, luce e alte temperature
- Scalabilità con mantenimento delle prestazioni



## Altri sistemi fotovoltaici emergenti: CZTSSe

### CZTSSe

- Caratteristica principale: Basato su elementi abbondanti e non tossici
- Rame, Zinco, Stagno, Zolfo e Selenio
- Materiali assorbitori come alternativa alle celle CdTe e CIGS
- Basso impatto ambientale e con bassi costi dei materiali
- Efficienze massime: 12.6%\*

### ASe

- Basato su assorbitore  $Sb_2Se_3$
- Materiali non tossici e abbondanti
- Basso costo di produzione, con band gap intrinseco  $\sim 1.2$  eV
- Efficienze 10.57%\*\*

\*<https://doi.org/10.1002/aenm.201301465>

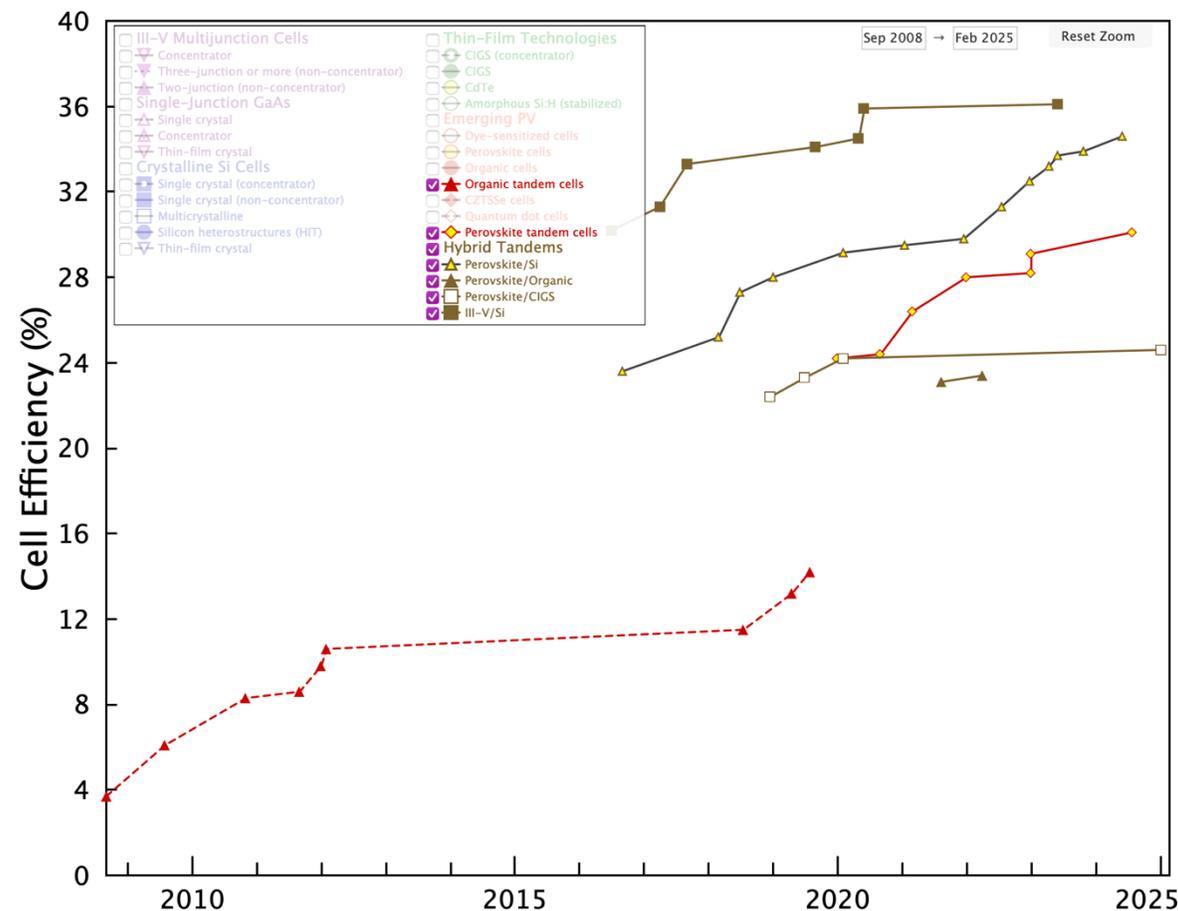
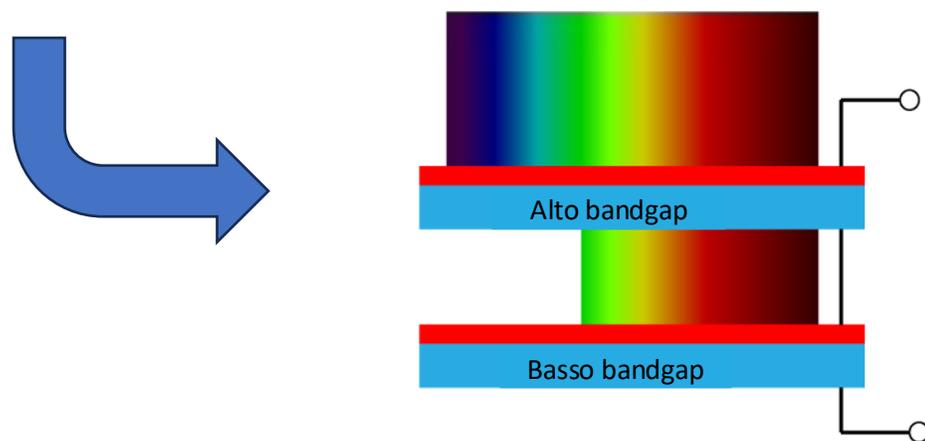
\*\*<https://doi.org/10.1039/D2EE02261C>

# Celle a disposizione Tandem

Scelta degli assorbitori adatti

Assorbire con alta efficienza diverse parti dello spettro

Raggiungere efficienze maggiori (>30%)



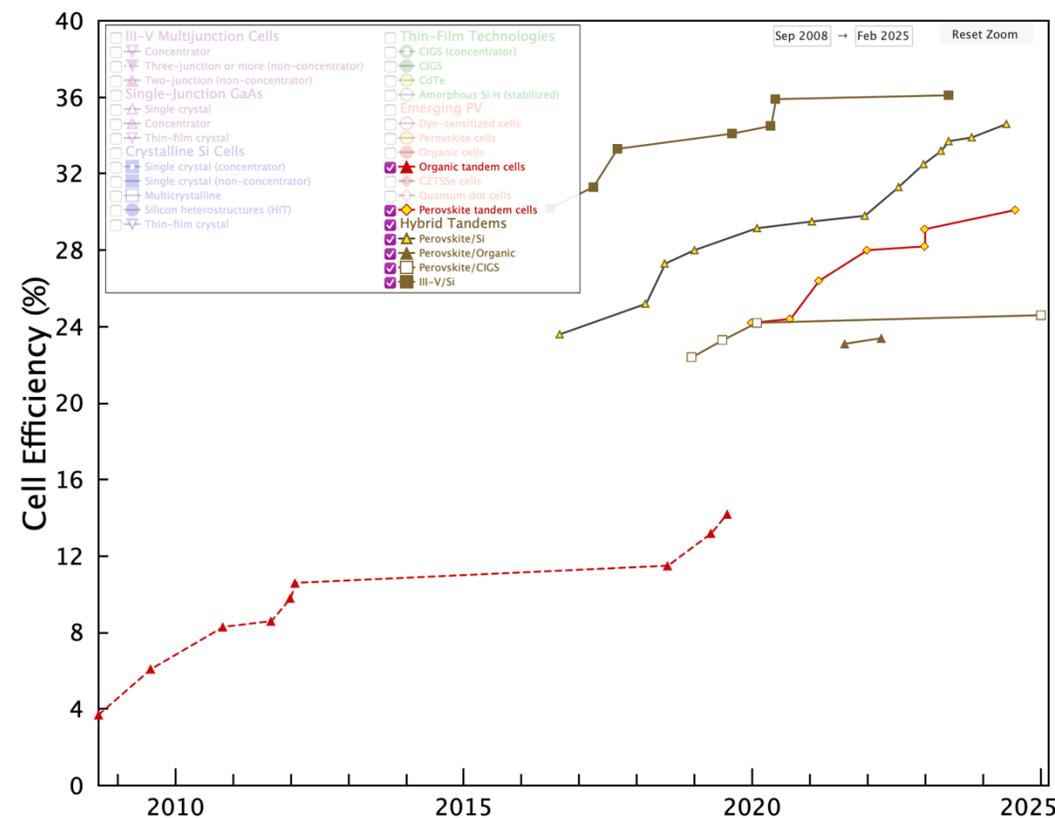
# Celle a disposizione Tandem: Diverse tecnologie

Ad unica categoria

- Cella tandem Perovskite/Perovskite
- Cella tandem Organica/Organica

Ibride

- Cella tandem Perovskite/Silicio ★
- Cella tandem Perovskite/Organico
- Cella tandem Perovskite/CIGS
- Cella tandem III-V/Si ★

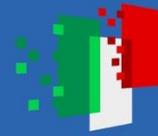




Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Conclusioni

- Molte tecnologie recenti hanno necessità di lavoro per sopperire alle difficoltà tecniche
- Ogni tecnologia ha dei vantaggi e svantaggi



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Conclusioni

- Molte tecnologie recenti hanno necessità di lavoro per sopperire alle difficoltà tecniche
- Ogni tecnologia ha dei vantaggi e svantaggi





Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Conclusioni

- Molte tecnologie recenti hanno necessità di lavoro per sopperire alle difficoltà tecniche
- Ogni tecnologia ha dei vantaggi e svantaggi

Nessuna è perfetta

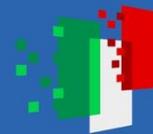




Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Conclusioni

- Molte tecnologie recenti hanno necessità di lavoro per sopperire alle difficoltà tecniche
- Ogni tecnologia ha dei vantaggi e svantaggi

Nessuna è perfetta



Costo e abbondanza del materiale

Semplicità di fabbricazione

Rischi ambientali e di salute

Versatilità di utilizzo

Efficienze di conversione

Stabilità a lungo termine

## Conclusioni

- Molte tecnologie recenti hanno necessità di lavoro per sopperire alle difficoltà tecniche
- Ogni tecnologia ha dei vantaggi e svantaggi

Nessuna è perfetta



Costo e abbondanza del materiale

Semplicità di fabbricazione

Rischi ambientali e di salute

Versatilità di utilizzo

Efficienze di conversione

Stabilità a lungo termine



Utilizzo di tutte in  
modo complementare