

Ricerca di Sistema elettrico



Realizzazione e validazione di un prototipo di generatore termoelettrico operante in regime dinamico (LA1.6)

Dario Narducci



Realizzazione e validazione di un prototipo di generatore termoelettrico operante in regime dinamico

REALIZZAZIONE E VALIDAZIONE DI UN PROTOTIPO DI GENERATORE TERMoeLETTRICO OPERANTE IN REGIME DINAMICO (LA1.6)

D. Narducci

Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università degli Studi di Milano Bicocca

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: *1.4 Materiali di frontiera per usi energetici*

Linea di attività: LA1.6

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile del Work Package: Francesca Di Benedetto

Responsabile Linea di Attività: Università degli Studi di Milano Bicocca - Dipartimento di Scienza dei Materiali

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 36

Mese fine previsto: 13

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "LA 1.5: Analisi dell'efficienza a massima potenza di generatori termoelettrici operanti in regime dinamico", "LA 1.6: Realizzazione e validazione di un prototipo di generatore termoelettrico operante in regime dinamico"

Indice

1	Risultati attesi	4
	Lista dei risultati attesi per la Linea di Attività 1.6	4
2	Risultati ottenuti	4
	Lista dei risultati ottenuti per la Linea di Attività 1.6	4
3	Prodotti attesi	5
4	Prodotti sviluppati	5
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	5
6	Sintesi delle attività svolte	5
7	Dettaglio delle attività svolte	5
	Preparazione di film sottili di silicio nanocristallino fortemente drogato boro con tecniche di sputtering	5
	Preparazione di nanopillar di silicio monocristallino con tecniche di attacco chimico in soluzione	8
	Creazione di contatti ohmici su nanopillar di silicio con tecniche di deposizione elettrochimica	8
	Realizzazione di strutture autosupportate di nanofili di silicio	9
	Realizzazione di modulatori termici	9
	Realizzazione di un prototipo di laboratorio di generatore termoelettrico impiegante silicio come materiale termoelettrico operante in condizioni dinamiche	10
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte	11
9	Pubblicazioni scientifiche	11
10	Eventi di disseminazione	11

Indice delle figure

Figura 1: Micrografia TEM di film di silicio cresciuto su Si ossidato. La nanodiffrattometria evidenzia la formazione di nanocristalli in una matrice di Si amorfo.	7
Figura 2: Diffrattogramma di un film di Si cresciuto per evaporazione assistita da fascio elettronico e trattato termicamente fino a 800 °C. I riflessi in nero sono assegnati al film di silicio, quelli in rosso al substrato di allumina.	8
Figura 3. Micrografia SEM di strutture di nanofili autosupportati. La barra corrisponde ad una lunghezza di 100 µm	9

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi per la Linea di Attività 1.6

1. Metodologia di preparazione di film sottili di silicio nanocristallino fortemente drogato boro con tecniche di sputtering
2. Preparazione di nanopillar di silicio monocristallino con tecniche di attacco chimico in soluzione
3. Protocollo per la creazione di contatti ohmici su nanopillar di silicio con tecniche di deposizione elettrochimica da soluzione
4. Realizzazione di modulatori termici
5. Realizzazione di un prototipo di laboratorio di generatore termoelettrico impiegante silicio come materiale termoelettrico operante in condizioni dinamiche

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti per la Linea di Attività 1.6

1. Metodologia di preparazione di film sottili di silicio nanocristallino fortemente drogato boro con tecniche di sputtering: sono stati messi a punto protocollo di crescita sia per sputtering sia per evaporazione di silicio nanocristallino a livelli di drogaggio variabili (da virtualmente intrinseco a fortemente drogato)
2. Preparazione di nanopillar di silicio monocristallino con tecniche di attacco chimico in soluzione: usando la tecnica MACE (Metal-Assisted Chemical Etching) sono stati ottenuti nanopillar di silicio sia di tipo n sia di tipo p. Per la prima volta è stato possibile realizzare con il MACE nanopillar di silicio di tipo p con drogaggio $\geq 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, dimostrando la possibilità di realizzare sistemi termoelettrici di recupero di calore senza ricorrere a materiali a ridotta geodisponibilità (tellururi)
3. Protocollo per la creazione di contatti ohmici su nanopillar di silicio con tecniche di deposizione elettrochimica da soluzione: sono stati realizzati contatti ohmici (lineari) attraverso la crescita di contatti in Cu localizzati sulle punte dei nanopillar usando tecniche di deposizione da soluzione (per via elettrochimica)
4. Realizzazione di strutture autosupportate di nanofili di silicio (non previsto in capitolato): sempre con la tecnica MACE e controllando l'aggregazione tra nanofili indotta dalle forze di capillarità sono stati ottenuti 'cuscinetti' di nanofili orientati non supportati da membrane residuali di silicio massivo
5. Realizzazione di modulatori termici: sono stati vagliate le tecniche riportate in capitolato per indurre una modulazione sinusoidale del flusso termico in ingresso al generatore termoelettrico, individuando una soluzione attiva che non incrementasse la potenza consumata rispetto al caso statico
6. Realizzazione di un prototipo di laboratorio di generatore termoelettrico impiegante silicio come materiale termoelettrico operante in condizioni dinamiche: è stato messo a punto un prototipo di laboratorio di generatore termoelettrico basato su nanopillar di Si supportati (gamba singola) che è stato caratterizzato in condizioni dinamiche, validando preliminarmente il modello di generazione termoelettrica dinamica sviluppato in LA1.5.

3 Prodotti attesi

1. Prototipo di laboratorio di generatore termoelettrico impiegante silicio come materiale termoelettrico operante in condizioni dinamiche
2. Relazione tecnica

4 Prodotti sviluppati

1. Prototipo di laboratorio (proof-of-concept) di generatore termoelettrico impiegante silicio come materiale termoelettrico operante in condizioni dinamiche
2. Relazione tecnica comprensiva della estensione del modello di generazione termoelettrica in regime dinamico a sorgenti di calore stazionarie (non prevista in capitolato)

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nessuno scostamento.

6 Sintesi delle attività svolte

È stata esplorata la possibilità di crescere film di Si nanocristallino drogati B con tecniche di PVD (sputtering e evaporazione assistita con fascio elettronico), depositando con successo Si e B per co-evaporazione su substrati di Al_2O_3 e sottoponendo i film a trattamenti termici a 800 °C.

Sono stati ottenuti nanopillar di Si con tecniche di metal-assisted chemical etching (MACE) sui quali sono stati realizzati contatti ohmici per deposizione elettrochimica. La tecnica MACE ha anche permesso di ottenere strutture autosupportate di nanofili di Si.

Per la modulazione dei flussi termici è stata dimostrato l'impiego di dissipatori convettivi al lato freddo della sorgente di calore in cui il flusso di refrigerante è modulato nel tempo. Tale soluzione ha portato alla realizzazione di un prototipo di laboratorio operante in condizioni dinamiche di generatore termoelettrico impiegante Si come materiale termoelettrico. È stato preliminarmente confermato l'incremento di potenza generata.

7 Dettaglio delle attività svolte

Preparazione di film sottili di silicio nanocristallino fortemente drogato boro con tecniche di sputtering

L'obiettivo di questa parte dell'attività è stata quella di mettere a punto una metodologia di deposizione di film nanocristallini di silicio fortemente droganti in un ambiente di crescita esente da idrogeno, di modo da evitare il suo inglobamento in Si durante la crescita del film.

Negli anni passati questo gruppo di ricerca aveva dimostrato come in film fortemente drogati con boro, in seguito a trattamenti termici ad alta temperatura (1000 °C), si verificasse la precipitazione di una seconda fase (SiB_x) in corrispondenza dei bordi di grano. Tali precipitati generano delle barriere di energia potenziale dell'ordine di 50 meV che agiscono da filtro per i portatori di carica in base alla loro energia (energy filtering). Solo i portatori con energia sufficientemente elevata riescono a diffondere al di sopra di queste barriere, mentre quelli con energia minore rimangono confinati nei grani. Ciò porta ad una riduzione della densità dei portatori di carica e quindi ad un aumento del coefficiente Seebeck. Per converso, nonostante la concentrazione di portatori di carica (p) diminuisca, la mobilità μ dei portatori che riescono a superare le barriere aumenta, e quindi la conducibilità elettrica del materiale $\sigma = qp\mu$ aumenta. In presenza di idrogeno disciolto nel film, il boro viene complessato dall'idrogeno formando specie $(\text{BH}_n)_m$ che riducono il boro libero - e quindi la sua precipitazione ai bordi di grano - rendendo quindi meno efficace l'energy filtering dei portatori di carica.

La prima sperimentazione condotta ha fatto uso di tecniche di (co)sputtering, partendo sia da target di Si intrinseco e B sia da target di Si:B e B, in collaborazione con il CSIC di Madrid (Spagna). Per comparazione, sono stati anche ottenuti a Milano campioni costituiti da un substrato di silicio monocristallino (n-type) sul quale è stato cresciuto uno strato di ossido termico (125 nm) mediante Dry-Oxidation e su cui è stato poi depositato un film sottile di silicio nanocristallino (200 nm) mediante evaporazione assistita da fascio elettronico. Lo stato di ossido di silicio è necessario per isolare elettricamente il substrato di silicio monocristallino dal film di silicio nanocristallino. Per il drogaggio dei campioni sono state usate due procedure differenti. La prima prevedeva una deposizione di due strati dello spessore di 100 nm di silicio separati da un sottile strato di boro dello spessore di 2 nm. La seconda, invece, prevedeva una co-deposizione di silicio e boro contenuti nello stesso crogiolo. Su entrambe le tipologie di campioni sono stati effettuati trattamenti termici di due ore ad una temperatura di 1000°C in atmosfera di argon al fine di favorire la precipitazione di SiB_x al fine di attivare l'energy filtering. I film sono stati caratterizzati elettricamente effettuando misurazioni di conducibilità elettrica (caratteristiche corrente-tensione) e sottoposti ad analisi tramite microscopia elettronica a scansione SEM e tramite microscopia elettronica a trasmissione TEM (in collaborazione con l'Università di Aix-Marseille, Francia). I risultati conseguiti hanno mostrato come entrambe le procedure di preparazione abbiano portato alla realizzazione delle strutture progettate. In entrambe le classi di film è stata osservata l'attesa diffusione di boro a seguito dei trattamenti termici. Come osservato tramite nanodiffrattometria, i trattamenti termici hanno portato solo alla parziale e locale ricristallizzazione del silicio, con la formazione di una matrice amorfa contenente nanograni dell'ordine di una decina di nanometri (Figura 1). Le caratterizzazioni elettriche sono risultate congruenti con tali evidenze, mostrando densità efficaci di boro comprese tra 10^{15} e 10^{17} cm^{-3} .

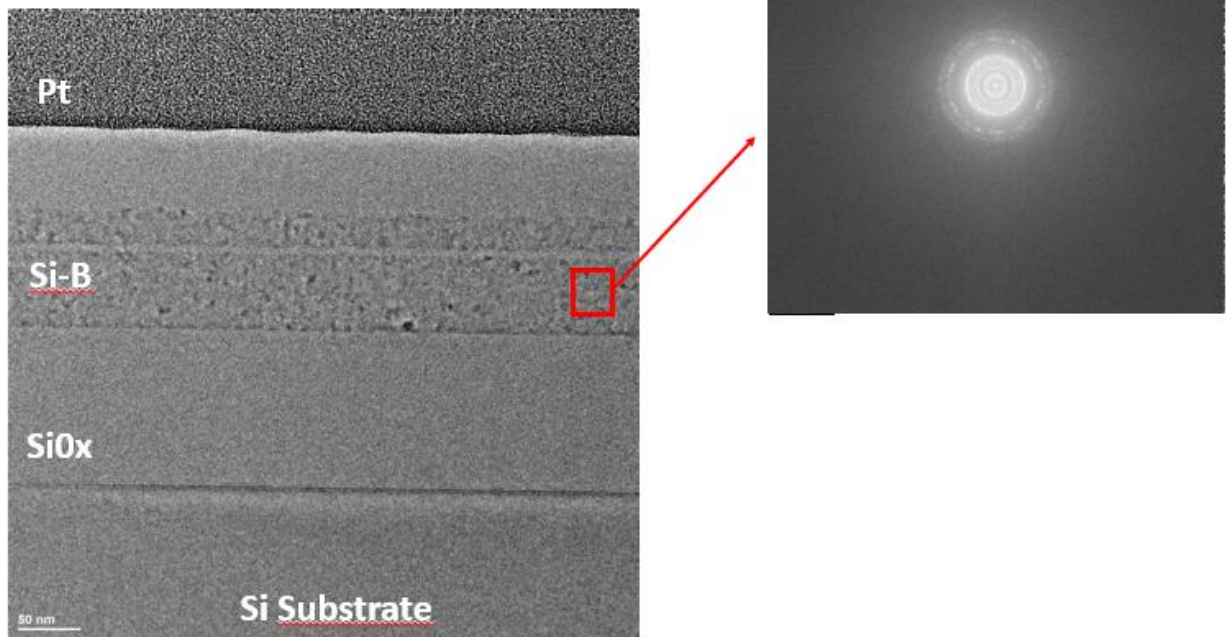


Figura 1: Micrografia TEM di film di silicio cresciuto su Si ossidato. La nanodiffrattometria evidenzia la formazione di nanocristalli in una matrice di Si amorfo.

Ulteriore sperimentazione è stata condotta scegliendo substrati cristallini in luogo dell'ossido termico. In particolare, si è studiata la crescita di film su allumina policristallina, in considerazione del fatto che è possibile depositare strati epitassiali di Si su zaffiro (Al_2O_3 monocristallina). Mentre i film depositati senza controllo di temperatura (quindi a temperature del substrato stimate intorno ai $200\text{ }^\circ\text{C}$) risultano ancora amorfi, un trattamento termico prolungato con profili di riscaldamento lenti (quattro step di riscaldamento successivi della durata di 30 minuti l'uno a 200 , 400 , 600 e $800\text{ }^\circ\text{C}$ in Ar) ha portato ad ottenere l'obiettivo previsto di depositare film di Si nanocristallino con tecniche di crescita esenti da idrogeno. Il diffrattogramma del film è riportato in Figura 2.

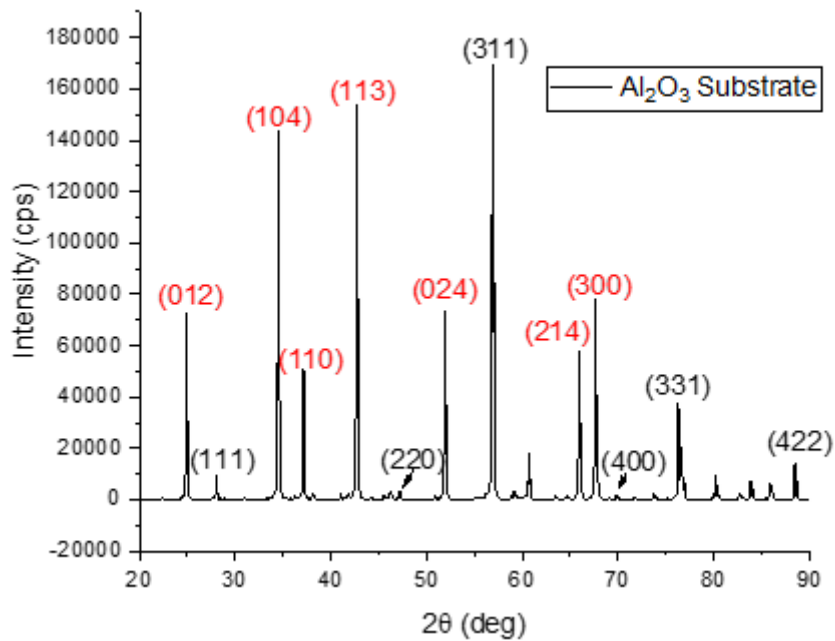


Figura 2: Diffratogramma di un film di Si cresciuto per evaporazione assistita da fascio elettronico e trattato termicamente fino a 800 °C. I riflessi in nero sono assegnati al film di silicio, quelli in rosso al substrato di allumina.

Preparazione di nanopillar di silicio monocristallino con tecniche di attacco chimico in soluzione

La tecnica MACE si è ampiamente affermata nell'ultimo decennio come una metodica particolarmente semplice ed efficiente per realizzare nanopillar di Si (nanofili protrusi normalmente al substrato) senza ricorrere a tecnologie di alto vuoto. In estrema sintesi, il MACE si basa sull'incremento del rateo di attacco chimico da parte di una soluzione contenente una specie ossidante e HF in presenza o in assenza di un catalizzatore metallico (Ag, Au, Cu, Pt). Tale catalizzatore può essere depositato sulla superficie di silicio con tecniche fisiche (evaporazione, sputtering) o chimiche (riduzione di opportuni sali). I processi di formazione delle nanoparticelle catalitiche e di attacco localizzato di Si possono decorrere usando due diverse soluzioni o una unica soluzione.

La sperimentazione condotta ha fatto uso sia della procedura a singola soluzione (usando HF e AgNO_3) sia di quella a due soluzioni ($\text{AgNO}_3 + \text{HF}$ e $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF}$). Per la realizzazione di nanopillar tipo p su silicio drogato 10^{20} cm^{-3} si è invece proceduto depositando Au per evaporazione e impiegando una soluzione di $\text{NaS}_2\text{O}_8 + \text{HF}$ per l'etching. Sono così stati ottenute 'foreste' di nanopillar con lunghezza variabile tra 1 e 20 μm . Si è ulteriormente messo a punto un protocollo per controllare l'aggregazione dei nanopillar dovuto allo sviluppo di forze di capillarità nella fase di asciugatura (estrazione del campione dalla soluzione).

Creazione di contatti ohmici su nanopillar di silicio con tecniche di deposizione elettrochimica

La realizzazione di contatti elettrici sulle punte dei nanopillar è resa complessa dalla necessità di evitare che il metallo ricopra anche lateralmente i nanopillar, determinando cortocircuiti tra le punte dei nanopillar e il substrato. A questo fine, per la realizzazione di contatti ohmici su nanopillar di silicio è stata implementata una procedura di letteratura che prevede una prima evaporazione di due strati ultrasottili (discontinui) di Cr e Cu che agiscono da elettrodi per la

successiva deposizione per via elettrochimica del contatto di Cu. Il processo viene condotto in condizioni fortemente non di equilibrio, portando alla crescita preferenziale di Cu sulla punta de nanopillar, ragionevolmente a causa del maggiore valore del campo elettrico sulle punte dei pillar. Le strutture così realizzate sono state impiegate per la caratterizzazione dei contatti stessi (caratteristiche corrente-tensione) e per la misurazione della conduttanza elettrica dei nanopillar stessi.

Realizzazione di strutture autosupportate di nanofili di silicio

In linea di principio, la tecnica MACE consente di ottenere nanopillar di lunghezza arbitraria, l'unica limitazione fisica essendo banalmente lo spessore del wafer di silicio impiegato. Nel corso di uno studio dei ratei di attacco in funzione del drogaggio del materiale è stato osservato come, inaspettatamente, se il processo MACE porta alla completa rimozione del materiale massivo, i nanopillar restino aggregati tra loro e la struttura che viene realizzata presenti una buona stabilità meccanica all'applicazione di pressioni normali al piano della struttura stessa. Tali strutture autosupportate costituiscono un risultato di notevole interesse tecnologico. Partendo da wafer di silicio spessi (1-2 mm) è possibile, infatti, realizzare strutture del tutto analoghe alle convenzionali gambe termoelettriche impiegate nei dispositivi commerciali -- ma integralmente costituite da nanofili di silicio, la cui efficienza termoelettrica (diversamente che per il silicio massivo) è comparabile con gli standard tecnologici correnti (tellururi).

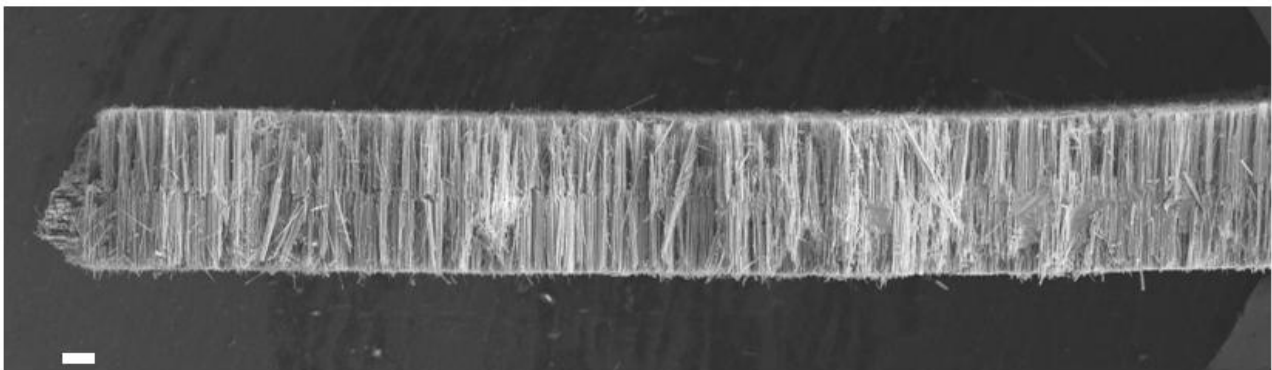


Figura 3. Micrografia SEM di strutture di nanofili autosupportati. La barra corrisponde ad una lunghezza di 100 μm

Realizzazione di modulatori termici

L'implementazione di generatori termoelettrici dinamici prevede o la disponibilità di sorgenti di calore nativamente modulate nel tempo o di strategie atte a determinare la modulazione della temperatura a partire da sorgenti di calore nativamente costanti nel tempo.

È stata analizzata la fattibilità della realizzazione di modulatori di calore riportati in capitolato, anche in relazione ai consumi di potenza ad essi associati. Relativamente ai sistemi passivi (buzzers), la simulazione numerica dei dispositivi ha mostrato come, indipendentemente dalla frequenza operativa desiderata, tali sistemi richiedano la realizzazione di strutture meccaniche ad altissima precisione (tolleranza massima dell'ordine del micrometro), a ragione dei coefficienti di dilatazione termica caratteristici dei metalli ($\approx 10^{-5}$). Per converso, i sistemi magnetocalorici, al di là della complessità realizzativa, operano efficacemente solo su intervalli di temperatura molto ristretti, limitando significativamente le possibilità di validazione dei sistemi in funzione della ampiezza di modulazione termica. Si è pertanto valutata una strategia alternativa, basata non sulla modulazione termica del flusso

termico/temperatura del lato caldo del generatore termoelettrico ma sulla modulazione del flusso termico in uscita (dissipato) dalla sorgente di calore. Trascurando la dissipazione laterale del calore, il sistema pseudo-1D include ora la sorgente di calore come parte del circuito termico. La corrente di calore da convertire non è più trattata come fornita da un dissipatore ma come proveniente da una fonte, dove il calore è generato da un processo primario a potenza costante. L'energia termica viene quindi parzialmente dissipata dalla fonte di calore verso l'ambiente attraverso uno scambiatore convettivo modulato nel tempo con un coefficiente di scambio termico $h_H(t) = h_H^{(0)} + h_H^{(1)} \sin(\omega t)$. Il lato freddo TEG è impostato sulla temperatura ambiente. Questo modo di modellare il sistema ha il vantaggio di consentire di valutare l'effetto della resistenza termica aggiuntiva dovuta al TEG sulla temperatura della fonte di calore. Come infatti noto, un criterio chiave per la conversione del calore di scarto è quella di non interferire con la fonte di calore, garantendo quindi una dissipazione termica ottimale della fonte termica primaria, ad evitare qualsiasi surriscaldamento che potrebbe derivare dalla resistenza termica aggiuntiva dei TEG. Il massimo incremento di efficienza a massima potenza è stato determinato essere anche maggiore rispetto alla modulazione diretta della temperatura, superando il 50%.

Per quanto riguarda la modulazione del flusso di calore, è necessario sottolineare due punti. Né in base alla modulazione della temperatura né a quella del flusso di calore, il funzionamento dinamico dei TEG provoca un aumento della temperatura media della fonte di calore. Questo è fondamentale nella raccolta del calore, poiché nella maggior parte dei casi la fonte di calore primaria non può funzionare in modo sicuro ed efficiente quando la sua temperatura viene aumentata. Sebbene il funzionamento dinamico TEG causi ovviamente un surriscaldamento temporaneo della fonte di alimentazione primaria, la frequenza di modulazione può essere scelta di modo da mantenere la durata del semi-ciclo ad alta temperatura sufficientemente breve da prevenire il degrado delle prestazioni del processo di generazione del calore. Inoltre, sebbene gli scambiatori di calore convettivi siano componenti attivi che utilizzano energia per prelevare calore dalla fonte primaria, la modulazione del loro coefficiente di scambio termico non determina un consumo energetico aggiuntivo, dato che il consumo di energia dello scambiatore scala linearmente con il coefficiente di scambio termico.

Sulla scorta di queste considerazioni è stato pertanto disegnato e realizzato uno scambiatore convettivo che utilizza acqua come fluido di raffreddamento e operante con portate variabili nel tempo. Tale dispositivo, unitamente ad una sorgente di calore a potenza fissata, è servito per una prima validazione del sistema.

Realizzazione di un prototipo di laboratorio di generatore termoelettrico impiegante silicio come materiale termoelettrico operante in condizioni dinamiche

Il prototipo di laboratorio è stato realizzato impiegando come gamba termoelettrica una foresta di nanopillar di silicio supportati di tipo p con drogaggio 10^{18} cm^{-3} contattati con rame con la procedura sopra illustrata e isolati elettricamente da due lamelle di allumina sinterizzata. Un resistore da 2 W inserito in un contenitore metallico ha simulato la sorgente di calore a potenza costante, garantendo una ridotta capacità termica della sorgente. Sul lato superiore del contenitore è stata posizionata una serpentina metallica attraverso la quale è stata fatta circolare acqua fredda, con una portata determinata da una pompa circolare. Il substrato di silicio ha operato come lato caldo del generatore (tra 50 e 70 °C) mentre le punte

dei nanopillar (contattati) sono stati posti in contatto con una piastra termostata a 30 °C (lato freddo).

Il sistema così costituito è stato operato sia in modalità statica (portata dell'acqua di raffreddamento costante) sia in modalità dinamica, e sono state misurate in entrambi i casi le potenze elettriche generate (in corrente continua e, nel caso dinamico, in corrente alternata). La sperimentazione è stata condotta alla frequenza di 0.1 Hz.

Dato il limitato controllo delle dissipazioni termiche laterali e delle resistenze termiche di contatto e l'impossibilità di determinare i flussi termici in ingresso e in uscita, si è optato per una misurazione comparativa (relativa) delle potenze generate in regime statico e dinamico. I risultati conseguiti, per quanto preliminari, hanno confermato un incremento della potenza totale generabile. Specificamente, le componenti in continua della potenza elettrica misurate a portata fissata e a portata modulata sono risultate confrontabili tra loro. La potenza a.c. (ovviamente assente in modalità stazionaria) è risultata pari a circa il 10-15% della potenza in d.c..

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

La Linea di Attività 1.6 non ha richiesto consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

D. Narducci, F. Giulio, A. Mazzacua, 'Dynamic Thermoelectric Generation Enables 50% Increase of Efficiency at Maximum Power', *Materials Today Physics*, **54** (2025) 101713.

F. Giulio, A. Mazzacua, L. Calciati, D. Narducci, 'Fabrication of Metal Contacts on Silicon Nanopillars: The Role of Surface Termination and Defectivity', *Materials*, **17** (2024) 1549.

F. Giulio, L. Puccio, S. Magagna, A. Perego, A. Mazzacua, D. Narducci, 'Self-Sustained Quasi-1D Si Nanostructures for Thermoelectric Applications', *ACS Applied Electronic Materials*, **6** (2024), 2917–2924.

10 Eventi di disseminazione

1. Giornate per la termoelettricità 2023, Trento, 13-14 febbraio 2023
 - 1.1 D. Narducci, Time Modulation of the Temperature Gradient Doubles the Efficiency at Maximum Power of Thermoelectric Generators
 - 1.2 F. Giulio, S. Magagna and D. Narducci, Control of the agglomeration of silicon nanowires for thermoelectric applications
2. 2023 International Conference on Thermoelectrics, Seattle (USA), 21-25 Giugno 2023
(invited) D. Narducci, Time Modulation of the Temperature Difference Almost Triples the Efficiency at Maximum Power of Thermoelectric Generators
3. 2023 European Conference on Thermoelectrics, Praga (Repubblica Ceca), 17-21 Settembre 2023

- 3.1 F. Giulio, D. Narducci, Understanding the Mechanism of Metal-Assisted Chemical Etching to Optimize Thermoelectric Devices Based on Si Nanopillars
- 3.2 D. Narducci, Dynamic Thermoelectric Generators: Increased Efficiency at Maximum Power by Modulation of Heat Fluxes

- 4. Giornate per la termoelettricità 2024, Genova, 13-14 febbraio 2024
- 4.1 F. Giulio, D. Narducci, Embedding and Metal Contacts Deposition on Crystalline Silicon Nanofelts for Thermoelectric Applications
- 4.2 D. Narducci, Stationary and Dynamic Efficiency at Maximum Power of Thermoelectric Generators Operated Under General Boundary Conditions

- 5. 2024 International Conferences on Thermoelectrics -- European Conferences on Thermoelectrics, Cracovia (Polonia), 1-4 luglio 2024
- 5.1 F. Giulio, A. Mazzacua, L. Calciati, D. Narducci, Structural and Electrical Characterization of Encapsulated Aligned Si Nanowires Obtained by Metal-Assisted Chemical Etching
- 5.2 D. Narducci, Enhanced Efficiency at Maximum Power of Thermoelectric Generators Operated Under Generalized Dynamic Boundary Conditions