



**MISSION
INNOVATION**

accelerating the clean energy revolution

POA MATERIALI AVANZATI PER L'ENERGIA

**PROGETTO IEMAP - Piattaforma Italiana Accelerata per i Materiali per
l'Energia**

D4.16 - Analisi LCA impatto ambientale di un prototipo di cella InGaP/Si

Sofia Spagnolo, Giulio Mela, Pierpaolo Girardi, Giovanni Abagnale

D4.16 - Analisi LCA dell'impatto ambientale di un prototipo di cella InGaP/Si

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
1 INTRODUZIONE	6
2 ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI DI CELLE INGAP/SI E INGAP/GAAS.....	8
2.1 SCOPO DELL'ANALISI	8
2.2 CAMPO DI APPLICAZIONE	8
2.2.1 Unità funzionale	8
2.2.2 Confini del sistema.....	9
2.2.3 Procedure di allocazione.....	12
2.2.4 Metodo di valutazione dell'impatto ambientale	12
2.2.5 Criterio di cut-off.....	13
2.2.6 Requisiti di qualità dei dati	13
2.2.7 Assunzioni	14
2.2.8 Limitazioni	14
2.3 ANALISI DI INVENTARIO DEL CICLO DI VITA (LCI).....	14
2.3.1 Produzione delle celle InGaP.....	14
2.4 TRATTAMENTO FILTRI DEL REATTORE MOCVD	19
2.5 CARATTERISTICHE ELETTRICHE CELLA	19
2.6 MODELLAZIONE DI PROCESSI E MATERIALI	19
3 ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI.....	22
4 INTERPRETAZIONE	24
4.1 CLIMATE CHANGE	24
4.2 RESOURCE USE, MINERALS AND METALS.....	27
4.3 ANALISI DI SENSITIVITÀ	28
5 CONCLUSIONI.....	30
6 BIBLIOGRAFIA.....	31
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	33
APPENDICE I.....	34
ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI ESTESA	34
APPENDICE II.....	38
6.1 WAFER GAAS.....	38
6.2 TMAL (TRIMETILALLUMINIO)	42
6.3 TMGA (TRIMETILGALLIO).....	43
6.4 TMIn (TRIMETILINDIO)	44
6.5 DEZn (DIETILZINCO)	44
6.6 DETe (DIETILTELLURIO)	44
6.7 TA ₂ O ₅ (PENTOSSIDO DI TANTALIO).....	45

Lista figure

Figura 1: Diagramma di flusso del processo produttivo delle celle InGaP/GaAs.

Figura 2: Diagramma di flusso del processo produttivo delle celle InGaP/Si.

Figura 4: Confronto tra gli impatti ambientali delle celle InGaP/GaAs e InGaP/Si

Figura 5: Contributi sul Climate Change della costruzione della cella InGaP/GaAs (U.F 1 kWp)

Figura 6: Grafico Sankey relativo ai contributi delle fasi del ciclo di vita della cella InGaP/GaAs sulla categoria Climate Change (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati, cut-off 5%).

Figura 7: Contributi sul Climate Change della costruzione della cella InGaP/Si (U.F 1 kWp)

Figura 8: Grafico Sankey relativo ai contributi delle fasi del ciclo di vita della cella InGaP/Si sulla categoria Climate Change (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati, cut-off 5%).

Figura 9: Grafico Sankey relativi ai contributi delle fasi del ciclo di vita delle celle InGaP/GaAs (sinistra) e InGaP/Si (destra) sulla categoria Resource use, minerals and metals (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati, cut-off 5%).

Figura 10: Confronto degli impatti sul Climate Change al variare dell'efficienza della cella InGaP/Si (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati).

Figura 11: Confronto degli impatti su Resource use, minerals and metals, al variare dell'efficienza della cella InGaP/Si (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati).

Figura 12: Contributo delle fasi produttive delle celle InGaP/GaAs sulle categorie di impatto ambientale (impatti caratterizzati, metodo EF 3.1 v1.00, UF 1 kWp)

Figura 13: Contributo delle fasi produttive delle celle InGaP/Si sulle categorie di impatto ambientale (impatti caratterizzati, metodo EF 3.1 v1.00, UF 1 kWp)

Sommario

In questo documento viene riportata l'analisi comparativa dei potenziali impatti ambientali 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 la metodologia Life Cycle Assessment (LCA) e il metodo di calcolo Environmental Footprint (EF) allo scopo di valutare gli effettivi benefici ambientali 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 Climate Change inferiori alle celle InGaP/GaAs. Questa differenza è dovuta principalmente all'impatto della produzione dei wafer in GaAs. La differenza dei potenziali impatti sull'uso di risorse minerali e metalli risulta invece trascurabile, in quanto dipendente dall'utilizzo dell'oro per la costruzione dei contatti delle celle.

Nel caso di efficienze della cella InGaP/Si inferiori a quella della cella InGaP/GaAs, per ottenere vantaggi in termini di impatto ambientale è necessario considerare l'utilizzo di metalli diversi dall'oro per i contatti e ridurre i consumi energetici necessari alla crescita e fabbricazione delle celle.

1 Introduzione

In questo documento si riportano le analisi dei potenziali impatti ambientali 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). Gli impatti ambientali della produzione delle celle InGaP/m-Si, quantificati tramite la metodologia Life Cycle Assessment (LCA), vengono confrontati con gli impatti delle celle InGaP realizzate su substrato in arseniuro di gallio (InGaP/GaAs) allo scopo di valutare gli effettivi benefici ambientali derivanti della sostituzione del substrato di crescita.

Diversi articoli scientifici riportano analisi LCA relative alla produzione di celle multigiunzione costituite da elementi appartenenti ai gruppi III e V della tavola periodica, caratterizzate dallo stesso processo di crescita delle celle analizzate nel presente studio (Metal Organic Chemical Vapor Phase Deposition, MOCVD). Variazioni sono presenti in termini di numero di giunzioni, la rimozione o meno del substrato di crescita, il suo eventuale riutilizzo e l'eventuale accoppiamento meccanico su wafer in silicio.

La maggior parte degli studi citati utilizzano come unità funzionale di riferimento per la quantificazione degli impatti la superficie di modulo necessaria per avere 1 kWp, mentre vengono utilizzati differenti metodi di valutazione dell'impatto ambientale e di rappresentazione dei risultati. I primi studi LCA trovati in letteratura sono stati pubblicati tra i 15 e i 20 anni fa, risultando quindi difficilmente rappresentativi della situazione tecnologica attuale. Si riportano comunque per un confronto con gli studi più recenti.

In Meijer et al. (2003) [1] gli impatti ambientali della produzione di moduli costituiti da celle tandem formate da un film sottile InGaP accresciuto su substrato in GaAs da 2" di diametro e 350 µm di spessore, rimosso tramite epitaxy lift-off (ELO) e accoppiato meccanicamente su un wafer in silicio policristallino (InGaP/p-Si) sono stati confrontati con gli impatti della produzione di moduli costituiti da film sottili InGaP e moduli in p-Si. Mohr et al. (2007) [2] riportano gli impatti ambientali di film sottili InGaP/GaAs e film sottili GaAs accresciuti su wafer in GaAs da 2" di diametro e 350 µm di spessore (successivamente rimossi), confrontati con gli impatti di celle in p-Si. In un successivo articolo del 2009 gli stessi autori [3] hanno valutato l'effetto, sugli impatti ambientali, dell'utilizzo di energia rinnovabile nella produzione delle celle, generata da sistemi fotovoltaici costituiti dalle stesse celle analizzate.

In questi studi vengono riportati gli impatti ambientali normalizzati utilizzando il metodo CML 2 baseline 2000. Le celle del gruppo III-V risultano avere un impatto ambientale complessivamente maggiore rispetto alle più diffuse celle in silicio, principalmente a causa dei consumi energetici del processo MOCVD utilizzato per la loro produzione. Le celle tandem InGaP/p-Si (con strati accoppiati meccanicamente) risultano avere impatti inferiori rispetto alle celle costituite dal singolo strato InGaP, grazie alla maggiore efficienza di conversione dell'energia solare che permette di ridurre la superficie richiesta per generare la stessa energia delle celle InGaP.

Più recentemente, nel 2018, Smith [4] riporta un'analisi approfondita sullo sviluppo di quattro tipologie di celle fotovoltaiche multigiunzione III-V (da 3 a 6 giunzioni), applicate ad un sistema fotovoltaico ad alta concentrazione (HCPV), utilizzando substrati di diverso materiale (Ge, InP e GaAs). La fase di produzione delle celle III-V rappresenta al massimo il 5% della richiesta energetica totale lungo il ciclo di vita (Cumulative Energy Demand, CED) dei sistemi HCPV, che risultano comunque avere impatti superiori a quelli di sistemi con celle in silicio monocristallino. In tutto il ciclo di vita dei sistemi HCPV risulta essere predominante l'impatto di acciaio e alluminio per la costruzione dei moduli e del tracker e dell'energia necessaria alla loro movimentazione.

Prendendo in considerazione solo la fase di costruzione delle celle, l'analisi LCA rileva come la fase più impattante in termini di CED sia la produzione dei substrati. Si evidenzia che gli impatti dei substrati GaAs di Smith non siano direttamente comparabili con quelli riportati in [1], [2] e [3] in quanto di dimensione e spessore superiori (6" di diametro e 625 µm di spessore). Inoltre, in questi studi meno recenti, la produzione dei wafer GaAs è stata stimata a partire dai consumi energetici del processo per la produzione di wafer in

silicio Liquid Encapsulated Czochralski (LEC), mentre in Smith viene utilizzato un inventario dettagliato della loro produzione tramite la più recente tecnologia del Vertical Gradient Freeze (VGF).

Il numero di riutilizzi del substrato viene riportato da tutti gli studi citati come elemento fondamentale per rendere meno impattante il processo produttivo delle celle III-V. Viene inoltre consigliata la sostituzione dei wafer GaAs con altri materiali con impatti ambientali inferiori, come il germanio [4].

Blanco et al. [5] presentano un'analisi LCA comparativa di due tipologie di celle multigiunzione III-V costruite tramite crescita diretta su substrato in silicio monocristallino o crescita su substrato in GaAs da 550 μm , ELO, pulizia del substrato e successivo accoppiamento meccanico su cella in silicio monocristallino. Le performance ambientali dei sistemi con celle III-V risultano essere migliori delle celle in silicio monocristallino per tutte le categorie di impatto considerate, a parte per la radiazione ionizzante, in cui risultano peggiori, e per l'esaurimento delle risorse minerali, fossili e rinnovabili in cui la cella prodotta su substrato in GaAs risulta più impattante. Considerando la categoria Climate Change il processo MOCVD risulta essere la fase più impattante del processo produttivo, seguita dalla produzione del wafer in silicio. Questo studio sembra non considerare la produzione del wafer in GaAs utilizzato come substrato, ma solo il processo ELO e la pulizia pre-riutilizzo del substrato, probabilmente a causa dell'elevato numero di riutilizzi stimato (100).

Nonostante si tratti di celle diverse tra loro, costituite da stratificazioni differenti di elementi dei gruppi III-V, con conseguente differente quantità utilizzata di precursori, questo dato non risulta essere rilevante in termini di impatto ambientale. Il maggior contributo agli impatti risulta essere principalmente l'energia richiesta del processo MOCVD e la produzione dei substrati del tipo III-V, qualora non sia previsto un elevato numero di riutilizzi.

Recenti studi riportano analisi LCA di tecnologie più innovative quali le celle a nanofili di elementi del gruppo III-V. Pallas et al. [6] analizzano gli impatti di moduli costituiti da celle tandem con nanofili InGaP accresciuti su substrato in Si e nanofili InP su substrato InP, sua rimozione e accoppiamento meccanico su cella in Si monocristallino [6]. In uno studio successivo Pallas et al. hanno riportato una LCA ex ante di celle con nanofili GaAs su substrato in Si o GaAs, successivamente rimosso, e accoppiamento su cella in Si monocristallino [7], considerando la loro produzione a scala industriale. In questo studio il substrato in GaAs è stato modellato a partire dai dati di Smith et al. [4]. Le celle a nanofili analizzate risultano avere impatti inferiori delle celle in silicio, a parte per l'Ozone depletion, a causa del gas CHF_3 usato per l'etching delle celle. Il substrato in GaAs contribuisce per circa il 12% del CED. Anche in questo studio viene indicato il riutilizzo del substrato in GaAs come fondamentale per la riduzione dell'impatto complessivo della produzione delle celle.

È necessario evidenziare che gli studi citati risultano difficilmente comparabili tra loro a causa dei diversi metodi di valutazione degli impatti ambientali, della rappresentazione dei risultati, dei diversi confini del sistema e del campo di applicazione delle celle.

L'analisi riportata in questo documento permette di integrare le informazioni presenti in letteratura riguardo gli impatti ambientali delle celle III-V accresciute su wafer in silicio monocristallino, rispetto alle celle accresciute su wafer in GaAs, rispondendo alla necessità di valutare i vantaggi non solo tecnologici, ma anche ambientali, della sostituzione del substrato in GaAs.

2 Analisi degli impatti ambientali di celle InGaP/Si e InGaP/GaAs

2.1 Scopo dell'analisi

Lo scopo della presente analisi LCA è quello di comparare i potenziali impatti ambientali di un prototipo di cella fotovoltaica InGaP/m-Si con gli impatti di una cella fotovoltaica di tipo InGaP/GaAs, e di identificare i processi più impattanti del ciclo di vita delle celle analizzate.

Questa analisi affianca il percorso di ricerca e sviluppo di celle InGaP/m-Si per l'applicazione a concentratori solari luminescenti, allo scopo di valutare i potenziali benefici ambientali ed economici legati all'utilizzo di questa tipologia di celle, rispetto alle celle con substrato in GaAs.

L'analisi è stata svolta seguendo le indicazioni degli standard ISO 14040:2006/Amd 1:2020 [8] e ISO 14044:2006/Amd 2:2020 [9].

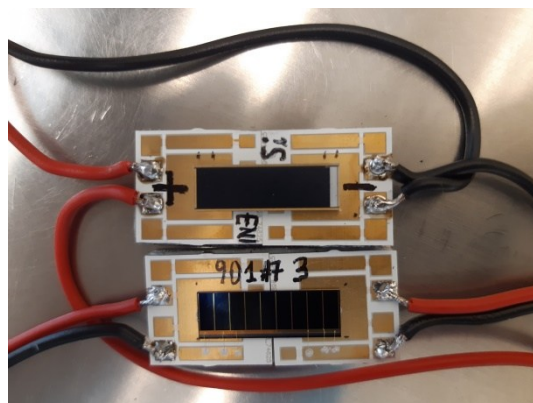
2.2 Campo di applicazione

Secondo le norme ISO 14040 e ISO 14044, il campo di applicazione dell'analisi deve includere nel dettaglio tutte le caratteristiche del sistema da analizzare, tra cui:

- Unità funzionale;
- Confini del sistema;
- Metodo di valutazione dell'impatto ambientale
- Criterio di cut-off
- Procedure di allocazione;
- Requisiti di qualità dei dati
- Assunzioni;
- Limitazioni.

2.2.1 Unità funzionale

L'unità funzionale selezionata per l'analisi è 1 kW di potenza di picco di un sistema LSC-PV. Il flusso di riferimento è rappresentato dal numero di celle InGaP applicate al bordo di un concentratore solare luminescente, di dimensioni 50x50 cm, necessarie per ottenere 1 kWp. Sono state considerate due tipologie di celle: InGaP/GaAs e InGaP/m-Si.



2.2.2 Confini del sistema

L'analisi LCA riportata è del tipo "cradle to gate" ed include le fasi di estrazione delle materie prime, loro trasporto, lavorazione, produzione dei componenti, processo di produzione delle celle in laboratorio, presso la sede RSE di Piacenza. La produzione del modulo LSC, dei componenti necessari all'installazione della cella sui moduli e la manutenzione necessaria in fase d'uso non sono stati inclusi in quanto identici per entrambe le celle analizzate. Non è stata inclusa la fase di fine vita in quanto di impatto trascurabile rispetto all'impatto complessivo del ciclo di vita. Le unità di processo considerate all'interno dei confini del sistema sono riportate nel diagramma di flusso in Figura 1.

Nel dettaglio, i processi inclusi nell'analisi sono:

Processi Upstream:

- Estrazione e lavorazione delle materie prime;
- Trasporto materie prime ai fornitori;
- Produzione sostanze chimiche e materiali usati nel processo di produzione delle celle;
- Produzione vettori energetici.

Processi Core

- Consumi di energia elettrica;
- Consumo di materiali e sostanze chimiche;
- Consumi di acqua di processo;
- Trattamento delle emissioni di processo;
- Trattamento rifiuti e acque reflue di processo.

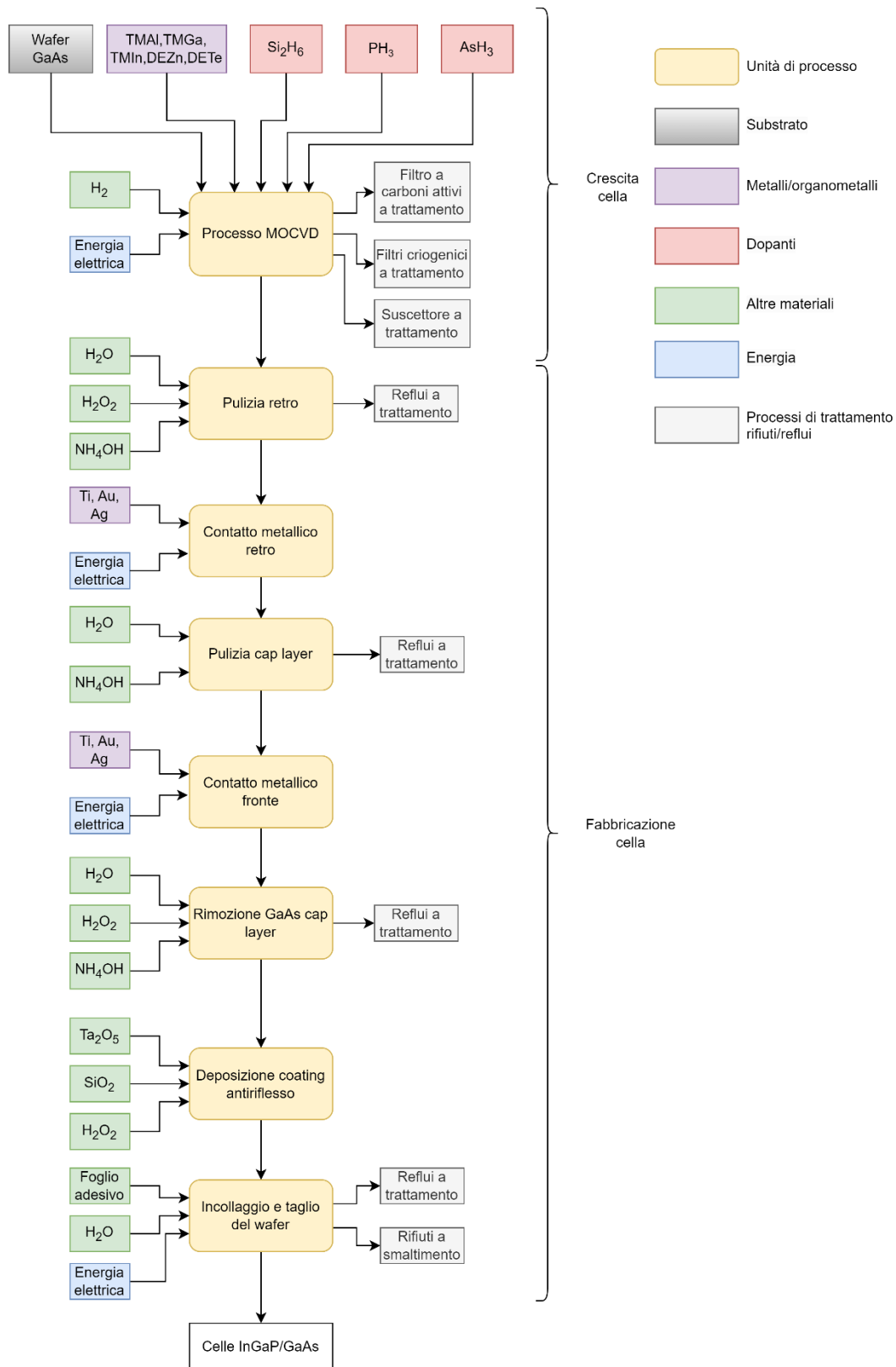


Figura 1 Diagramma di flusso del processo produttivo delle celle InGaP/GaAs.

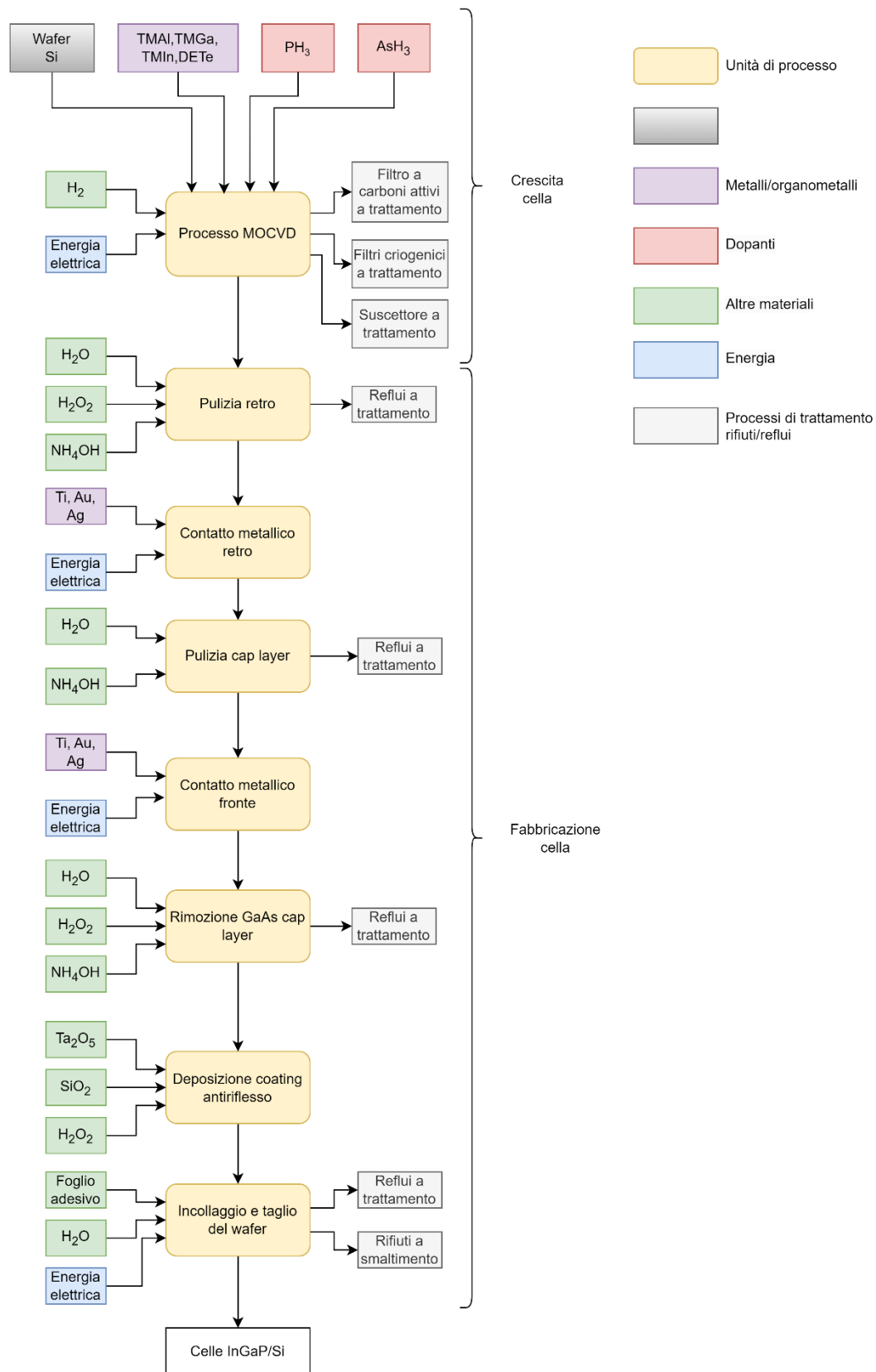


Figura 2 Diagramma di flusso del processo produttivo delle celle InGaP/Si.

2.2.3 Procedure di allocazione

La necessità di allocare i flussi in ingresso e in uscita di un sistema prodotto può emergere in due casi:

- nel caso della presenza, all'interno del sistema produttivo, di più prodotti o co-prodotti (chiamata *"co-product allocation"*);
- nel caso di materiali che entrano in un processo di riciclo (chiamata *"end of life allocation"* o *"allocation procedure of reuse, recycling, recovery"*).

Nel caso in esame non sono presenti co-prodotti, per cui non è stato necessario adottare il primo tipo di allocazione. Riguardo l'allocazione dei materiali destinati a riciclo si è adottato il principio del cut-off, per cui tutti gli impatti di eventuali processi di riciclo sono assegnati al sistema produttivo successivo.

2.2.4 Metodo di valutazione dell'impatto ambientale

I potenziali impatti ambientali sono stati calcolati utilizzando il metodo di valutazione degli impatti *Environmental Footprint (EF)* [10] [11] versione 3.1 (adapted for SimaPro substances), sviluppato dal Joint Research Centre della Commissione Europea e incluso nel software per l'analisi LCA SimaPro 9.5.

Il metodo EF comprende sedici categorie di impatto sull'ambiente, sulla salute umana e sull'esaurimento delle risorse (Tabella 1), che consentono di valutare un ampio spettro di problematiche potenzialmente causate dal processo analizzato.

Nel presente studio sono state considerate le categorie di impatto suggerite dalle linee guida del JRC [17], con livello di robustezza I e II, ad eccezione della categoria "Radiazioni ionizzanti" che viene trascurata in quanto non rilevante per il settore fotovoltaico. Sono state inoltre considerate le categorie con livello di robustezza III: "Uso delle risorse minerali e metalli" e "Uso delle risorse fossili", in quanto rilevanti per il settore energetico.

Nel capitolo "Analisi degli impatti ambientali" sono riportati i risultati per tutte queste categorie di impatto, mentre nel capitolo di Interpretazione dei risultati saranno analizzate le categorie ritenute più rilevanti nel settore fotovoltaico, ovvero "Cambiamento climatico" e "Uso delle risorse minerali e metalli".

Tabella 1 Categorie di impatto ambientale, indicatori e modelli di caratterizzazione del metodo EF v 3.1.

Categoria d'impatto EF	Indicatore della categoria di impatto	Unità	Modello di caratterizzazione	Robustezza
Cambiamenti climatici, totale	Potenziale di riscaldamento globale (GWP100)	kg di CO ₂ eq	Modello di Berna - Potenziali di riscaldamento globale (GWP) in un arco temporale di 100 anni (sulla base di IPCC 2021) (Forster et al., 2021)	I
Riduzione dello strato di ozono	Potenziale di riduzione dell'ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	Modello EDIP basato sui potenziali di riduzione dello strato di ozono dell'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM) in un arco di tempo infinito (OMM 2014 + integrazioni)	I
Tossicità per gli esseri umani - effetti cancerogeni	Unità tossica comparativa per gli esseri umani (CTUh)	CTUh	Sulla base del modello USEtox2.1 (Fantke et al. 2017), adattato come in Saouter et al., 2018	III
Tossicità per gli esseri umani - effetti non cancerogeni	Unità tossica comparativa per gli esseri umani (CTUh)	CTUh	Sulla base del modello USEtox2.1 (Fantke et al. 2017), adattato come in Saouter et al., 2018	III
Particolato	Impatto sulla salute umana	Incidenza delle malattie	Modello PM (Fantke et al., 2016 in UNEP 2016)	I

Radiazione ionizzante, salute umana	Efficienza dell'esposizione umana all'U235	kBq U235 eq	Modello degli effetti sulla salute umana elaborato da Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al., 2000)	II
Formazione di ozono fotochimico, salute umana	Aumento della concentrazione di ozono troposferico	kg NMVOC eq	Modello LOTOS-EUROS (Van Zelm et al., 2008) applicato in ReCiPe 2008	II
Acidificazione	Superamento accumulato	moli di H+ eq	Superamento accumulato (Seppälä et al., 2006, Posch et al. 2008)	II
Eutrofizzazione, terrestre	Superamento accumulato	moli di N eq	Superamento accumulato (Seppälä et al., 2006, Posch et al. 2008)	II
Eutrofizzazione, acque dolci	Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque dolci (P)	kg P eq	Modello EUTREND (Struijs et al., 2009) applicato in ReCiPe 2008	II
Eutrofizzazione, marina	Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque marine (N)	kg N eq	Modello EUTREND (Struijs et al., 2009) applicato in ReCiPe 2008	II
Ecotossicità, acque dolci	Unità tossica comparativa per gli ecosistemi (CTUe)	CTUe	Sulla base del modello USEtox2.1 (Fantke et al. 2017), adattato come in Saouter et al., 2018	III
Uso del suolo	Indice di qualità del suolo	Valore adimensionale (pt)	Indice di qualità del suolo basato sul modello LANCA (De Laurentiis et al. 2019) e sul fattore di caratterizzazione LANCA versione 2.5 (Horn e Maier, 2018)	III
Uso d'acqua	Potenziale mancanza d'acqua per l'utilizzatore (consumo di acqua ponderato in funzione della mancanza)	m3 acqua equivalente di mancanza d'acqua	Modello Available WATER REMaining (AWARE) (Boulay et al., 2018; UNEP 2016)	III
Uso delle risorse – minerali e metalli	Impoverimento delle risorse abiotiche (ADP riserve finali)	kg Sb eq	van Oers et al., 2002 come nel metodo CML 2002, v.4.8	III
Uso delle risorse – fossili	Impoverimento di risorse abiotiche – combustibili fossili (ADP – fossili)	MJ	van Oers et al., 2002 come nel metodo CML 2002, v.4.8	III

2.2.5 Criterio di cut-off

Il criterio scelto per l'inclusione degli elementi in ingresso e in uscita si basa sulla definizione di un livello di cut-off del 1%, sia in termini di massa, energia e rilevanza ambientale.

2.2.6 Requisiti di qualità dei dati

I dati necessari allo studio sono stati raccolti nel rispetto dei seguenti requisiti di qualità:

- **Copertura temporale:** i dati primari relativi alla produzione delle celle si riferiscono alla produzione delle due celle, a scala di laboratorio, avvenuta nel periodo 2023 e 2024. I dati secondari provenienti da banche dati o letteratura, sono stati selezionati in modo da essere i più recenti possibili;
- **Copertura geografica:** i dati primari relativi alla produzione delle celle sono stati raccolti presso la sede di RSE di Piacenza. I dati secondari sono stati regionalizzati in base alla specifica localizzazione dei processi, se conosciuta (es. provenienza materie prime, produzione vettori energetici);

- **Copertura tecnologica:** i dati primari si riferiscono alle tecnologie effettivamente utilizzate nei processi produttivi considerati; per i dati secondari, se non disponibili nella banca dati utilizzata, sono stati selezionate tecnologie simili, come specificato nel capitolo di analisi dell'inventario;
- **Precisione:** i dati primari fanno riferimento ai consumi puntuali del processo analizzato, ottenuti tramite questionari di raccolta dati, interviste, schede tecniche e di sicurezza e rilevamenti dei consumi energetici di laboratorio;
- **Completezza:** tutte le informazioni e i dati necessari al raggiungimento dello scopo dell'analisi sono stati raccolti e utilizzati. Nel caso di informazioni mancanti sono state fatte delle assunzioni specificate nel capitolo di analisi dell'inventario;
- **Rappresentatività:** i dati utilizzati nel modello LCA sono raccolti direttamente nel sito di produzione e nel periodo di riferimento e si riferiscono alle tecnologie più recenti;
- **Coerenza:** la metodologia dello studio e la tipologia di dati secondari utilizzati sono stati applicati in modo uniforme in tutta l'analisi LCA;
- **Riproducibilità:** la descrizione della metodologia utilizzata per ottenere i risultati è stata riportata dettagliatamente nel presente report in modo tale da consentire la riproducibilità dell'analisi da parte di un praticante indipendente;
- **Fonti dei dati:** Ricerca Sistema Energetico SpA, sede di Piacenza per i dati primari; ecoinvent v3.9 e letteratura per i dati secondari;
- **Incertezza dei risultati:** l'incertezza complessiva associata ai risultati dell'analisi è stata calcolata mediante l'analisi di Montecarlo.

2.2.7 Assunzioni

Si assume che la produzione delle celle InGaP/Si avvenga utilizzando wafer in silicio da 4", al posto dei wafer da 6" utilizzati per la costruzione del prototipo, in modo da rendere coerente il confronto con la produzione delle celle InGaP/GaAs, accresciute su wafer di GaAs da 4". I dati relativi alla fase di crescita nel reattore MOCVD non sono dipendenti dalla dimensione dei wafer. Per la fabbricazione delle celle InGaP/Si sono stati utilizzati gli stessi dati relativi alla fabbricazione delle celle su GaAs.

Si assume che la cella InGaP/Si possa raggiungere un'efficienza pari a quella della cella InGaP/GaAs senza comportare significativi aumenti di consumi energetici e di materiali attualmente impiegati per la costruzione del prototipo.

2.2.8 Limitazioni

I dati utilizzati si riferiscono alla produzione delle celle a scala di laboratorio. Ciò può portare ad una sovrastima nella valutazione dei potenziali impatti ambientali, rispetto ad una più efficiente produzione a scala industriale.

2.3 Analisi di inventario del ciclo di vita (LCI)

2.3.1 Produzione delle celle InGaP

Come riportato in Figura 1, la produzione della cella InGaP prevede otto fasi principali. La prima fase consiste nella deposizione, mediata da un flusso di idrogeno, di composti organometallici quali trimetilalluminio (TMAI), trimetilgallio (TMGa), trimetilindio (TMIn), di idruri come fosfina (PH_3) e arsina (AsH_3) e composti dopanti come dietilzinco (DEZn), dietiltellurio (DETe) e disilano (Si_2H_6). La deposizione avviene tramite il processo (MOCVD) all'interno di un reattore Aixtron 2800G4 R, su substrati costituiti da wafer in GaAs da 4" e 450 μm di spessore (Figura 3) o, nel caso alternativo analizzato, in Si monocristallino da 4" e 381 μm di spessore; le reazioni termochimiche alla base del processo epitassiale, avvengono in un range di temperature comprese tra i 600 - 750°C. Il processo di deposizione su GaAs ha una durata di 3h 20', mentre su Si ha una durata di 6h 15'. Questo modello di reattore ha potenzialmente la capacità di contenere 12 celle da 4" o 7

celle da 6". Per la modellazione degli impatti delle due tipologie di cella in condizioni di pieno carico del reattore è stata considerata una dimensione dei substrati di 4".

I gas residui del processo MOCVD vengono aspirati e trattati da un sistema costituito da trappole criogeniche per la cattura dell'arsina e fosfina, ed un filtro a carboni attivi in grado di trattenere i residui di arsina, fosfina e metallorganici non reagiti.

Terminata la deposizione degli strati semiconduttori si procede alla valutazione della qualità del materiale cresciuto ed alla loro caratterizzazione. Successivamente avviene la pulizia del retro del dispositivo tramite perossido di idrogeno al 40% (H_2O_2), acqua e idrossido di ammonio al 40% (NH_4OH) e la deposizione dei contatti metallici del retro in oro, titanio e argento tramite maschera a contatto diretto. Segue la pulizia del cap layer con acqua e NH_4OH e la deposizione dei contatti metallici sul lato frontale. Terminata la deposizione dei contatti si procede con la rimozione del cap-layer di GaAs con acqua, H_2O_2 e NH_4OH .

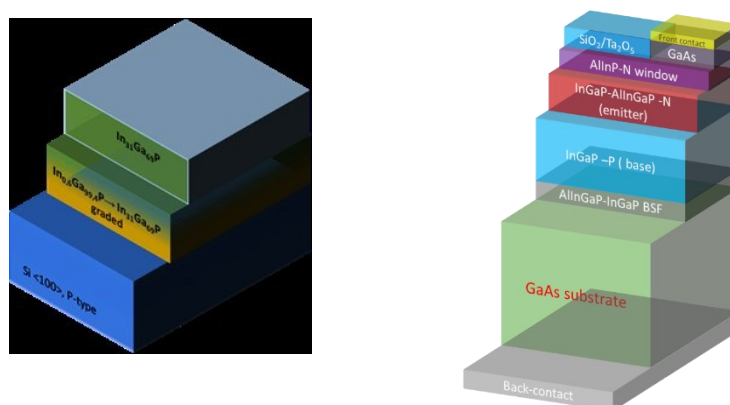


Figura 3 Modelli tridimensionali delle celle InGaP/Si (sinistra) e InGaP/GaAs (destra).

La fase successiva consiste nella deposizione dello strato antiriflesso costituito da pentossido di tantalio (Ta_2O_5) e biossido di silicio (SiO_2) con utilizzo di H_2O_2 . Il dispositivo così ottenuto viene incollato su un foglio in PVC e tagliato tramite una sega diamantata in celle di dimensioni 22 mm x 6 mm.

In Tabella 2 e Tabella 3 sono riportate le caratteristiche fisiche ed elettriche delle celle finite. Si assume che il prototipo di cella su silicio abbia una efficienza pari a quella della cella su GaAs.

Tabella 2 Caratteristiche della cella InGaP/GaAs

Caratteristica	Quantità	Unità di misura
Dimensione	22x6	mm
Spessore totale	451.2	μm
Spessore substrato GaAs	450	μm
Area totale	146.5	mm^2
Area attiva	128.4	mm^2
Peso totale	0.352	g
Peso materiale depositato	0.373	mg
Potenza della cella applicata all'LSC, misurata in condizioni outdoor (GNI = 915 W/m^2)	0.040	W
Potenza di picco della cella applicata all'LSC, calcolata in condizioni standard (GNI = 1000 W/m^2)	0.0437	Wp

Tabella 3 Caratteristiche della cella InGaP/Si

Caratteristica	Quantità	Unità di misura
Dimensione	22x6	mm
Spessore totale	382.2	μm
Spessore substrato m-Si	381	μm
Area totale	146,5	mm ²
Area attiva	128,4	mm ²
Peso totale	0.130	g
Peso materiale depositato	0.074	mg

In Tabella 4 e Tabella 5 sono riportati i consumi di materiali ed energia relativi al processo MOCVD, rispettivamente su substrato in GaAs e in Si.

In Tabella 6 sono riportati i consumi relativi al processo di fabbricazione delle celle InGaP/GaAs, identici a quelli per la fabbricazione delle celle InGaP/Si.

Tabella 4 Dati di inventario per la produzione delle celle InGaP/GaAs. Processo MOCVD.

Flusso	Quantità	U.M.
Input		
TMAI N5.0 (trimetilalluminio)	12.90	mg
TMGa (trimetilgallio)	870.00	mg
TMIIn (trimetilindio)	102.70	mg
Si ₂ H ₆ (disilano)	15.41	mg
DEZn (dietilzinco)	140.20	mg
DETe (dietiltellurio)	1.48	mg
PH ₃ (fosfina)	29015.40	mg
AsH ₃ (arsina)	640.00	mg
H ₂ (idrogeno)	6338.40	mg
N ₂ (azoto)	2.10	kg
Wafer GaAs (4", spessore 450 μm) Reattore a pieno carico con 12 wafer da 4"	0.094	m ²
Elettricità processo MOCVD	28.5	kWh
Elettricità media altri consumi di laboratorio (408 kWh/24h)	56.61	kWh
Output		
Wafer InGaP/GaAs 4" – MOCVD (reattore a pieno carico con 12 wafer)	0.094	m ²
Trattamento grafite del reattore	1 ogni 70 cicli	
Trattamento filtri arsenico e fosforo	1 ogni anno	
Trattamento filtri a carboni attivi	1 ogni anno	

Tabella 5 Dati di inventario per la produzione delle celle InGaP/Si. Processo MOCVD.

Flusso	Quantità	U.M.
Input		
TMAI N5.0 (trimetilalluminio)	15.00	mg
TMGa (trimetilgallio)	2180.00	mg
TMIn (trimetilindio)	1075.20	mg
Si ₂ H ₆ (disilano)	0	mg
DEZn (dietilzinco)	140.20	mg
DETe (dietiltellurio)	1.48	mg
PH ₃ (fosfina)	83695.00	mg
AsH ₃ (arsina)	1914.00	mg
H ₂ (idrogeno)	5360.00	mg
Wafer Si monocristallino (4", spessore 381 µm, peso 15.7 g) Reattore a pieno carico con 12 wafer da 4"	0.124	m ²
Elettricità processo MOCVD	169.5	kWh
Elettricità altri consumi di laboratorio (408 kWh/24h)	106.25	kWh
Output		
Wafer InGaP/Si 4" - MOCVD	0.094	m ²
Trattamento grafite del reattore	1 ogni 70 cicli	
Trattamento filtri arsenico e fosforo	1 ogni anno	
Trattamento filtri a carboni attivi	1 ogni anno	

Tabella 6 Dati di inventario per il processo di fabbricazione delle celle InGaP/GaAs (identico anche per le celle InGaP/Si).

1) Pulizia retro		
Input		
Wafer InGaP/GaAs 4" – MOCVD	0.00785	m ²
H ₂ O deionizzata	200	ml
NH ₄ OH (idrossido di ammonio, 40%)	4	ml
H ₂ O ₂ (perossido di idrogeno, 40%)	4	ml
Output		
Wafer InGaP/GaAs con retro pulito	0.00785	m ²
Refluo pulizia	208	ml
2) Contatto metallico retro		
Input		
Wafer InGaP/GaAs 4" con retro pulito	0.00785	m ²
Ti	2.65E-04	g
Au	4.55E-02	g
Ag	1.24E-04	g
Elettricità	6.50E+03	Wh
Output		
Wafer InGaP/GaAs 4" con contatto retro	1	pz
3) Pulizia cap layer		
Input		
Wafer InGaP/GaAs 4" con contatto retro	0.00785	m ²
H ₂ O deionizzata	200	ml

NH ₄ OH (idrossido di ammonio, 40%)	4	ml
Output		
Cella InGaP/GaAs 4" con cap layer pulito	1	pz
Refluo pulizia	204	ml
4) Contatto metallico fronte		
Input		
Wafer InGaP/GaAs 4" con cap layer pulito	0.00785	m ²
Ti	2.65E-04	g
Au	4.55E-02	g
Ag	1.24E-04	g
Elettricità	6.52E+03	Wh
Output		
Wafer InGaP/GaAs 4" con contatto fronte	0.00785	m ²
5) Rimozione GaAs Cap Layer		
Input		
Wafer InGaP/GaAs 4" con contatto fronte	0.00785	m ²
H ₂ O deionizzata	200	ml
NH ₄ OH (idrossido di ammonio, 40%)	4	ml
H ₂ O ₂ (perossido di idrogeno, 40%)	4	ml
Output		
Wafer InGaP/GaAs 4" – cap layer rimosso	0.00785	m ²
GaP layer rimosso	n.a.	
Refluo	208	ml
6) Deposizione coating antiriflesso		
Input		
Wafer InGaP/GaAs 4" – cap layer rimosso	0.00785	m ²
Ta ₂ O ₅ (pentossido di tantalio)	2.57E-03	mg
SiO ₂ (diossido di silicio)	9.55E-04	mg
O ₂ (ossigeno)	133	cm ³
Elettricità	1.27E+03	Wh
Output		
Wafer InGaP/GaAs 4" con antiriflesso	0.00785	m ²
O ₂ in aria	133	cm ³
7) Wafer bonding		
Input		
Wafer InGaP/GaAs 4" con antiriflesso	0.00785	m ²
Acqua per raffreddamento lama diamantata	5000	cm ³
Nastro in PVC	0.00785	m ²
Elettricità taglio wafer	3000	Wh
Elettricità cottura	600	Wh
Output		
Celle InGaP/GaAs 22 x 6 mm	29	pz
Scarto di wafer	8.64	g
Refluo	5000	cm ³

2.4 Trattamento filtri del reattore MOCVD

Nel processo produttivo analizzato è stata inclusa la pulizia dei componenti in grafite del reattore, il trattamento dei filtri criogenici e del filtro a carboni attivi.

I componenti in grafite del reattore devono essere puliti dai residui di processo ogni 70 cicli di crescita. I componenti vengono inviati ad un'azienda specializzata in questo tipo di trattamento, che prevede il loro riscaldamento a 2000°C in Azoto (N₂) e il trattamento dei residui asportati. Nell'analisi è stato considerato il trasporto all'azienda e l'energia necessaria al riscaldamento dei componenti.

I filtri criogenici, ciascuno del peso totale di 125 kg, sono costituiti da un involucro in acciaio e un filtro in grafite. Annualmente i filtri vengono inviati ad una ditta specializzata, svuotati e riempiti di nuova grafite. Si assume che il 60% del peso sia dato dall'involucro in acciaio e il 40% dalla grafite. Si assume, inoltre, che l'involucro in acciaio venga sostituito completamente ogni 10 anni.

Il filtro di trattamento dei gas esausti uscenti dal reattore è costituito da un abbattitore a carboni attivi del peso complessivo di 450 kg. Anche in questo caso si assume una composizione del 60% di acciaio e 40% di carboni attivi. La sostituzione completa del sistema si assume avvenga ogni 10 anni.

La distanza dell'impianto di smaltimento è stata assunta pari a 100 km.

2.5 Caratteristiche elettriche cella

Per la quantificazione della potenza ottenibile in un sistema LSC-PV, è stata installata una cella sul bordo di un concentratore luminescente per applicazioni BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) [12]. Le caratteristiche tecniche principali del concentratore utilizzato sono riportate in Tabella 7.

Tabella 7 Caratteristiche del concentratore solare luminescente

Proprietà	Descrizione
Dimensioni	50 x 50 x 0.6 cm
Matrice	Polimetilmetacrilato
Luminofores	DTB (4,7-di (2-tienil) benzo [c] 1,2,5-tiadiazolo); DPA (9,10-diphenylanthracene)
Numero celle 22*6 mm installabili ai bordi	88

La potenza generata dalla cella InGaP/GaAs applicata all'LSC, esposto all'aperto, ad una radiazione solare misurata pari a 915 W/m², è di 40 mW. A partire da questo dato, è stata estrapolata la potenza nominale teorica ottenibile in condizioni standard di illuminazione della lastra (1000 W/m²), pari a 43.72 mW, allo scopo di ottenere risultati confrontabili con le analisi riportate in letteratura.

Per la produzione di 1 kW_p sono teoricamente necessari 260 dispositivi LSC-PV da 50 x 50 cm dotati di 88 celle installate ai bordi, per una superficie fotovoltaica complessiva di 6.2 m² (senza considerare le perdite di installazione).

2.6 Modellazione di processi e materiali

Per la modellazione dei processi è stato utilizzato il software SimaPro 9.5 e il database ecoinvent v3.9.1. In questa sezione si riportano i dataset utilizzati per ciascun flusso di materia e di energia in entrata ed uscita dalle singole unità di processo considerate. La modellazione dei nuovi processi è riportata in dettaglio in Appendice.

Tabella 8 Dataset utilizzati per i flussi in ingresso e uscita dalle unità di processo.

Flusso	Dataset	Note
Wafer GaAs	GaAs wafer {DE} VGF production, U - RSE	[4]
TMAI (trimetilalluminio)	Trimethylaluminum 98% pure (TMAI) - RSE	[13]
TMGa (trimetilgallio)	Trimethylgallium (TMGa) - RSE	[4]
TMIn (trimetilindio)	Trimethylgallium (TMGa) - RSE	[4]
DEZn (dietilzinco)	Diethylzinc ((C ₂ H ₅) ₂ Zn) - RSE	[14]
DETe (dietiltellurio)	Diethyltelluride - C ₄ H ₁₀ Te - RSE	[15]
Ti	Titanium {GLO} market for titanium Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Au	Gold {GLO} market for gold Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Ag	Silver {GLO} market for silver Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Si ₂ H ₆ (disilano)	Silicon tetrahydride {GLO} market for Silicon tetrahydride Cut-off, U	Generico selezionato Dataset ecoinvent v3.9.1
PH ₃ (fosfina)	Phosphane {GLO} market for phosphane Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
AsH ₃ (arsina)	Arsine {GLO} market for arsine Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
H ₂ (idrogeno)	Hydrogen, liquid {RER} market for hydrogen, liquid Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
N ₂ (azoto)	Nitrogen, liquid {RER} market for nitrogen, liquid Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
H ₂ O deionizzata	Water, deionised {Europe without Switzerland} water production, deionised Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
NH ₄ OH (idrossido di ammonio, 40%)	40% Ammonia, anhydrous, liquid {RER} market for ammonia, anhydrous, liquid Cut-off, U 60% Water, deionised {Europe without Switzerland} market for water, deionised Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
H ₂ O ₂ (perossido di idrogeno, 40%)	40% Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER} market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state Cut-off, U 60% Water, deionised {Europe without Switzerland} market for water, deionised Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Ta ₂ O ₅ (pentossido di tantalio)	Tantalum pentoxide power, {RoW} tantalum pentoxide powder production Cut-off, U_RSE	Modifica dataset ecoinvent v3.8 <i>Tantalum power, {RoW} tantalum powder production Cut-off, U (rimozione processi legati alla riduzione del Ta₂O₅)</i>
SiO ₂ (diossido di silicio)	Silica sand {RoW} market for Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
O ₂ (ossigeno)	Oxygen, liquid {RER} market for Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Blue foil tape	Polyvinylchloride, suspension polymerised {GLO} market for Cut-off, U Extrusion, plastic film {RoW} extrusion, plastic film Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Elettricità	Electricity, low voltage {IT} market for Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Trattamento grafite	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1

	Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland} treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration Cut-off, U	
Sostituzione filtri a carboni attivi	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U Metal working, average for chromium steel product manufacturing {RoW} metal working, average for chromium steel product manufacturing Cut-off, U Activated carbon, granular {GLO} market for activated carbon, granular Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Trattamento filtri a carboni attivi	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland} treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration Cut-off, U Scrap steel {Europe without Switzerland} market for scrap steel Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Sostituzione filtri criogenici	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U Metal working, average for chromium steel product manufacturing {RoW} metal working, average for chromium steel product manufacturing Cut-off, U Graphite {GLO} market for graphite Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1
Trattamento filtri criogenici	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland} treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration Cut-off, U Scrap steel {Europe without Switzerland} market for scrap steel Cut-off, U	Dataset ecoinvent v3.9.1

3 Analisi degli impatti ambientali

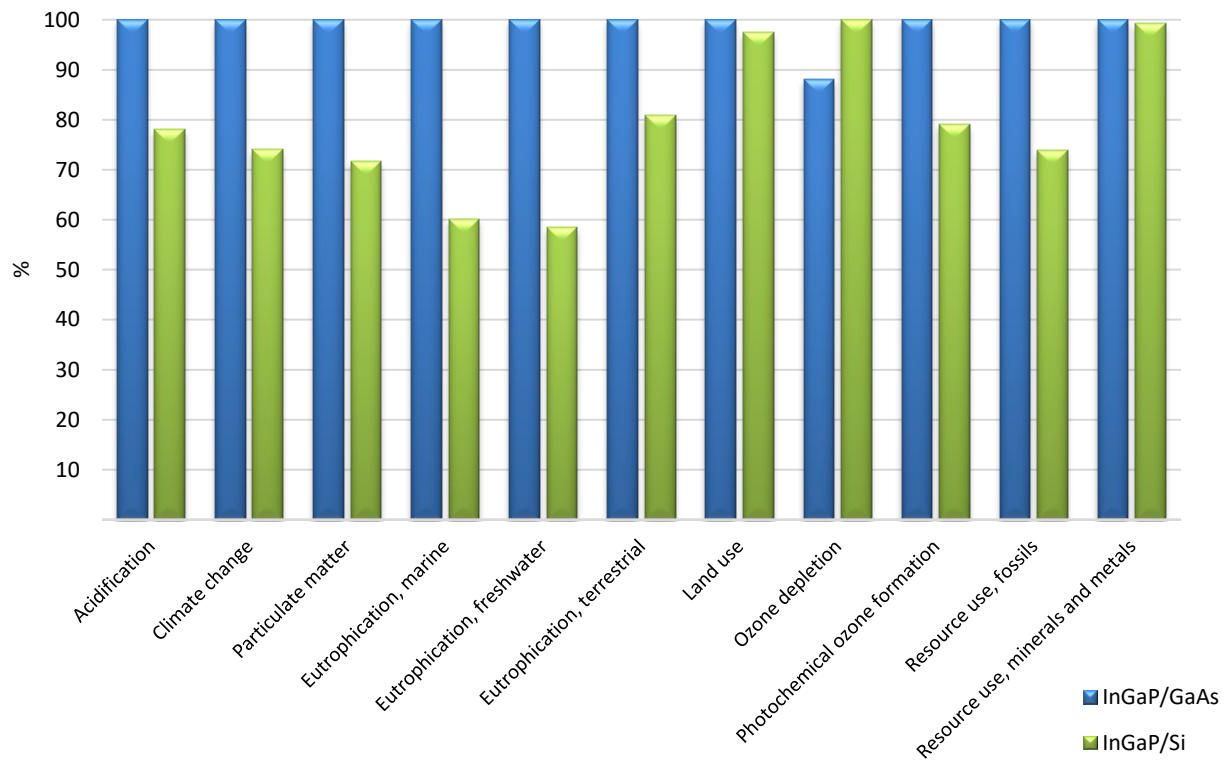
In questa sezione sono presentati i potenziali impatti ambientali, relativi all'unità funzionale di 1 kWp, di entrambi i tipi di celle.

È necessario ricordare che i risultati ottenuti sono espressioni relative e non prevedono impatti reali sugli endpoint di categoria (risorse, salute umana, ambiente naturale), il superamento di soglie, margini di sicurezza o rischi.

In Tabella 9 sono elencati i risultati ottenuti per le categorie di impatto selezionate, confrontati in valore assoluto nel grafico in Figura 4. Si può osservare come gli impatti delle celle InGaP/Si siano inferiori per tutte le categorie, tranne l'Ozone depletion, rispetto agli impatti delle celle InGaP/GaAs.

Tabella 9 Valutazione degli impatti ambientali delle celle InGaP/GaAs e InGaP/Si (Impatti caratterizzati, metodo EF 3.1 v1.00, UF 1 kWp)

Categoria d'impatto	Unità	InGaP/GaAs	InGaP/Si
Acidification	mol H+ eq	8,32E+01	6,50E+01
Climate change	kg CO2 eq	2,20E+04	1,63E+04
Particulate matter	disease inc.	6,12E-04	4,38E-04
Eutrophication, marine	kg N eq	2,95E+01	1,78E+01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	2,38E+01	1,39E+01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	2,15E+02	1,74E+02
Land use	Pt	8,87E+04	8,65E+04
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,47E-03	1,67E-03
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	5,82E+01	4,60E+01
Resource use, fossils	MJ	3,14E+05	2,32E+05
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	4,70E+00	4,67E+00



**Figura 4 Confronto tra gli impatti ambientali delle celle InGaP/GaAs e InGaP/Si
(impatti caratterizzati, metodo EF 3.1 v1.00, UF 1 kWp)**

Nel paragrafo successivo, verranno approfondite le cause dei potenziali impatti sulle due categorie Climate change e Resource use, minerals and metals, in quanto più rilevanti nel settore fotovoltaico (in Appendice I si riporta l'analisi contributi completa).

4 Interpretazione

In questo capitolo vengono analizzate le fonti dei potenziali impatti nelle categorie selezionate, per entrambi i tipi di celle.

4.1 Climate Change

In Tabella 10 sono riportati gli impatti sul Climate Change delle due tipologie di celle, suddivisi nella fase di crescita MOCVD e nella fase di fabbricazione. Si può osservare che gli impatti della fase di crescita delle celle InGaP/Si risulti inferiore alla fase di crescita delle celle InGaP/GaAs del 42.3%. Nella fase di fabbricazione l'impatto risulta identico per entrambi i tipi di celle, in quanto i consumi di materiali e di energia sono invarianti.

Tabella 10 Impatti ambientali sul Climate Change suddivisi per fasi di produzione delle celle InGaP/GaAs e InGaP/Si (impatti caratterizzati, metodo EF 3.1 v1.00, UF 1 kWp)

Fase di produzione	Climate Change (kgCO ₂ eq) InGaP/GaAs	Climate Change (kgCO ₂ eq) InGaP/Si	Variazione percentuale rispetto a InGaP/GaAs
Crescita celle	1.35E+04	7.75E+03	-42.3%
Fabbricazione delle celle	8.59E+03	8.59E+03	0%
Totale	2.20E+04	1.63E+04	-25.9%

In Figura 5 sono riportati i contributi di tutte le fasi della produzione della cella InGaP/GaAs: rispetto al totale dell'impatto sul Climate Change, il processo di crescita delle celle rappresenta il 60.3%, in cui l'84.4% deriva dalla produzione del substrato GaAs ed il 15.1% dall'energia richiesta per la crescita delle celle. Il contributo dei precursori metallorganici risulta trascurabile.

Tra le fasi della fabbricazione delle celle la deposizione dei contatti risulta contribuire per il 32.4% del totale sul Climate Change. Analizzando il grafico Sankey riportato in Figura 6 si può osservare come le fonti di questi impatti siano da attribuire principalmente ai consumi energetici (23%) e alla produzione dell'oro utilizzato per i contatti (15.8%)

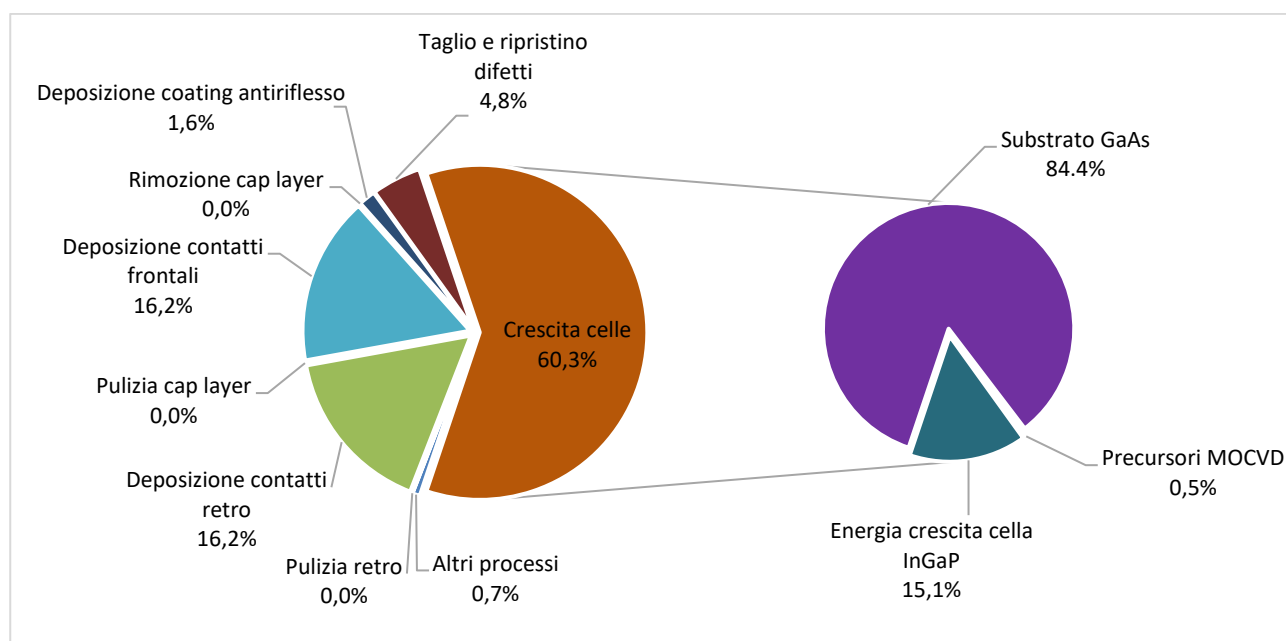


Figura 5 Contributi sul Climate Change della costruzione della cella InGaP/GaAs (U.F 1 kWp)

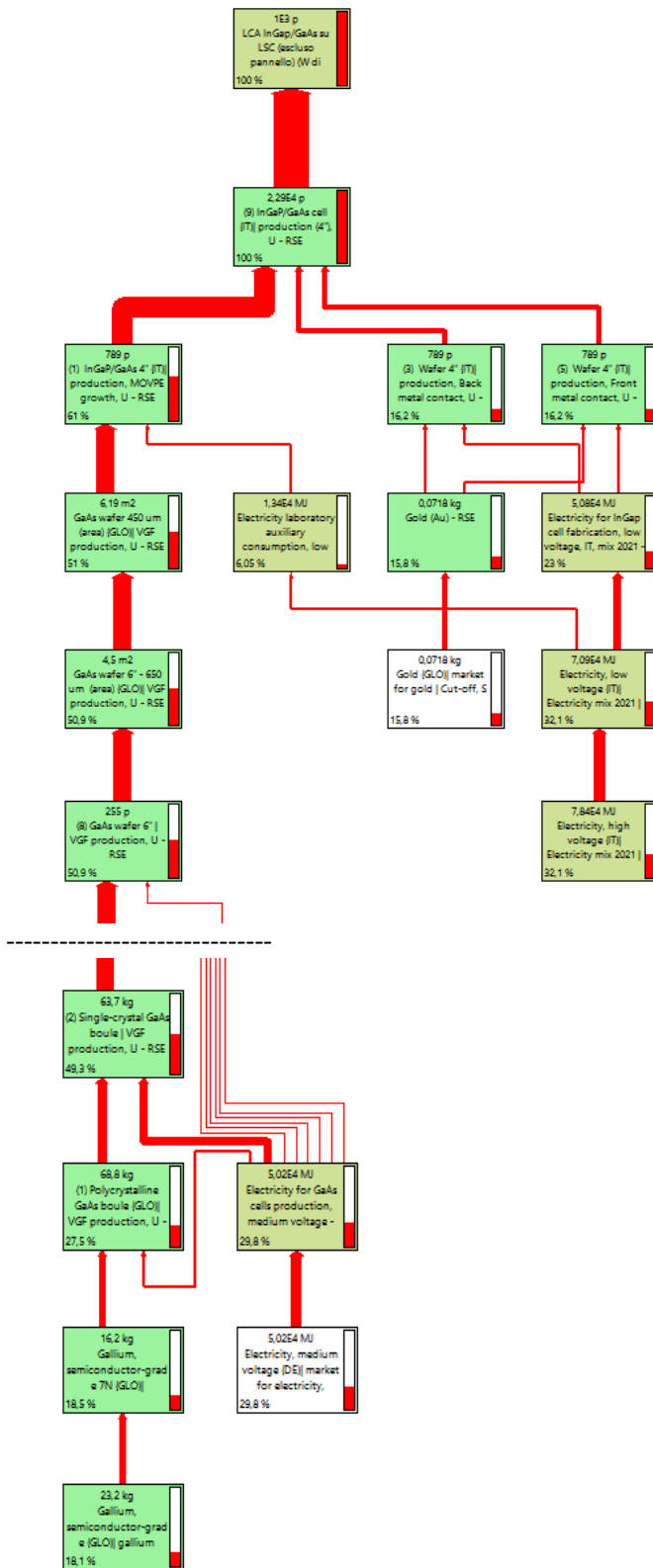


Figura 6 Grafico Sankey relativo ai contributi delle fasi del ciclo di vita della cella InGaP/GaAs sulla categoria Climate Change (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati, cut-off 5%).

In Figura 7 sono riportati i contributi di tutte le fasi della produzione della cella InGaP/Si: rispetto al totale dell'impatto sul Climate Change, il processo di crescita delle celle rappresenta, in questo caso, il 46%, di cui l'86.5% deriva dall'energia richiesta per la crescita delle celle, e l'11.3% dalla produzione del substrato in Si. Anche in questo caso il contributo dei precursori metallorganici risulta trascurabile.

Tra le fasi della fabbricazione delle celle la deposizione dei contatti risulta contribuire per il 43.8% del totale sul Climate Change. Analizzando il diagramma di flusso riportato in Figura 8 si può osservare, che anche in questa cella, le fonti di questi impatti siano da attribuire principalmente ai consumi energetici (31%) e alla produzione dell'oro utilizzato per i contatti (21.3%).

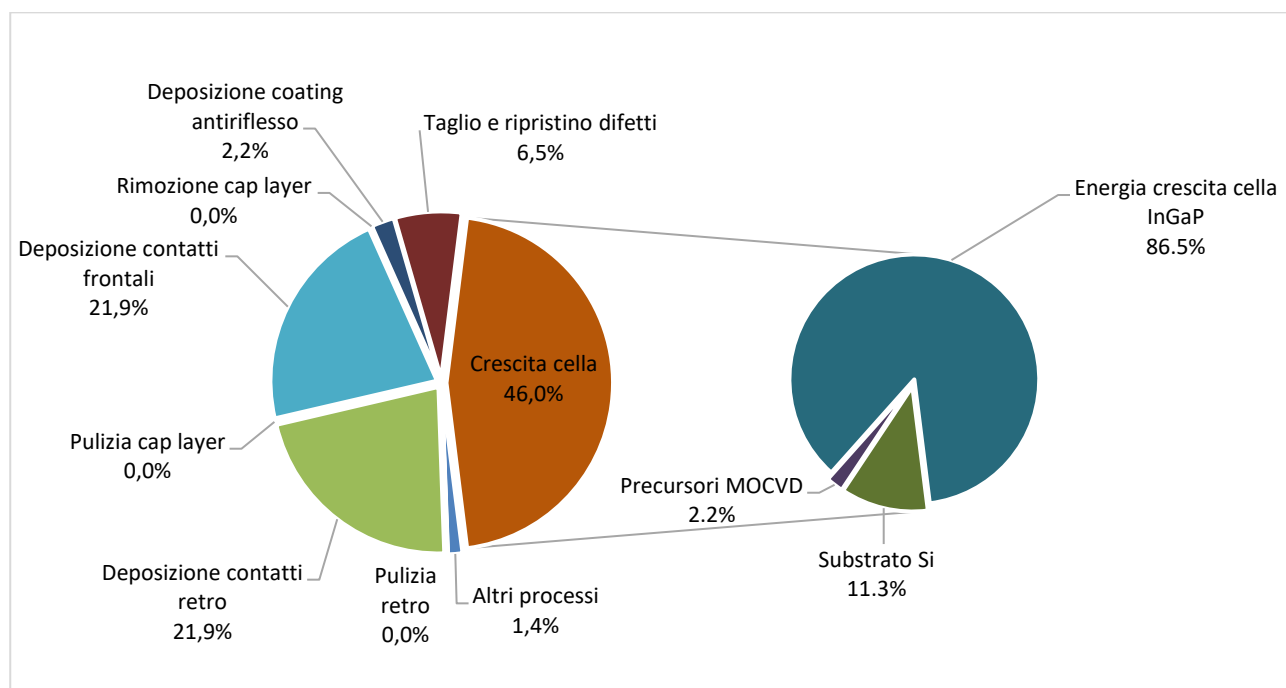


Figura 7 Contributi sul Climate Change della costruzione della cella InGaP/Si (U.F 1 kWp)

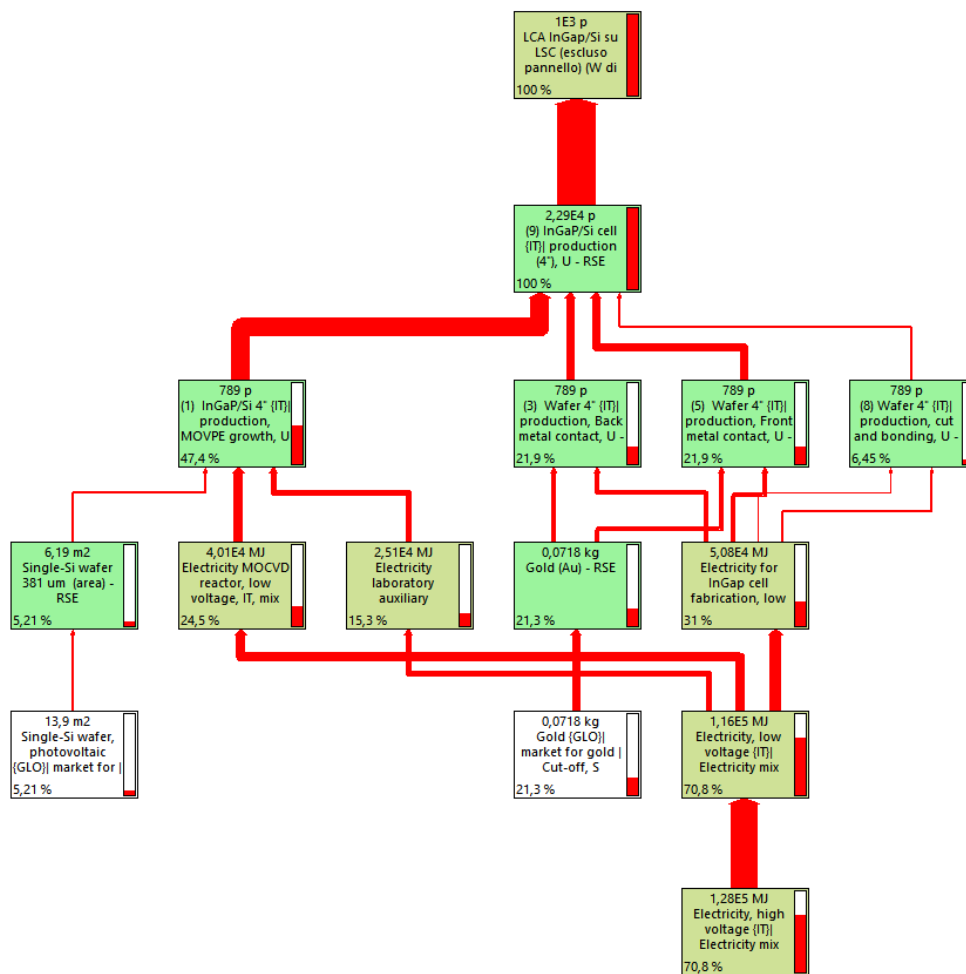


Figura 8 Grafico Sankey relativo ai contributi delle fasi del ciclo di vita della cella InGaP/Si sulla categoria Climate Change (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati, cut-off 5%).

4.2 Resource use, minerals and metals

In Tabella 10 sono riportati gli impatti sulla categoria Resource use, minerals and metals delle due tipologie di celle, suddivisi nella fase di crescita MOCVD e nella fase di fabbricazione (processi di lavorazione successivi alla crescita). In questa categoria il processo di crescita, per entrambi i tipi di celle, ha un impatto trascurabile, mentre risulta predominante la fase di fabbricazione. Il contributo maggiore deriva dalla produzione dell'oro utilizzato per i contatti delle celle, come visibile dai diagrammi in Figura 9.

Tabella 11 Impatti ambientali sul Resource use, minerals and metals suddivisi per fasi di produzione delle celle InGaP/GaAs e InGaP/Si (impatti caratterizzati, metodo EF 3.1 v1.00, UF 1 kWp)

Fase di produzione	Resource use, minerals and metals (kgSb eq) InGaP/GaAs	Resource use, minerals and metals (kgSb eq) InGaP/Si	Variazione percentuale rispetto a InGaP/GaAs
Processo MOCVD	5.31E-02	1.60E-02	-69.9%
Fabbricazione celle	4.65E+00	4.65E+00	0%
Totale	4.70E+00	4.67E+00	-0.6%

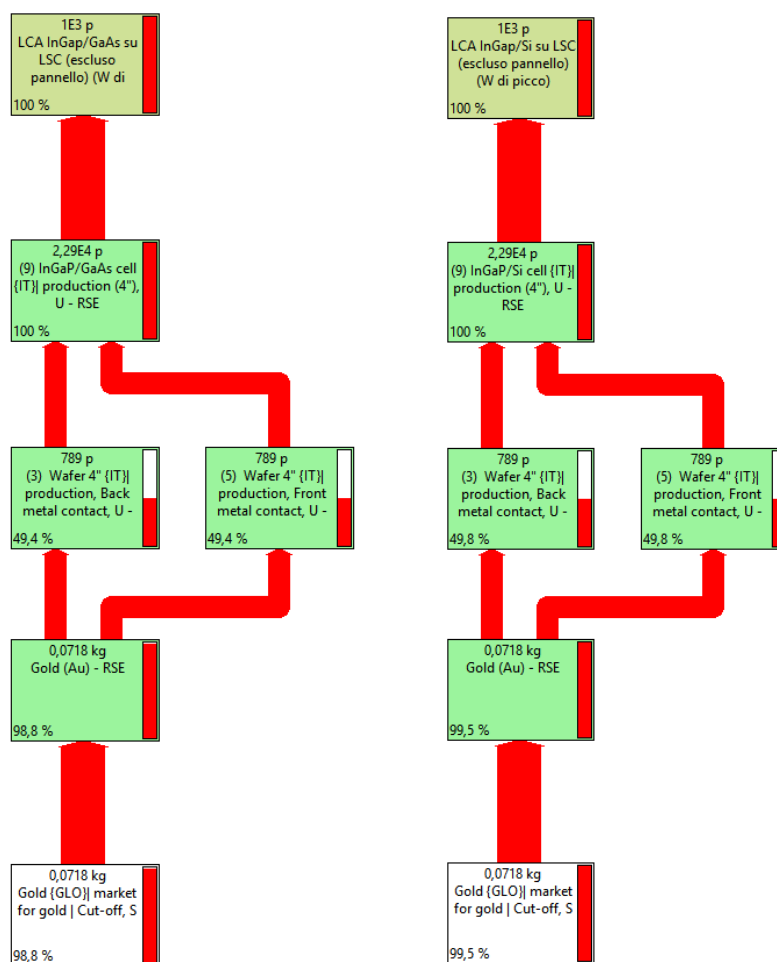


Figura 9 Grafico Sankey relativi ai contributi delle fasi del ciclo di vita delle celle InGaP/GaAs (sinistra) e InGaP/Si (destra) sulla categoria Resource use, minerals and metals (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati, cut-off 5%).

4.3 Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività consiste nel valutare come variano i potenziali impatti ambientali al variare di alcuni parametri del modello LCA. Nel caso analizzato sono stati calcolati gli impatti sul Climate Change e su Resource use, minerals and metals al variare dell'efficienza della cella InGaP/Si, allo scopo di valutare quale efficienza minima deve avere affinché gli impatti ambientali risultino inferiori a quelli della cella InGaP/GaAs. Si assume che il perfezionamento delle caratteristiche elettriche della cella non comporti una variazione rilevante dei consumi energetici necessari alla sua produzione.

L'efficienza riportata nei grafici è l'efficienza della cella applicata al concentratore solare luminescente, calcolata come rapporto tra potenza ottenuta e radiazione uscente dal bordo della lastra.

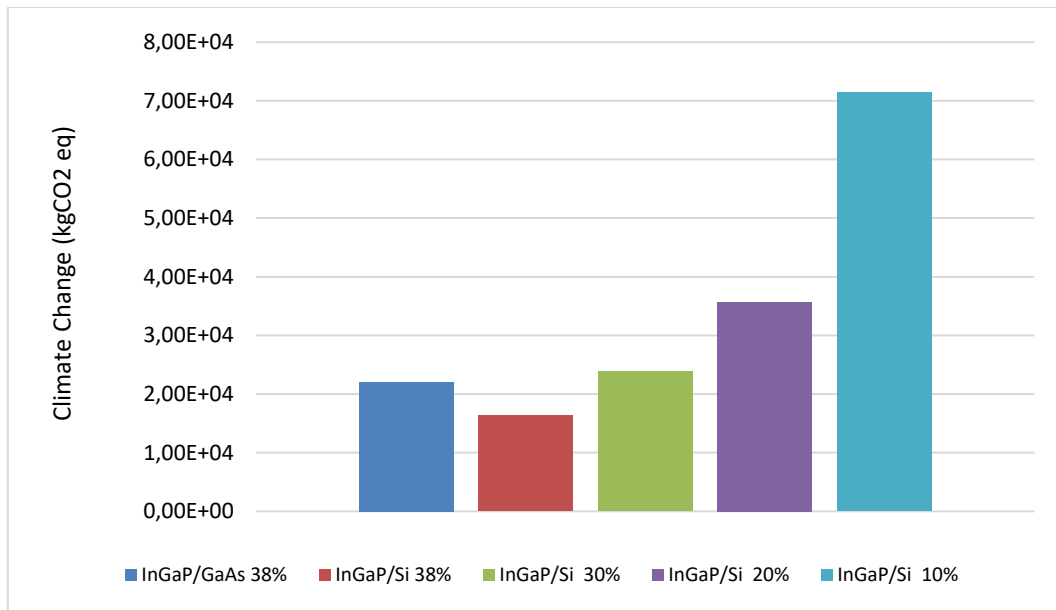


Figura 10 Confronto degli impatti sul Climate Change al variare dell'efficienza della cella InGaP/Si (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati).

Considerando la variazione dell'impatto sul Climate Change, si osserva come un'efficienza inferiore al 30% della cella InGaP/Si comporti un aumento dell'impatto rispetto alla cella accresciuta su GaAs. Considerando invece la categoria Resource use, minerals and metals, essendo l'impatto dipendente dai contatti in oro, identici in entrambi i casi, l'efficienza minima per ottenere un impatto inferiore dovrebbe essere maggiore del 38%.

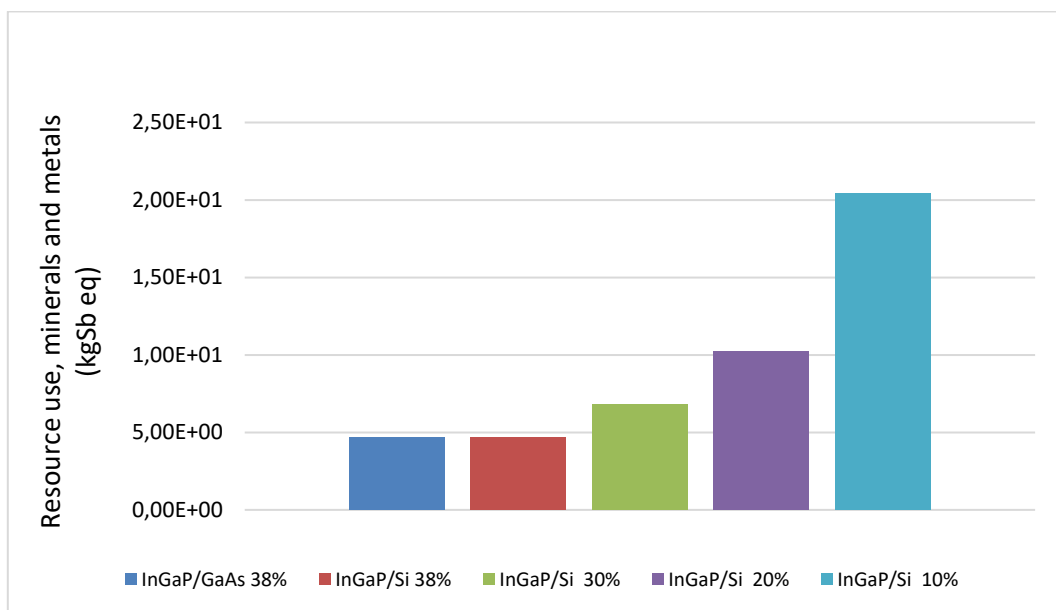


Figura 11 Confronto degli impatti su Resource use, minerals and metals, al variare dell'efficienza della cella InGaP/Si (UF 1 kWp, metodo EF 3.1 v1.00, impatti caratterizzati).

5 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, a parità di potenza installata e di efficienza, le celle InGaP/Si hanno dei potenziali impatti sul Climate Change inferiori del 25.9% rispetto alle celle InGaP/GaAs. Questa differenza ha origine nel minore impatto associato alla produzione dei wafer in silicio monocristallino rispetto ai wafer in GaAs. La differenza dei potenziali impatti sull'uso di risorse minerali e metalli risulta trascurabile, in quanto dipendente dall'utilizzo dell'oro per la costruzione dei contatti delle celle, la cui quantità è identica per entrambe le tipologie. Per ottenere un impatto inferiore in questo indicatore è quindi necessario sostituire l'oro con metalli alternativi.

Dal confronto degli impatti del prototipo di InGaP/Si ad efficienze inferiori al 38%, con la cella InGaP/GaAs con efficienza al 38%, si osserva che non è presente un vantaggio in termini di impatto ambientale.

Ad efficienze inferiori al 38% è infatti necessario considerare l'utilizzo di metalli diversi dall'oro (argento o alluminio) per ottenere vantaggi rilevanti dal punto di vista degli impatti sull'uso di risorse minerarie e metalliche. Considerando gli impatti sul Climate Change risulta che per efficienze della cella InGaP/Si inferiori al 30% gli impatti risultano maggiori rispetto alle celle su GaAs: per ridurre questi impatti risulta quindi necessario ridurre i consumi energetici necessari alla crescita e fabbricazione delle celle InGaP/Si.

6 Bibliografia

- [1] 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.
- [2] N. J. Mohr, J. J. Schermer, M. A. J. Huijbregts, A. Meijer e L. Reijnders, «Life Cycle Assessment of Thin-film GaAs and GaInP/GaAs,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 15, p. 163–179, 2007.
- [3] 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.
- [4] B. L. Smith, «Development and Life Cycle Assessment of Advanced-Concept III-V Multijunction Photovoltaics,» Rochester Institute of Technology, 2018.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ISO - The International Organization for Standardization, *ISO 14040:2006/Amd 1:2020: Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework - Amendment 1*, 2020.
- [9] ISO - The International Organization for Standardization, *ISO 14044:2006/Amd 2:2020: Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines - Amendment 2*, 2020.
- [10] L. Zampori e R. Pant, «Product Environmental Footprint (PEF) method,» EUR 29682 EN, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, Lussemburgo, 2019.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] B. L. Smith, A. Sekar, H. Mirletz, 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.
- [14] 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].
- [15] «QS Study,» [Online]. Available: <https://qsstudy.com/dimethyl-telluride/>.
- [16] Umweltbundesamt, «ProBas,» [Online]. Available: www.probas.umweltbundesamt.de. [Consultato il giorno 15 12 2023].
- [17] H. Wilting e A. Hanemaaijer, «Share of Raw Material Costs in Total Production Costs,» The Hague, the Netherlands, 2014.
- [18] K. V. Smith, A cura di, *Scarcity and Growth Reconsidered*, New York - London: Resource for the Future, 2011.

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, «ILCD Handbook - International Reference Life Cycle Data System,» Brussels, 2010.
- [22] 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.
- [23] M. L. Carvalho, M. A. Cusenza, G. Mela e A. Temporelli, «LCA a Supporto Dello Sviluppo Di Batterie al Sodio,» Milan, 2023.

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
CED	Cumulative Energy Demand
VGF	Vertical Gradient Freeze
GNI	Global Normal Irradiance
LCI	Life Cycle Inventory
TMAI	Trimetilalluminio
TMGa	Trimetilgallio
TMIn	Trimetilindio
DEZn	Dietilzinco
DETe	Dietiltellurio
BIPV	Building-Integrated Photovoltaics

Appendice I

Analisi degli impatti ambientali estesa

In Figura 12 e in Tabella 12 sono riportati rispettivamente i contributi in percentuale ed i valori degli indicatori selezionati delle categorie di impatto ambientale del metodo EF, suddivisi per fase di produzione della cella InGaP/GaAs. Si può osservare come i contributi della fase di crescita della cella e della deposizione dei contatti siano prevalenti in tutte le categorie di impatto, rispetto alle altre fasi.

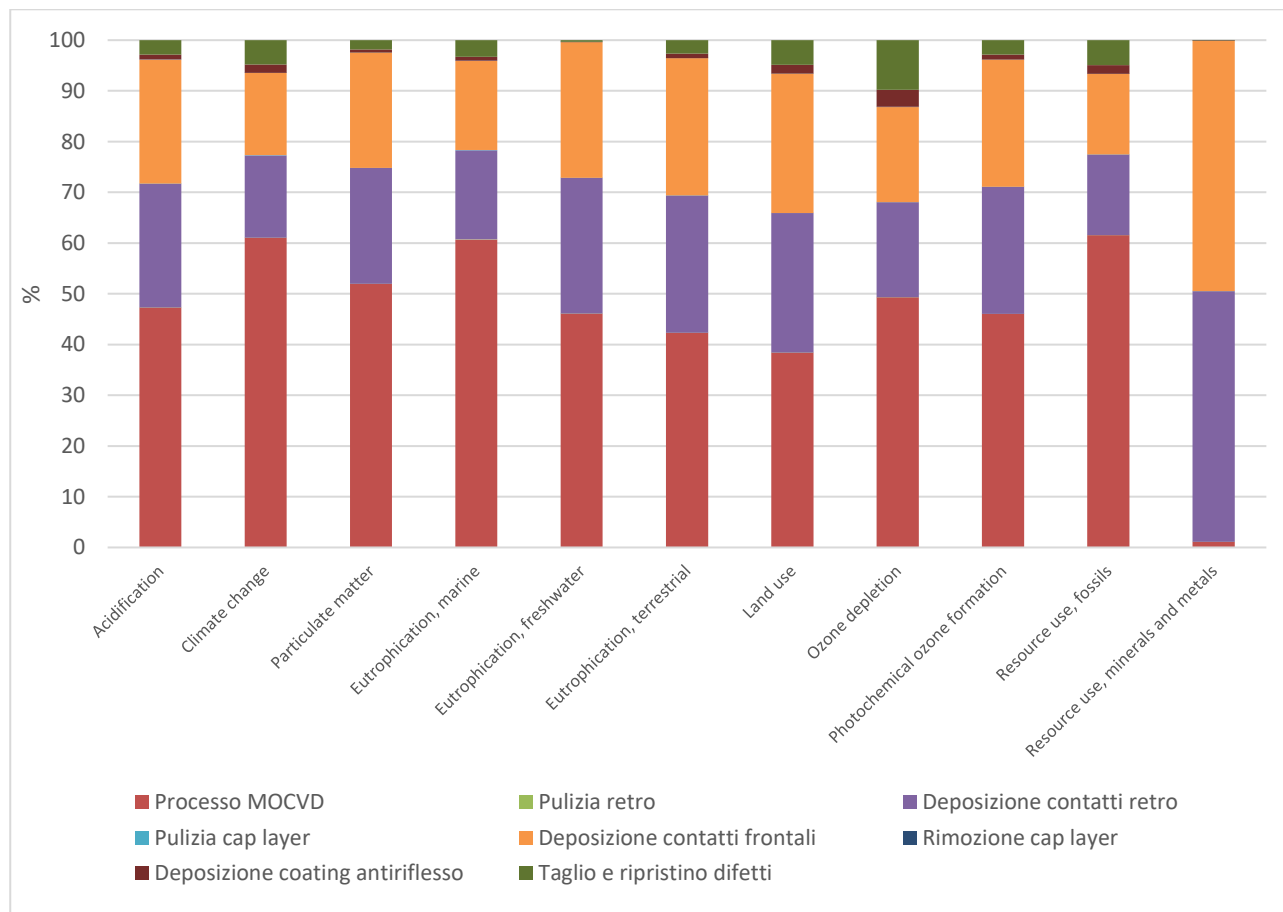


Figura 12 Contributo delle fasi produttive delle celle InGaP/GaAs sulle categorie di impatto ambientale (impatti caratterizzati, metodo EF 3.1 v1.00, UF 1 kWp)

Tabella 12 Analisi dei contributi delle fasi di costruzione delle celle InGaP/GaAs

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Crescita cella	Pulizia retro	Deposizione contatti retro	Pulizia cap layer	Deposizione contatti frontali	Rimozione cap layer	Deposizione coating antiriflesso	Taglio e ripristino difetti
Acidification	mol H+ eq	8.32E+01	3.94E+01	1.20E-02	2.03E+01	6.77E-03	2.03E+01	1.20E-02	8.01E-01	2.37E+00
Climate change	kg CO2 eq	2.20E+04	1.35E+04	5.48E+00	3.58E+03	4.02E+00	3.58E+03	5.48E+00	3.60E+02	1.05E+03
Particulate matter	disease inc.	6.12E-04	3.18E-04	8.96E-08	1.39E-04	4.59E-08	1.39E-04	8.96E-08	3.54E-06	1.10E-05
Eutrophication, marine	kg N eq	2.95E+01	1.79E+01	1.74E-02	5.18E+00	1.64E-02	5.18E+00	1.74E-02	2.11E-01	9.75E-01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	2.38E+01	1.10E+01	2.92E-03	6.36E+00	2.46E-03	6.36E+00	2.92E-03	7.55E-03	8.26E-02
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	2.15E+02	9.11E+01	2.66E-02	5.83E+01	1.74E-02	5.83E+01	2.66E-02	1.92E+00	5.69E+00
Land use	Pt	8.87E+04	3.41E+04	7.18E+00	2.44E+04	3.66E+00	2.44E+04	7.18E+00	1.51E+03	4.30E+03
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1.47E-03	7.25E-04	2.04E-07	2.75E-04	1.40E-07	2.76E-04	2.04E-07	4.92E-05	1.44E-04
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	5.82E+01	2.68E+01	1.28E-02	1.46E+01	8.38E-03	1.46E+01	1.28E-02	5.57E-01	1.64E+00
Resource use, fossils	MJ	3.14E+05	1.93E+05	7.85E+01	5.00E+04	5.33E+01	5.00E+04	7.85E+01	5.34E+03	1.54E+04
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	4.70E+00	5.31E-02	2.57E-05	2.32E+00	1.37E-05	2.32E+00	2.57E-05	3.68E-04	1.14E-03

In Figura 13 e in Tabella 13 sono riportati rispettivamente i contributi in percentuale ed i valori degli indicatori selezionati delle categorie di impatto ambientale del metodo EF, suddivisi per fase di produzione della cella InGaP/Si. Si può osservare come, anche in questo caso, i contributi della fase di crescita della cella e della deposizione dei contatti siano prevalenti in tutte le categorie di impatto, rispetto alle altre fasi.

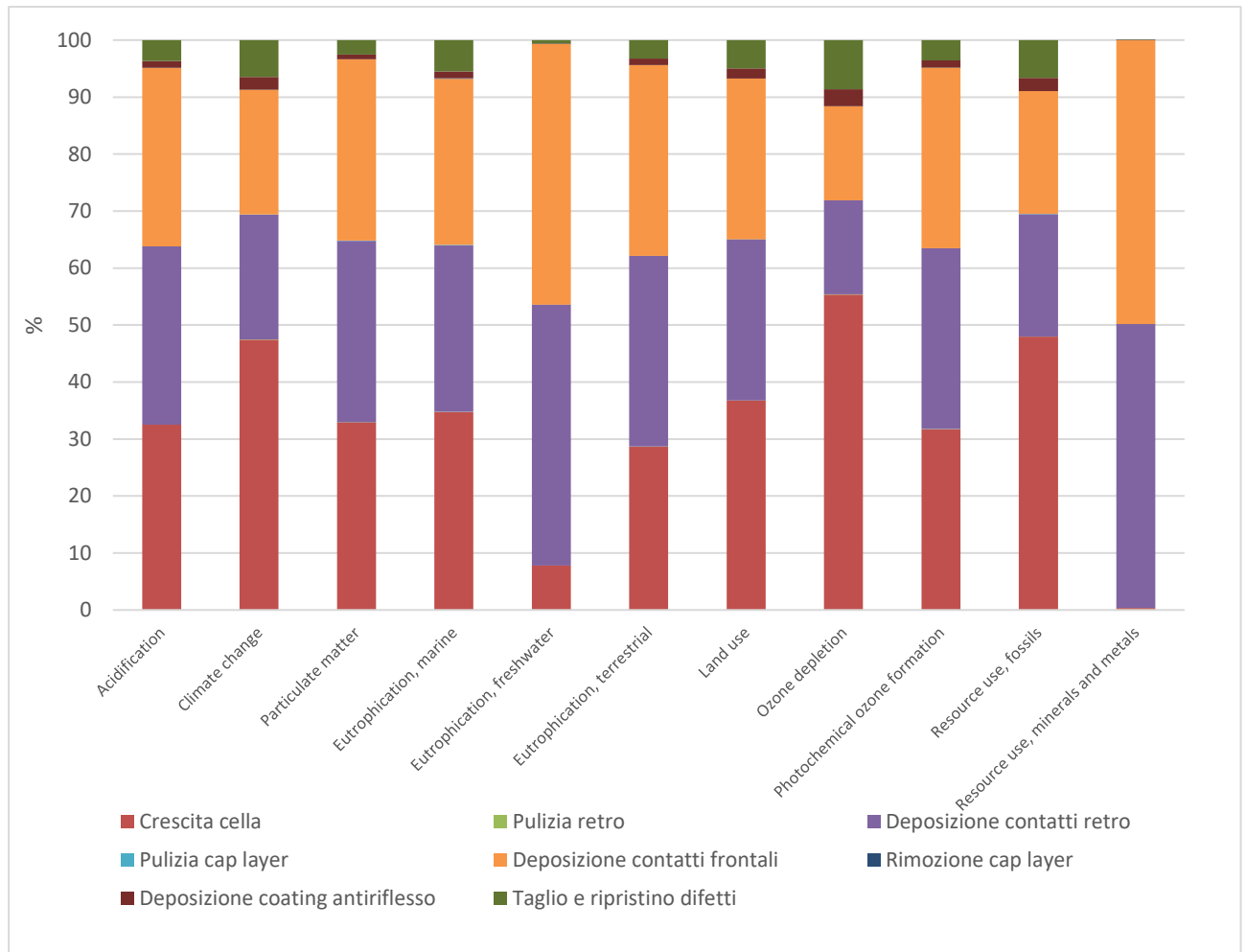


Figura 13 Contributo delle fasi produttive delle celle InGaP/Si sulle categorie di impatto ambientale (impatti caratterizzati, metodo EF 3.1 v1.00, UF 1 kWp)

Tabella 13 Analisi dei contributi delle fasi di costruzione delle celle InGaP/Si

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Crescita cella	Pulizia retro	Deposizione contatti retro	Pulizia cap layer	Deposizione contatti frontali	Rimozione cap layer	Deposizione coating antiriflesso	Taglio e ripristino difetti
Acidification	mol H+ eq	6.50E+01	2.11E+01	1.20E-02	2.03E+01	6.77E-03	2.03E+01	1.20E-02	8.01E-01	2.37E+00
Climate change	kg CO2 eq	1.63E+04	7.75E+03	5.48E+00	3.58E+03	4.02E+00	3.58E+03	5.48E+00	3.60E+02	1.05E+03
Particulate matter	disease inc.	4.38E-04	1.44E-04	8.96E-08	1.39E-04	4.59E-08	1.39E-04	8.96E-08	3.54E-06	1.10E-05
Eutrophication, marine	kg N eq	1.78E+01	6.17E+00	1.74E-02	5.18E+00	1.64E-02	5.18E+00	1.74E-02	2.11E-01	9.75E-01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1.39E+01	1.08E+00	2.92E-03	6.36E+00	2.46E-03	6.36E+00	2.92E-03	7.55E-03	8.26E-02
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1.74E+02	4.99E+01	2.66E-02	5.83E+01	1.74E-02	5.83E+01	2.66E-02	1.92E+00	5.69E+00
Land use	Pt	8.65E+04	3.18E+04	7.18E+00	2.44E+04	3.66E+00	2.44E+04	7.18E+00	1.51E+03	4.30E+03
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1.67E-03	9.24E-04	2.04E-07	2.75E-04	1.40E-07	2.76E-04	2.04E-07	4.92E-05	1.44E-04
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	4.60E+01	1.46E+01	1.28E-02	1.46E+01	8.38E-03	1.46E+01	1.28E-02	5.57E-01	1.64E+00
Resource use, fossils	MJ	2.32E+05	1.11E+05	7.85E+01	5.00E+04	5.33E+01	5.00E+04	7.85E+01	5.34E+03	1.54E+04
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	4.67E+00	1.60E-02	2.57E-05	2.32E+00	1.37E-05	2.32E+00	2.57E-05	3.68E-04	1.14E-03

Appendice II

Si riportano di seguito le descrizioni dei nuovi dataset creati per i materiali e le sostanze elencati in Tabella 14.

Tabella 14 – Nuovi dataset creati in SimaPro

	Flusso	Dataset	Note
1	Wafer GaAs	GaAs wafer {DE} VGF production, U - RSE	[4]
2	TMAI (trimetilalluminio)	Trimethylaluminum 98% pure (TMAI) - RSE	[13]
3	TMGa (trimetilgallio)	Trimethylgallium (TMGa) - RSE	[4]
4	TMIIn (trimetilindio)	Trimethylgallium (TMGa) - RSE	[4]
5	DEZn (dietilzinco)	Diethylzinc ((C ₂ H ₅) ₂ Zn) - RSE	[14]
6	DETe (dietiltellurio)	Diethyltelluride - C ₄ H ₁₀ Te - RSE	[15]
7	Ta ₂ O ₅ (pentossido di tantalio)	Tantalum pentoxide power, {RoW} tantalum pentoxide powder production Cut-off, U_RSE	Modifica dataset ecoinvent v3.8 <i>Tantalum power, {RoW} tantalum powder production Cut-off, U</i>

6.1 Wafer GaAs

Non essendo presente un dataset in ecoinvent relativo alla produzione delle celle in GaAs, questa è stata modellata a partire dai dati di inventario riportati in Tabella 15. I dati di inventario sono stati ricavati da [4], completati da alcuni flussi necessari per la chiusura del bilancio di massa in ciascuna fase di processo.

Tabella 15 Inventario della produzione del wafer in GaAs.

Flusso	Quantità	U.M.	Dataset
1) Produzione fuso policristallino GaAs			
Input			
Gallio 7N	5.90	kg	[4]
Gallio 7N riciclato internamente	6.20	kg	Processo vuoto (open loop)
7N Arsenico	12.90	kg	[4]
Crogiolo pBN (Pyrolytic Boron Nitride)	0.25	kg	Boron carbide {GLO} market for Cut-off, U
Energia elettrica	1250.00	kWh	Electricity, low voltage {DE} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U
Output			
Crogiolo pBN a smaltimento	0.25	kg	Hazardous waste, for underground deposit {RER} market for hazardous waste, for underground deposit Cut-off, U
Fuso policristallino GaAs	25.00	kg	Assunta efficienza di processo 100%
2) Produzione fuso monocristallino GaAs			
Input			
Fuso policristallino GaAs	27.00	kg	
Crogiolo pBN	0.25	kg	Boron carbide {GLO} market for Cut-off, U
Ossido di Boro	0.13	kg	Boric oxide {GLO} market for Cut-off, U
Energia elettrica	4000.00	kWh	Electricity, low voltage {DE} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U
Output			

Crogiolo pBN, arsenico, ossido di bromo a smaltimento	1.38	kg	Hazardous waste, for underground deposit {RER} market for hazardous waste, for underground deposit Cut-off, U
Gallio a riciclo interno	0.62	kg	Processo vuoto
Fuso monocristallino GaAs	25.00	kg	Assunta efficienza di processo 92%
3) Produzione lingotto monocristallino GaAs			
Input			
Fuso monocristallino GaAs	25.00	kg	
Filo d'acciaio	1.30	mg	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for Cut-off, U Wire drawing, steel {GLO} market for Cut-off, U
Sega diamantata	0.01	pezzi	Natural gas, high pressure {Europe without Switzerland} market group for Cut-off, U Hydrogen, gaseous {Europe without Switzerland} hydrogen production, gaseous, petroleum refinery operation Cut-off, U Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for Cut-off, U
Energia elettrica	21.70	kWh	Electricity, low voltage {DE} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U
Output			
Crogiolo pBN, arsenico, ossido di bromo a smaltimento	1.15	kg	Hazardous waste, for underground deposit {RER} market for hazardous waste, for underground deposit Cut-off, U
Gallio a riciclo interno	1.10	kg	Processo vuoto
Lingotto monocristallino GaAs	22.75	kg	Assunta efficienza di processo 91%
4) Produzione wafer grezzi GaAs			
Input			
Lingotto monocristallino GaAs	68.25	kg	
Filo d'acciaio	264.00	mg	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for Cut-off, U Wire drawing, steel {GLO} market for Cut-off, U
Sega diamantata	0.06	pezzi	Natural gas, high pressure {Europe without Switzerland} market group for Cut-off, U Hydrogen, gaseous {Europe without Switzerland} hydrogen production, gaseous, petroleum refinery operation Cut-off, U Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for Cut-off, U
Fango abrasivo	1.05	kg	Silica sand {GLO} market for Cut-off, U Triethylene glycol {RoW} market for triethylene glycol Cut-off, U
Energia elettrica	35.00	kWh	Electricity, low voltage {DE} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U
Output			
Arsenico a smaltimento	20.50	kg	Hazardous waste, for underground deposit {RER} market for hazardous waste, for underground deposit Cut-off, U
Gallio a riciclo interno	7.48	kg	Gallium, recycling of gallium - RSE
Acciaio a smaltimento	264	kg	Scrap steel {Europe without Switzerland} market for scrap steel Cut-off, U

Disco diamantato a smaltimento	20.2	kg	Inert waste {Europe without Switzerland} market for inert waste Cut-off, U
Refluo a trattamento	10.5	dm ³	Wastewater from PV cell production {RoW} treatment of wastewater from PV cell production, capacity 5E9l/year Cut-off, U
Wafer grezzi GaAs 6"	300.00	pezzi	Assunta efficienza di processo 59%
5) Incisione wafer			
Input			
Wafer grezzi GaAs 6"	300.00	pezzi	
Acqua ultrapura	300.00	kg	Water, ultrapure {RER} market for water, ultrapure Cut-off, U
H ₂ O ₂	4.35	kg	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER} market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state Cut-off, U
HF	3.45	kg	Hydrogen fluoride {RER} market for hydrogen fluoride Cut-off, U
Energia elettrica	10.00	kWh	Electricity, low voltage {DE} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U
Output			
Refluo a trattamento	307.8	dm ³	Wastewater from PV cell production {RoW} treatment of wastewater from PV cell production, capacity 5E9l/year Cut-off, U
Wafer incisi GaAs 6"	300.00	pezzi	Assunta efficienza di processo 100%
6) Pre-lucidatura wafer			
Input			
Wafer grezzi GaAs 6"	30.00	pezzi	
Tampone per lucidatura	3.14	g	Polyurethane, rigid foam {RER} market for polyurethane, rigid foam Cut-off, U
Fango abrasivo	10.10	kg	Silica sand {GLO} market for Cut-off, U Triethylene glycol {RoW} market for triethylene glycol Cut-off, U
Energia elettrica	3.30	kWh	Electricity, low voltage {DE} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U
Output			
Arsenico a smaltimento	0.5	kg	Hazardous waste, for underground deposit {RER} market for hazardous waste, for underground deposit Cut-off, U
Tampone a smaltimento	3.14	g	Inert waste {Europe without Switzerland} market for inert waste Cut-off, U incineration, with energy recovery Cut-off, U
Refluo a trattamento	10.10	dm ³	Wastewater from PV cell production {RoW} treatment of wastewater from PV cell production, capacity 5E9l/year Cut-off, U
Wafer GaAs 6" prelucidati	30.00	pezzi	Assunta efficienza di processo 100%
7) Lucidatura wafer			
Input			
Wafer GaAs prelucidati	6.00	pezzi	
Tampone per lucidatura	1.26	g	Polyurethane, rigid foam {RER} market for polyurethane, rigid foam Cut-off, U Water, ultrapure {RER} water production, ultrapure Cut-off, U

			Potassium hydroxide {RER} production Cut-off, U
Abrasivo CMP (chemical mechanical polishing)	1.60	kg	Silica sand {RoW} production Cut-off, U
Energia elettrica	3.30	kWh	Electricity, low voltage {DE} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U
Output			
Arsenico a smaltimento	0.50	kg	Hazardous waste, for underground deposit {RER} market for hazardous waste, for underground deposit Cut-off, U
Fango abrasivo a smaltimento	1.60	kg	Wastewater from PV cell production {RoW} treatment of wastewater from PV cell production, capacity 5E9l/year Cut-off, U
Wafer GaAs 6" lucidati	6.00	pezzi	Assunta efficienza di processo 100%
8) Pulizia e controllo qualità			
Wafer GaAs 6" lucidati	100	pezzi	
Acqua ultrapura	100	kg	Water, ultrapure {RER} water production, ultrapure Cut-off, U
Idrossido di potassio	6.7	kg	Potassium hydroxide {RER} production Cut-off, U
Energia elettrica	20	kWh	Electricity, low voltage {DE} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U
Output			
Arsenico a smaltimento	0.5	kg	Hazardous waste, for underground deposit {RER} market for hazardous waste, for underground deposit Cut-off, U
Refluo a trattamento	106.7	dm ³	Wastewater from PV cell production {RoW} treatment of wastewater from PV cell production, capacity 5E9l/year Cut-off, U
Wafer GaAs 6" finiti	100	pezzi	

Per la modellazione dell'arsenico sono stati utilizzati i dati di impatto ambientale presenti nel dataset ProBas [16] relativi alla produzione dell'arsenico con grado di purezza 2N. Per ottenere il grado di purezza 7N richiesto dal processo MOCVD è stato considerato un processo aggiuntivo di purificazione, come riportato in [4], considerando un'efficienza di processo del 68%.

Tabella 16 Modellazione del processo di purificazione da As 2N ad As 7N

Dataset	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Arsenico metallico 2N	5	kg	Arsenic, metallic (2N) {GLO} production from copper Cut-off, U
Idrogeno	0.32	kg	Hydrogen, liquid {RoW} market for Cut-off, U
Argon	0.16	kg	Argon, liquid {RoW} market for argon, liquid Cut-off, U
Elettricità	27.6	kWh	Electricity, medium voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Arsenico grado semiconduttore (7N)	3.4	kg	Arsenic, semi-conductor grade (7N) {GLO} production

Residui di reazione		kg	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, U
---------------------	--	----	---

Anche per il gallio. presente in ecoinvent con grado 6N, è stato considerato il processo di purificazione al grado 7N come in [4], ed un'efficienza di processo del 70%.

Tabella 17 Modellazione del processo di purificazione da Ga 6N a Ga 7N

Dataset	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Gallio 6N	5	kg	Gallium, semiconductor-grade {GLO} production Cut-off, U
Elettricità	20	kWh	Electricity, medium voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Gallio 7N	3.5	kg	Gallium, semiconductor-grade 7N {GLO} production Cut-off, U
Residui di reazione	1.5	kg	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, U

6.2 TMAI (trimetilalluminio)

Per la modellazione del trimetilalluminio sono stati presi come riferimento i dati riportati in [13]. La produzione di TMAI prevede la produzione di TMAI al 98% a partire da sesquicloruro di metile alluminio. Nelle tabelle seguenti si riportano i dati di inventario e di database utilizzati.

Tabella 18 Modellazione del processo di produzione del sesquicloruro di metile alluminio.

Flusso	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Cloruro di alluminio	1.62	kg	Aluminium chloride {GLO} market for aluminium chloride Cut-off, U
Alluminio 4N	26.16	kg	Aluminium, wrought alloy {GLO} market for Cut-off, U
Metilcloruro	73.70	kg	Methylchloride {RoW} production Cut-off, U
Elettricità	255.03	Wh	Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Sesquicloruro di metile alluminio	100	kg	Methyl aluminium sesquichloride {GLO}, production Cut-off, U Assunta efficienza di processo 100%
Metano in aria	2.3	kg	Methane
Cloro in aria	2.3	kg	Chlorine

Tabella 19 Modellazione del processo di produzione del trimetilalluminio (purezza 98%)

Flusso	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Sesquicloruro di metile alluminio	82.6	kg	Methyl aluminium sesquichloride {GLO}, production Cut-off, U
Potassio/Sodio	27	kg	Sodium {GLO} market for Cut-off, U
Azoto	0.825	kg	Nitrogen, liquid {RoW} market for Cut-off, U
Solvente n-decano	0.153	kg	Xylene {RoW} market for xylene Cut-off, U

Elettricità	5.190	Wh	Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Trimetilalluminio purezza 98%	30	kg	
Residui di reazione	89.3	kg	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, U

Tabella 20 Modellazione del processo di produzione del trimetilalluminio (purezza 99.95%)

Flusso	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Trimetilalluminio purezza 98%	100	kg	
Sodio metallico 3N	20	kg	Sodium {GLO} market for Cut-off, U
Elio	0.4	kg	Helium {GLO} market for Cut-off, U
Elettricità	560	Wh	Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Trimetilalluminio purezza 99.95%	60	kg	
Residui di reazione	60	kg	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, U

6.3 TMGa (Trimetilgallio)

Il TMAI viene utilizzato come precursore sia per la produzione del TMGa che del TMIn. Si riportano in Tabella 21 i dati relativi alla produzione del TMGa [4].

Tabella 21 Modellazione del processo di produzione del trimetilgallio (purezza 99%)

Flusso	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Trimetilalluminio purezza 99.95%	2.53	kg	
Cloruro di gallio	3.94	kg	Gallium, semiconductor-grade {GLO} market for Cut-off, U Chlorine, gaseous {RoW} market for Cut-off, U Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Cloruro di sodio	2	kg	Sodium chloride, powder {RoW} production Cut-off, U
Elettricità	280	Wh	Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Trimetilgallio purezza 99%	2.5	kg	
Residui di reazione	6	kg	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, U

6.4 TMIn (Trimetilindio)

Si riportano in Tabella 21 i dati relativi alla produzione del TMIn, come da [4].

Tabella 22 Modellazione del processo di produzione del trimetilindio (purezza 99%)

Flusso	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Trimetilalluminio purezza 99.95%	334.4	g	
Cloruro di indio	521	g	Indium {GLO} market for Cut-off, U Chlorine, gaseous {RoW} market for Cut-off, U Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Cloruro di sodio	269	g	Sodium chloride, powder {GLO} production Cut-off, U
Elettricità	280	Wh	Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Trimetilindio purezza 99%	250	g	
Residui di reazione	550	g	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, U

6.5 DEZn (dietilzinco)

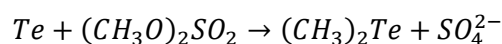
Il dietilzinco è stato modellato a partire dalla reazione tra ioduro di etile e bromuro di etile, con catalizzatore costituito dalla coppia zinco rame. La reazione e le quantità di reagenti sono state ricavate da [14]. L'energia elettrica consumata è assunta pari a quella richiesta per la produzione del trimetilindio e il trimetilgallio.

Tabella 23 Modellazione del processo di produzione del dietilzinco

Flusso	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Ioduro di etile	78	g	Methyl iodide {GLO} market for Cut-off, U
Bromuro di etile	54.4	g	Ethylene bromide {GLO} market for Cut-off, U
Coppia rame/zinco	130	g	120g Zinc {GLO} market for Cut-off, U 10g Copper oxide {GLO} market for Cut-off, U
Energia elettrica	280	Wh	Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Dietilzinco	53	g	Efficienza processo 86%
Scarti di reazione	209.4	g	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, U

6.6 DETe (dietiltellurio)

Per la modellazione del dietiltellurio è stato creato un nuovo processo relativo al dimetiltellurio, utilizzato come composto proxy utilizzabile al posto del DETe, essendo anch'esso usato come dopante nell'industria dei semiconduttori. Sono stati quantificati i reagenti sulla base della reazione stechiometrica tra tellurio elementare e dimetilsolfato. L'energia elettrica consumata è assunta pari a quella richiesta per la produzione del trimetilindio e il trimetilgallio [15].



Flusso	Quantità	U.M.	Dataset
Input			
Tellurio	52.0	g	Tellurium, semiconductor-grade {GLO} market for Cut-off, U
Dimetilsolfato	126.0	g	Dimethyl sulfate {RoW} market for dimethyl sulfate Cut-off, U
Energia elettrica	280	Wh	Electricity, low voltage {GLO} market group for Cut-off, U
Output			
Dimetiltellurio	136	g	Assunta efficienza 86% come dietilzinco
Scarti di reazione	42.5	g	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, U

6.7 Ta_2O_5 (pentossido di tantalio)

La produzione del Ta_2O_5 è stata modellata a partire dal dataset presente in ecoinvent “Tantalum powder, capacitor-grade {RoW}| tantalum powder production, capacitor-grade | Cut-off, U”. Per la produzione di tantalio puro è infatti necessario sottoporre a riduzione con magnesio il pentossido di tantalio puro. Il dataset di ecoinvent è stato modificato eliminando i flussi in input e output relativi al processo di riduzione con magnesio e riportando l’output alla quantità di Ta_2O_5 prodotta, ovvero 1,22 kg.