

**MISSION
INNOVATION**

accelerating the clean energy revolution

POA MATERIALI AVANZATI PER L'ENERGIA**PROGETTO IEMAP - Piattaforma Italiana Accelerata per i Materiali per
l'Energia**

D4.17 - Sviluppo di un prototipo di cella InGaP/Si ed analisi dei benefici economici

Sofia Spagnolo, Giulio Mela, Pierpaolo Girardi, Giovanni Abagnale

D4.17 - Sviluppo di un prototipo di cella InGaP/Si ed analisi dei benefici economici

Sofia Spagnolo, Giulio Mela, Pierpaolo Girardi, Giovanni Abagnale

Dicembre 2024

Report MISSION INNOVATION

Ministero della Transizione Ecologica - ENEA
Mission Innovation 2021-2024 - III annualità

Progetto: IEMAP

Work package: WP4: *Materiali per il fotovoltaico*

Linea di attività: LA4.9: *Sviluppo di un prototipo di cella InGaP/Si ed analisi dei benefici ambientali ed economici*

Responsabile del Progetto: Massimo Celino, ENEA

Responsabile della LA: Giovanni Abagnale, RSE

Indice

SOMMARIO.....	5
INTRODUZIONE.....	6
1 METODO DI VALUTAZIONE DELL'IMPATTO ECONOMICO	7
2 ANALISI DEGLI IMPATTI ECONOMICI	8
3 CONCLUSIONI.....	10
4 BIBLIOGRAFIA.....	11
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	13

Elenco delle figure

Figura 1: Analisi dei contributi sul CLCC della cella InGaP/GaAs (U.F. 1 kWp, cut off 5%)

Figura 2: Analisi dei contributi sul CLCC della cella InGaP/Si (U.F. 1 kWp, cut off 5%)

Figura 3: Confronto tra i valori di CLCC al variare dell'efficienza della cella InGaP/Si.

Sommario

In questo documento viene riportata l'analisi comparativa dei potenziali impatti economici di celle fotovoltaiche InGaP/m-Si e InGaP/GaAs, sviluppate da RSE nell'ambito del "Programma Mission Innovation" WP4-LA4.9, e destinate all'utilizzo in concentratori solari luminescenti. I potenziali impatti delle due tipologie di celle, calcolati a partire dall'estrazione delle materie prime fino alla cella funzionante, sono quantificati tramite il metodo Commodity Life Cycle Costing (CLCC), allo scopo di valutare gli effettivi benefici economici derivanti dalla sostituzione del substrato di crescita e verificare l'efficienza minima delle celle InGaP/Si necessaria per ottenerli.

I risultati ottenuti dimostrano che, a parità di potenza installata e di efficienza delle celle, le celle InGaP/Si hanno dei potenziali impatti sul CLCC inferiori alle celle InGaP/GaAs. Questa differenza è dovuta principalmente all'impatto della produzione dei wafer in GaAs.

Introduzione

In questo documento si riportano le analisi dei potenziali impatti economici di celle fotovoltaiche a singola giunzione in fosforo di gallio indio su substrato in silicio monocristallino (InGaP/m-Si), sviluppate da RSE nell'ambito del "Programma Mission Innovation" WP4-LA4.9, e destinate all'utilizzo in concentratori solari luminescenti (Luminescent Solar Concentrator, LSC). I benefici economici vengono quantificati tramite l'indicatore Commodity Life Cycle Costing e si riferiscono ai processi di produzione riportati nel documento "Analisi LCA impatto ambientale di un prototipo di cella InGaP/Si" [1], a cui si rimanda per la descrizione di scopo, campo di applicazione e analisi dell'inventario dell'analisi.

1 Metodo di valutazione dell'impatto economico

Per la valutazione degli impatti economici è stato utilizzato il metodo Commodity Life Cycle Cost, versione aggiornata nel 2024 (CLCC).

L'indicatore commodity life-cycle cost (o CLCC) è un indicatore di tipo economico - sviluppato nel corso delle attività di Ricerca di Sistema nel triennio 2019-2021 - finalizzato a quantificare il consumo di risorse naturali da parte di un prodotto o processo nel corso del suo ciclo di vita. Tale indicatore va inteso come un complemento all'analisi ambientale di tipo Life Cycle Assessment (LCA) che, essendo espresso in unità monetarie, può integrare il processo decisionale da parte dei policy-maker.

Nello specifico, l'indicatore CLCC è stato sviluppato a partire dal concetto di *basic raw material cost*, cioè del costo di tutte le risorse naturali acquisite e utilizzate nella fase di produzione di un determinato bene [2]. Tale concetto viene tuttavia esteso all'intero ciclo di vita in modo da ottenere un indicatore - il CLCC appunto - che rappresenti una misura del grado in cui un prodotto/processo utilizza le risorse naturali.

L'uso delle risorse naturali viene quindi quantificato dal punto di vista fisico con l'analisi LCA e dal punto di vista economico attraverso i prezzi medi di mercato. I prezzi di mercato, infatti, possono essere considerati una misura di scarsità [3] [4], posto che vengano osservati per un periodo di tempo sufficientemente lungo. La misurazione dell'uso delle risorse naturali da parte di un prodotto è molto importante per sviluppare e mettere in atto politiche finalizzate alla promozione dello sviluppo sostenibile.

Il prezzo di mercato incorpora informazioni sia sulla domanda attuale che, seppur parzialmente, sulle aspettative degli operatori economici riguardo la domanda futura e, quindi, corrisponde appieno all'identikit della "perfetta" misura di scarsità delle risorse naturali fornita da Fischer [5]:

Una misura di scarsità deve essere caratterizzata da una proprietà essenziale: deve essere in grado di sintetizzare tutti i sacrifici – diretti e indiretti – sostenuti per realizzare un'unità della risorsa.

La definizione non fa riferimento solamente al lato dell'offerta, come potrebbe sembrare da una prima lettura. Infatti, i sacrifici "sostenuti" implicano anche la disponibilità a pagare, che è un fattore legato alla domanda; mentre i "costi indiretti" possono essere interpretati come il mancato consumo futuro, conseguenza del consumo presente. Sempre Fischer [5] evidenzia come i costi di estrazione non comprendono questa componente indiretta e che i prezzi di mercato dovrebbero essere preferiti come misura della scarsità di una risorsa anche perché legati, perlomeno nel medio termine, alle scorte.

Per questi motivi, l'indicatore CLCC è stato costruito sulla base prezzi di mercato delle materie prime impiegate nel corso del ciclo di vita dei prodotti e processi oggetto di valutazione. Il punto di partenza è l'indicatore LCA *Mineral and Fossil and Renewable Resource Depletion* dell'*International Reference Life Cycle Data System (ILCD)* [6] anche se poi l'elenco è stato esteso a tutti i flussi di materiali ed energia presenti negli inventari del database Ecoinvent così come implementato software SimaPro 3.9. Per ciascun flusso di materiale o energia è stato identificato il corrispondente prezzo di mercato utilizzando unicamente fonti dati a libero accesso (*open source*).

Per facilitare la lettura dei risultati, i flussi di materiali SimaPro sono stati raggruppati in categorie più ampie (es. spodumene e litio metallico entrano entrambi a far parte della macrocategoria "litio").

Maggiori informazioni sull'indicatore sono disponibili in Mela et al. [7] e [8].

2 Analisi degli impatti economici

In questo paragrafo si riportano i valori dell'indicatore CLCC ottenuti per le due tipologie di celle. Come visibile in Tabella 1, emerge una forte differenza nei valori dell'indicatore e quindi nell'uso delle risorse da parte delle due alternative. L'indicatore calcolato per la cella InGaP/GaAs è infatti oltre tre volte più elevato di quello calcolato per la InGaP/Si. La differenza risiede totalmente nel processo MOCVD, e in particolare nel diverso tipo di substrato, in quanto i materiali utilizzati per la fabbricazione delle celle sono identici.

Tabella 1 Valore del Commodity life cycle cost per fasi di produzione delle celle InGaP/GaAs e InGaP/Si (CLCC aggiornamento 2024, U.F 1 kWp)

Fase di produzione	CLCC InGaP/GaAs	CLCC InGaP/Si	Variazione percentuale rispetto a InGaP/GaAs
Processo MOCVD	20700€	1570€	-92.4%
Fabbricazione celle	6260€	6260€	0%
Totale	26960€	7830€	-71.0%

Dall'analisi dei contributi della cella InGaP/GaAs, riportata in Figura 1, si nota come circa il 60% del valore dell'indicatore CLCC è rappresentato dal gallio, seguito da materiali come l'oro e il rame (da cui si estrae l'arsenico). Contributi inferiori al 10% sono dati da risorse energetiche fossili quali gas naturale, petrolio bituminoso e carbone, utilizzati per la produzione dei mix energetici.

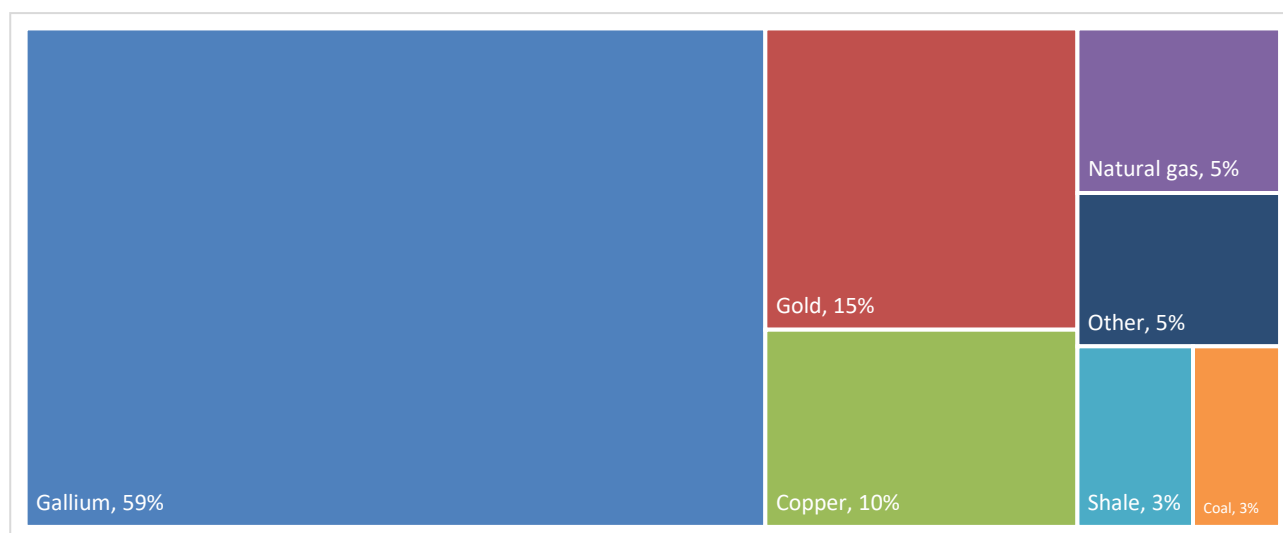


Figura 1 Analisi dei contributi sul CLCC della cella InGaP/GaAs (U.F. 1 kWp, cut off 5%)

Il quadro è completamente diverso nel caso della cella InGaP/Si (Figura 2), per la quale l'oro rappresenta il materiale che concorre maggiormente alla composizione dell'indicatore (52%), seguito dalle risorse energetiche (fossili e biogeniche) utilizzate per la produzione di energia elettrica e altri materiali (fosforo e argento).

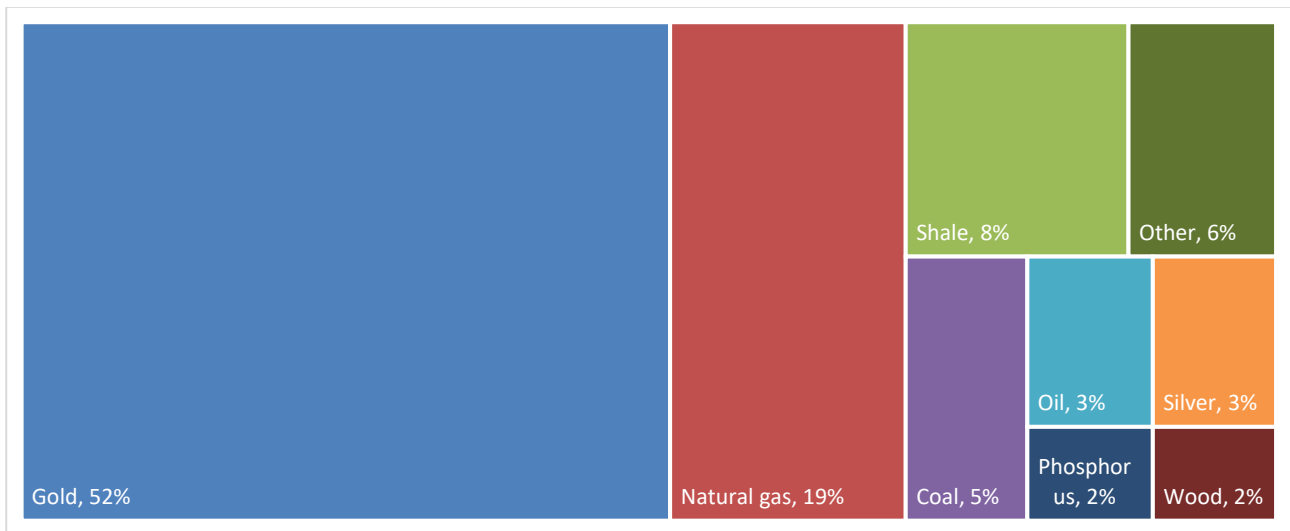


Figura 2 Analisi dei contributi sul CLCC della cella InGaP/Si (U.F. 1 kWp, cut off 5%)

In Figura 3 si riporta l'analisi di sensitività relativa all'indicatore CLCC, considerando la variazione dell'efficienza della cella InGaP/Si, e il confronto con l'indicatore relativo alla cella InGaP/GaAs con efficienza al 38%. Si osserva come un'efficienza inferiore al 15% della cella InGaP/Si porti ad un aumento dell'indicatore, rispetto alla cella accresciuta su GaAs.

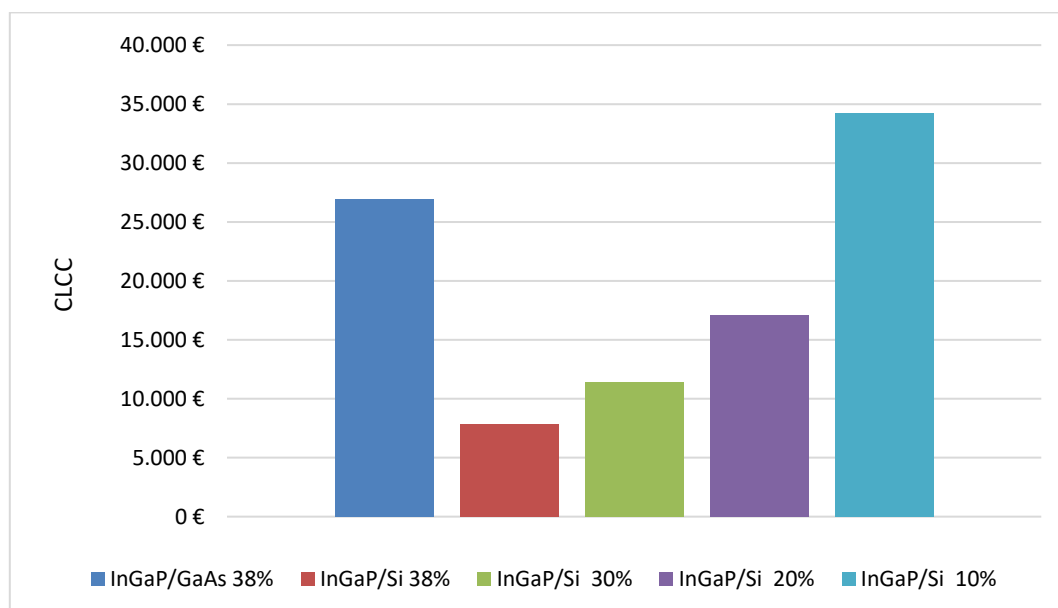


Figura 3 Confronto tra i valori di CLCC al variare dell'efficienza della cella InGaP/Si.

3 Conclusioni

In questo report sono stati presentati i risultati della LCA comparativa, del tipo “from cradle to gate”, di due prototipi di celle InGaP accresciute su silicio monocristallino e su gallio arseniuro, destinate ad applicazioni su concentratori solari luminescenti.

I risultati ottenuti dimostrano che, in termini di Commodity Life Cycle Cost, tenendo conto della scarsità presente e futura delle risorse utilizzate (approssimata col prezzo di mercato), le due alternative sono contraddistinte da valori molto diversi. L'indicatore calcolato per la cella InGaP/GaAs è infatti di circa tre volte più elevato di quello calcolato per la cella InGaP/Si. Questa differenza deriva dalla presenza del gallio nel substrato della cella InGaP/GaAs e assente nella cella InGaP/Si. In quest'ultima, anche nel CLCC, l'oro dei contatti costituisce la fonte principale dell'impatto.

Dal confronto degli impatti del prototipo di InGaP/Si ad efficienze inferiori al 38%, con la cella InGaP/GaAs con efficienza al 38%, si può concludere che, nonostante sia presente un vantaggio rilevante in termini di CLCC anche ad una efficienza del 20%, ciò non è verificato anche in termini di impatto ambientale, come riportato nel report “Sviluppo di un prototipo di cella InGaP/Si ed analisi dei benefici ambientali” [1], a cui si rimanda per una descrizione dettagliata dei potenziali impatti ambientali delle due tecnologie.

4 Bibliografia

- [1] S. Spagnolo, G. Mela, P. Girardi e G. Abagnale, «Sviluppo di un prototipo di cella InGaP/Si ed analisi dei benefici ambientali,» Report Mission Innovation 2021-2024. Progetto IEMAP, 2024.
- [2] H. Wilting e A. Hanemaaijer, «Share of Raw Material Costs in Total Production Costs,» The Hague, the Netherlands, 2014.
- [3] K. V. Smith, A cura di, Scarcity and Growth Reconsidered, New York - London: Resource for the Future, 2011.
- [4] J. Popp, J. Oláh, M. F. Fekete, Z. Lakner e D. Máté, «The Relationship between Prices of Various Metals, Oil and Scarcity,» *Energies*, vol. 11, September 2018.
- [5] A. C. Fischer, «Measures of Natural Resource Scarcity,» in *Scarcity and Growth Reconsidered*, vol. 8, New York, NY, USA; London, UK, Resources for the Future, 1979, p. 249–275.
- [6] Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, «ILCD Handbook - International Reference Life Cycle Data System,» Brussels, 2010.
- [7] G. Mela, M. L. Carvalho, A. Temporelli e P. Girardi, «The Commodity Life Cycle Costing Indicator. An Economic Measure of Natural Resource Use in the Life Cycle,» *Sustainability*, vol. 13, p. 4870, January 2021.
- [8] M. L. Carvalho, M. A. Cusenza, G. Mela e A. Temporelli, «LCA a Supporto Dello Sviluppo Di Batterie al Sodio,» Milan, 2023.
- [9] S. Fazio, V. Castellani, S. Sala, E. Schau, M. Secchi e L. Zampori, «Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment method. New models and differences with ILCD,» JRC Technical Reports, 2018.
- [10] L. Zampori e R. Pant, «Product Environmental Footprint (PEF) method,» EUR 29682 EN, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, Lussemburgo, 2019.
- [11] Umweltbundesamt, «ProBas,» [Online]. Available: www.probas.umweltbundesamt.de. [Consultato il giorno 15 12 2023].
- [12] B. L. Smith, «Development and Life Cycle Assessment of Advanced-Concept III-V Multijunction Photovoltaics,» Rochester Institute of Technology, 2018.
- [13] Organic Syntheses, Inc., «A Publication of Reliable Methods for the Preparation of Organic Compounds,» [Online]. Available: <https://orgsyn.org/Result.aspx?ga=na>. [Consultato il giorno 15 12 2023].
- [14] ISO - The International Organization for Standardization, *ISO 14040:2006/Amd 1:2020: Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework - Amendment 1*, 2020.
- [15] ISO - The International Organization for Standardization, *ISO 14044:2006/Amd 2:2020: Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines - Amendment 2*, 2020.
- [16] A. Meijer, M. A. J. Huijbregts e L. Reijnders, «Life-cycle assessment of photovoltaic modules: Comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-Si solar modules,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, pp. 275-287, 2003.
- [17] N. J. Mohr, J. J. Schermer, M. A. J. Huijbregts, A. Meijer e L. Reijnders, «Life Cycle Assessment of Thinfilm GaAs and GaInP/GaAs,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 15, p. 163–179, 2007.
- [18] N. J. Mohr, A. Meijer, M. A. J. Huijbregts e L. Reijnders, «Environmental impact of thin-film GaInP/GaAs and multicrystalline silicon solar modules produced with solar electricity,» *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 14, n. 3, pp. 225-235, 2009.

- [19] C. F. Blanco, S. Cucurachi, F. Dimroth, J. B. Guinée, W. J. G. M. Peijnenburg e M. G. Vijver, «Environmental impacts of III-V/silicon photovoltaics: Life cycle assessment and guidance for sustainable manufacturing,» *Energy and Environmental Science*, vol. 13, n. 11, p. 4280–4290, 2020.
- [20] G. Pallas, M. G. Vijver, W. J. G. M. Peijnenburg e J. Guinée, «x ante life cycle assessment of GaAs/Si nanowire-based tandem solar cells: a benchmark for industrialization,» *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, pp. 1767-1782, 2020.
- [21] G. Pallas, M. G. Vijver, W. J. G. M. Peijnenburg e J. Guinée, «Life cycle assessment of emerging technologies at the lab scale: The case of nanowire-based solar cells.,» *Journal of Industrial Ecology*, vol. 24, n. 1, pp. 193-204, 2020.
- [22] N. Aste, L. Tagliabue, C. Del Pero, D. Testa e R. Fusco, «Performance analysis of a large-area luminescent solar concentrator module,» *Renewable Energy*, pp. 330-337, Aprile 2015.
- [23] B. L. Smith, A. Sekar, H. Mirlet, G. Heath e R. Margolis, «An Updated Life Cycle Assessment of Utility-Scale Solar Photovoltaic Systems Installed in the United States, NREL/TP-7A40-87372,» Golden, CO, 2024.
- [24] «QS Study,» [Online]. Available: <https://qsstudy.com/dimethyl-telluride/>.

Abbreviazioni ed acronimi

LSC	Luminescent Solar Concentrator
LCA	Life Cycle Assessment
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Phase Deposition
ELO	Epitaxy Lift-Off
HCPV	High Concentration Photovoltaic
VGF	Vertical Gradient Freeze
GNI	Global Normal Irradiance
TMAI	Trimetilalluminio
TMGa	Trimetilgallio
TMIn	Trimetilindio
DEZn	Dietilzinco
DETe	Dietiltellurio