

## GENERATORI TERMOELETTRICI PER ALIMENTARE LE RETI "CORPOREE"

Mieke Van Bavel  
IMEC

*IMEC sperimenta pile realizzate in tecnologia MEMS capaci di recuperare il calore disperso dal corpo umano e trasformarlo in energia elettrica*

I generatori termoelettrici (TEG, ThermoElectric Generator) miniaturizzati possono essere una conveniente soluzione per raccogliere l'energia dispersa dal calore corporeo e riutilizzarla per alimentare le reti "indossabili" di domani (Human Body Area Networks). Queste particolari reti saranno formate da moduli elettronici uniti insieme a sensori e attuatori wireless, con un consumo globale medio non superiore a 100  $\mu$ W per ciascun nodo. È lecito pertanto supporre che questa esigua quantità di potenza si possa ricavare da pochi centimetri quadrati di pelle, ossia le dimensioni tipiche di un modulo elettronico miniaturizzato.

Con l'intenzione di modellare e progettare un TEG efficiente di piccole dimensioni, IMEC ha misurato con accuratezza le proprietà termiche del corpo umano, cercando di capire in che modo potessero essere sfruttate come sorgenti di energia. Usando i risultati di queste sperimentazioni, sono stati progettati e realizzati alcuni prototipi di moduli TEG basati su termocoppie miniaturizzate BiTe reperibili in commercio. Questi prototipi hanno dimostrato di essere in grado di generare una tensione d'uscita sufficiente ad alimentare i sensori wireless di una rete "indossabile".

Intanto proseguono senza sosta le ricer-

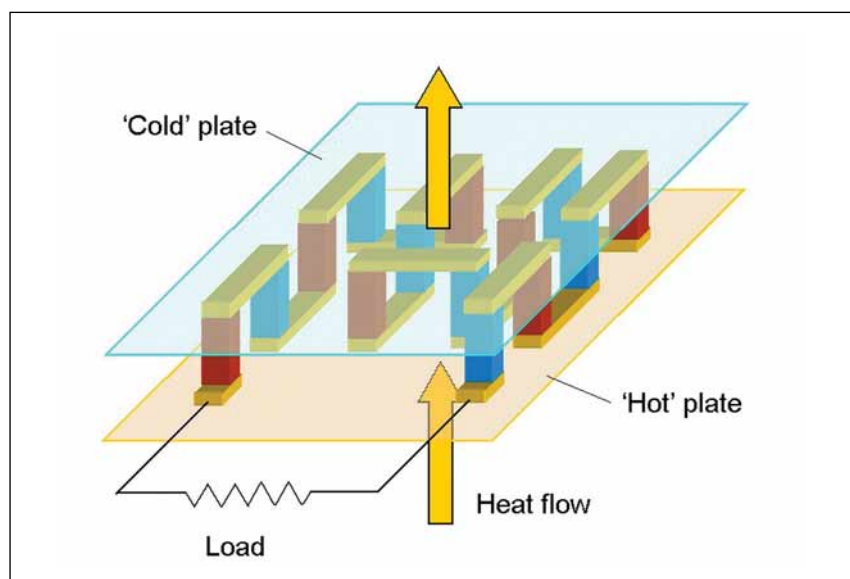


Fig. 1 – Schema di una termopila

che sui TEG di nuova generazione basati su termocoppie micromeccaniche in SiGe, le quali promettono di essere economicamente ancor più convenienti, al punto da far prevedere la prossima possibilità reale per le reti "corporee" di abbandonare definitivamente le batterie di alimentazione tipicamente impiegate nei prodotti consumer, per sostituirle con "riciclatori" di energia efficienti e di piccole dimensioni, tali da poter essere "indossati" e avere un ciclo vitale virtualmente infinito.

### I generatori termoelettrici

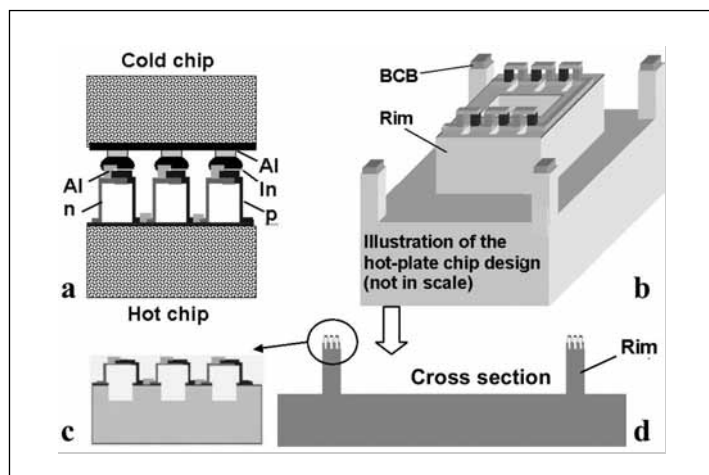
I generatori termoelettrici (TEG), noti anche come "convertitori termoelettrici", sono un'ottima risorsa per generare energia elettrica riutilizzando il calore disperso dalle sorgenti industriali. La loro storia risale al 1823 quando lo scienziato tedesco Seebeck scopriva che una tensione può essere creata utilizzando un anello formato da due diversi metalli, per il solo fatto di applicare alle due giunzioni due differenti temperature. I generatori termoelettrici di oggi si fabbricano con i semiconduttori e possono essere formati da un gran numero di barre miniaturizzate di materiali termoelettrici di tipo P e di tipo N (Fig. 1).

La ragione di questo particolare disegno è che la tensione di Seebeck, ossia la tensione termoelettrica generata dalla termocoppia a causa della differenza di temperatura di un grado fra le giunzioni "calda" e "fredda", generalmente non supera 0,2 mV. Pertanto, gli elementi termoelettrici vanno composti in parallelo per poter ottenere una differenza di temperatura consistente fra le giunzioni e vanno anche messi in serie per poter

generare un voltaggio sufficiente per alimentare i circuiti elettronici.

Realizzati senza parti in movimento, i generatori termoelettrici sono piccoli e assolutamente non inquinanti, ragion per cui per un gran numero di applicazioni possono essere decisamente più convenienti rispetto al ricorso alle tradizionali batterie con i relativi cablaggi di connessione. In realtà, in svariati settori industriali così come in alcune aree della medicina, delle telecomunicazioni e dell'elettronica consumer ci sono molte occasioni nelle quali si formano continuamente dei gradienti termici naturali e dei flussi di calore disponibili per il riutilizzo.

I TEG miniaturizzati ed economici sono di grande interesse per le applicazioni dell'elettronica "indossabile", grazie al fatto che il corpo umano disperde naturalmente molto calore che può essere riutilizzato per alimentare circuiti integrati, sensori e transceiver ai quali basta ben poca potenza per funzionare, generalmente non superiore a qualche mW. Ad esempio, TEG generatori di elettricità sono stati realizzati su montature da polso e utilizzati come alimentatori per gli orologi digitali. IMEC ha dimostrato che i TEG sono da preferire in numerose occasioni, ma soprattutto negli ambienti nei quali le altre fonti di energia rinnovabile, come ad esempio il sole o il vento, non sono disponibili. Non è



**Fig. 2 – Progetto di una termopila "a sandwich" in silicio/germanio policristallino**

però una regola ineluttabile perché i TEG sono in grado di funzionare altrettanto bene anche all'aperto.

IMEC sta sviluppando "cercatori di energia" economici, affidabili e miniaturizzati, basati sulle tecnologie MEMS e utilizzabili per alimentare reti corporee (Body Area Network, BAN). Queste reti sono in fase di sviluppo all'interno del programma IMEC Human++, che consiste nello studio di un set di sensori e attuatori wireless capaci di monitorare le funzioni corporee di chi li indossa. Questi sensori consumano da 50 a 100  $\mu$ W e saranno utili non solo per sorvegliare la salute delle persone, ma anche le prestazioni sportive oppure semplicemente il livello di comfort. È evidente che per questo tipo di applicazioni i TEG sono più piccoli ed economici rispetto alle tradizionali pile.

### Il corpo umano come generatore di calore

Per modellare un TEG su un corpo umano bisogna conoscerne le proprietà termiche. Il calore dissipato dall'uomo è generato in molti modi che coinvolgono i meccanismi di regolazione termica

corporea, l'attività fisica della persona, l'età, i suoi vestiti e le condizioni climatiche. Il corpo umano, in qualità di animale a sangue caldo, ha una distribuzione della temperatura non uniforme che è il risultato della propria attività cardiovascolare e della convezione di aria attorno al corpo. Dunque, la posizione dove installare il dispositivo ha una notevole importanza nel determinare la densità di calore

disponibile per la raccolta e la riconversione in elettricità.

Nei laboratori IMEC, prima di poter modellare e sviluppare i TEG, è stato necessario studiare il flusso di calore attorno alla pelle del corpo umano, nonché le sue caratteristiche termiche. Inoltre, è stato considerato il rischio che la raccolta del calore da parte del TEG potesse provocare una sensazione di scomodità e, dunque, si è studiato anche come rendere il dispositivo più accettabile a chi lo indossa. Questa ricerca è stata condotta su 158 volontari e a tal scopo è stata utilizzata una termopila di "prima generazione", costituita da tre livelli di termopile BiTe classiche sostenute da un radiatore multi-fin convenzionale, con dimensioni di circa  $2 \times 4 \times 4$  cm<sup>3</sup>.

Le conclusioni di questa indagine sono state alquanto interessanti. Innanzitutto è risultato evidente che in caso di forte convezione d'aria (per esempio se la persona cammina oppure quando c'è vento) il calore che fluisce sulla pelle aumenta significativamente. Per aumentare il flusso di calore quando l'aria è ferma, invece, IMEC ha dovuto aggiungere al TEG un piccolo radiatore in modo tale da poter raccogliere l'aria da una superficie molto più estesa di quella del dispositivo stesso. In questo modo diminuisce la resistenza del dispositivo rispetto al flusso d'aria e, quindi, aumen-

**Fig. 3 – (a) Sperimentazione del TEG IMEC di seconda generazione, (b) Il modulo elettronico montato su un cinturino da polso**



ta il calore raccolto. Nell'esperimento, se il generatore viene sostituito con un radiatore puro si può osservare un flusso di calore sette volte maggiore, mentre il calore raccolto in modo totalmente "indolore" dal TEG è maggiore di quello emesso dal corpo umano senza il generatore.

In secondo luogo, il punto del corpo dove si colloca l'apparecchio ha un ruolo decisivo nell'efficienza della raccolta di calore. Per prima cosa va considerato l'effetto positivo dei vestiti che isolano termicamente la maggior parte della superficie corporea, aumentando la temperatura della pelle e permettendo un buon flusso di calore dalle aperture (maniche e collo). Poi occorre valutare la presenza delle arterie che causano significative variazioni di calore da un punto a un altro del corpo. In pratica, il sistema cardiovascolare influisce sia sulla densità di flusso del calore, sia sulla resistenza termica che s'instaura nel corpo fra le sue parti interne e la sua

superficie epidermica. Per questa ragione, l'arteria radiale del polso è ideale per essere usata per posizionare un TEG, giacché vi esce un'abbondante quantità di calore e, dunque, può essere generata un'altrettanto abbondante quantità di energia elettrica. Infine, si è osservato che sul retro del polso può scorrere un flusso di calore di circa  $20 \text{ mW/cm}^2$ , mentre davanti dove c'è l'arteria radiale il flusso di calore sale a  $30 \text{ mW/cm}^2$  e, inoltre, dalle persone non viene considerato un punto scomodo.

### **Modellare e progettare un generatore termoelettrico**

I risultati degli esperimenti descritti sono stati utilizzati per modellare e progettare un TEG basato sulla tecnologia MEMS destinato all'applicazione sul corpo umano, ragion per cui le funzioni corporee sono state schematizzate in termini di resistenze termiche equivalenti variabili. L'obiettivo dei ricercatori IMEC è la realizzazione di una termopi-

la micromeccanica con dimensioni miniaturizzate. L'idea (concettualmente non nuova) consiste nell'implementare le termocoppie fra il lato basso metallico del chip di silicio, generalmente caldo, e il lato alto di indio più freddo: in pratica i due spessori di silicio formano un sandwich con la termopila in mezzo.

Tuttavia, i progetti tradizionali di questo tipo soffrono di un'eccessiva dissipazione del calore parassita scambiato fra i due strati caldo e freddo, il che diminuisce il gradiente termico della termopila di una decina di millikelvin e, di conseguenza, si riduce la potenza teoricamente generabile. IMEC propone un disegno innovativo che consiste nel disegnare un particolare bordo sopra ciascuno dei due strati di silicio. La termopila di pochi micrometri di superficie viene quindi posizionata fra questi due bordi. Sono inoltre utilizzati opportuni distanziatori per diminuire l'influenza dei flussi di calore parassiti dalla termopila. I calcoli eseguiti sulle prestazioni del dispositivo mostrano una tensione d'uscita compresa fra 1 e 15 V e una potenza generabile di circa  $1\text{-}2 \mu\text{W}$ , per un TEG con dimensioni "da polso" basato su una termocoppia in silicio/germanio policristallino alta  $2,5 \mu\text{m}$ . È importante notare che, senza usare il bordo, la potenza generata sarebbe circa cento volte inferiore. I parametri d'uscita,



peraltro, dipendono dal materiale usato per le termocoppie e dalle sue prestazioni termiche. Perciò, è possibile aspettarsi ulteriori perfezionamenti di questa tecnologia che permetteranno alle termocoppie micromeccaniche di arrivare presto a produrre elettricità fino a 30  $\mu$ W per centimetro quadrato di pelle.

### Un prototipo basato sulle termopile BiTe

I due più importanti vantaggi della micromeccanica nella fabbricazione delle termopile sono le piccole dimensioni e il basso costo. Comunque, la dimostrazione del funzionamento dei sensori "indossabili" auto alimentati dal corpo può essere effettuata anche con le termopile disponibili sul mercato. Mentre era in corso lo sviluppo dei TEG micromeccanici, la correttezza dell'accoppiamento termico fra un TEG e il corpo umano è stata prima di tutto dimostrata con un prototipo non MEMS. Per questo motivo, qualcosa si è perso sia in termini di dimensioni che di costi di fabbricazione, tuttavia l'esperimento è servito a dimostrare la generazione di energia con il TEG posizionato vicino a un'arteria.

Per l'iniziale sperimentazione dei braccialetti termoelettrici si sono usate 48 termopile con dimensioni di 8x9x2,4 mm<sup>3</sup> formate da 128 termocoppie "di seconda generazione". Le termopile BiTe sono state composte in matrici miniaturizzate a tre dimensioni in modo tale da ottimizzare la resistenza termica adattandola alle caratteristiche locali indotte dall'aria e dal corpo umano. Questo è il motivo per cui IMEC ha battezzato la sperimentazione con la denominazione di "T-Matrix". L'occasione è servita anche per sviluppare l'elettronica di condizionamento dell'alimentazione del TEG indossato.

In pratica, succede che il TEG genera una potenza elettrica utile media di 100  $\mu$ W, la quale viene immagazzinata in due batterie in nickel e idrato di metallo NiMH. Inoltre, i moduli elettronici sono montati in un cinturino insieme a un sensore, un microcontrollore e un transceiver wireless per formare il vero e proprio nodo modulare wireless della rete BAN. Questo primo prototipo di nodo autoalimentato è stato utilizzato per trasmettere svariate misure a un vicino PC tramite il transceiver in regime impulsato alla frequenza di 2,4 GHz. Una trasmissione dati ogni 15 secondi consente di mettere da parte abbastanza tempo per raccogliere sufficiente energia per mantenere le batterie sempre cariche.

La successiva sperimentazione è stata svolta nel 2005 con dispositivi di dimensioni sensibilmente inferiori e tali da non superare il volume di un tipico orologio da polso. In questo caso, il blocco di termopile BiTe a quattro stadi è formato da circa 3500 termocoppie, ciascuna con sezione di appena 0,2 mm. Ogni contatto fra due termocoppie adiacenti fornisce circa 0,2 mV di tensione per ciascun grado di differenza di temperatura rilevato fra la giunzione calda e quella fredda e, dunque, posizionato vicino all'arteria il generatore produce da 100 a 200  $\mu$ W di potenza media alla tensione d'uscita

I prodotti PowerLine sono rinomati come un investimento a lungo termine per il loro concetto aperto e modulare.

## LEADING through Technology

### NEW PowerTrace II

- 2 GByte di memoria trace per registrare il flusso programma e dati
- Oltre 30 architetture microprocessore supportate dalla trace port
- Velocità trace port fino a 350 Mhz
- Metodi di analisi sofisticati per analisi di performance complete e per test di qualità



### PowerDebug II

- Una interfaccia Gigabit ethernet garantisce la visualizzazione immediata e l'analisi rapida delle informazioni di trace

Italy  
Lauterbach Srl  
Phone: ++39 - 02 - 45490282  
www.lauterbach.it

Germany  
Lauterbach GmbH  
www.lauterbach.de

Great Britain  
Lauterbach Ltd.  
www.lauterbach.co.uk

USA  
Lauterbach Inc.  
www.lauterbach.com

China  
Suzhou Lauterbach  
Consulting Co. Ltd.  
www.lauterbach.cn

Japan  
Lauterbach Japan Ltd.  
www.lauterbach.co.jp

nominale di 1,2 V. Questo nodo modulare wireless occupa solo una parte del cinturino e comprende un microcontrollore a bassa potenza che viene usato per controllare i sensori sia duty cycle sia specifici per la misura dei segnali biologici quali, ad esempio, l'elettrocardiografia (ECG), l'elettromiografia (EMG) e l'elettroencefalografia (EEG). La velocità di trasferimento dati è incrementata a  $0,5 \text{ s}^{-1}$ , con una netta diminuzione nei consumi di potenza che ora consentono un funzionamento corporeo prolungato senza cali di alimentazione.

### I TEG di nuova generazione: dai BiTe ai SiGe

In generale, le termopile BiTe producono più energia rispetto alle termopile SiGe. I calcoli IMEC in proposito mostrano che a  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  le termopile micromeccaniche BiTe riescono a generare fino a  $30 \text{ }\mu\text{W}$  di potenza in  $1 \text{ cm}^2$  di epidermide, mentre le termopile in SiGe non vanno oltre  $5 \text{ }\mu\text{W}$  per  $\text{cm}^2$ . Tuttavia, oggi IMEC sta cercando soprattutto di abbattere i costi, piuttosto che perfezionare ulteriormente le prestazioni, allo scopo di arrivare a rendere i TEG economicamente competitivi rispetto alle pile reperibili in commercio. Per questo motivo è importante approfondire gli studi sul silicio germanio policristallino, un materiale che è già studiato in molti laboratori di microelettronica. Per lo stesso motivo è molto probabile che i

TEG di nuova generazione saranno fabbricati con termopile micromeccaniche in SiGe, che hanno il vantaggio di offrire una conduttività termica molto bassa, pari a circa  $0,03 \text{ W/cmK}$ . Inoltre, questi materiali possono essere fabbricati con tecnologie micromeccaniche che consentono di realizzare termocoppie con densità superficiale relativamente abbondante e ciò permetterà ai ricercatori IMEC di ricavare tensioni ragionevolmente superiori alle attuali.

### Termopile in SiGe policristallino

IMEC ha sviluppato un procedimento che permette di fabbricare i TEG micromeccanici. Tale processo inizia con lo scavo di opportune microcavità sotto le termocoppie, che sono riempite di  $\text{SiO}_2$ . Continua con la deposizione e il disegno di particolari piedini di  $\text{SiO}_2$  sopra le microcavità stesse. Vengono quindi formati gli elementi di SiGe policristallino di tipo P e N, nonché le interconnessioni di alluminio per le giunzioni calda e fredda. Successivamente viene effettuata un'incisione con ioni reattivi di silicio allo scopo di disegnare la forma di un bordo. A questo punto, la superficie del chip non coperta dalle termocoppie o dalle linee metalliche viene scavata esattamente di  $0,25 \text{ mm}$  e in questo spessore viene eroso anche il  $\text{SiO}_2$  eccedente. Sopra tutto viene posto con un coperchio dispersore di calore composto da

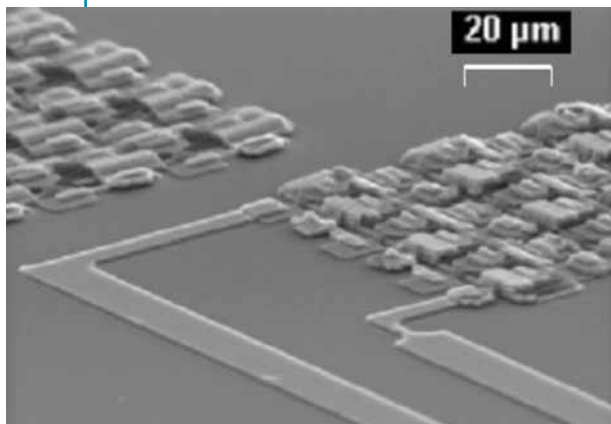
alluminio e indio, il cui strato di alluminio è elettricamente isolato dal silicio da uno strato di  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Alla fine del processo anche il coperchio viene scavato di  $0,25 \text{ mm}$  in modo da formare un tutt'uno con il bordo. Per non rischiare di distruggere meccanicamente la termopila durante il processo di fabbricazione e, comunque, anche successivamente durante le ordinarie condizioni di funzionamento, alcune termocoppie vengono

imprigionate all'interno dell'ossido di silicio in modo tale da costituire uno strato di protezione meccanica per le altre termocoppie. L'assemblaggio dei due chip viene eseguito usando uno

strato di benzociclobutene montato su quattro sostegni realizzati ai quattro angoli dei chip, mentre il "sandwich" di termopile viene assemblato sulla basetta metallica che dev'essere montata sul cinturino che va a contatto con la pelle. Tutte le parti del dispositivo, compreso il radiatore, sono protette contro gli urti e i colpi da una griglia simile a quella mostrata nella figura 3.

Attualmente, all'IMEC è in corso di fabbricazione un TEG composto da termopile in SiGe policristallino del tipo appena descritto. Dal momento in cui nei laboratori IMEC è stato sviluppato il primo prototipo di generatore di energia capace di riutilizzare il calore disperso dal corpo umano, l'istituto ha maturato senza dubbio una ragguardevole base di conoscenze, utile per modellare le caratteristiche dell'accoppiamento termico fra i TEG e il corpo umano. La più importante novità in proposito è costituita dalla struttura di sostegno e dai bordi sui quali appoggia la termopila. Questi accorgimenti abbattano drasticamente il calore parassita disperso fra le superfici calda e fredda del sandwich, migliorando le prestazioni in modo significativo. I primi prototipi di TEG realizzati con termopile BiTe disponibili in commercio hanno le dimensioni di un orologio da polso e riescono a erogare una tensione nominale compresa fra 1,2 e 2,4 V e una potenza media che va da 100 a 200  $\mu\text{W}$ .

L'obiettivo di queste ricerche è quello di sviluppare TEG miniaturizzati competitivi nei costi e basati sulle tecnologie MEMS. Questi moduli potranno essere efficacemente impiegati in reti BAN formate da sensori e attuatori capaci di inviare i dati misurati a un computer nelle vicinanze e ricevere da esso adeguati segnali di comando. Ulteriori ricerche sono in corso sullo sviluppo dei TEG micromeccanici in SiGe policristallino che ha il vantaggio di essere particolarmente economico. Nei laboratori IMEC è stata sperimentata una tecnologia di processo di questo tipo e oggi sta già funzionando.



**Fig. 4 – Un angolo del chip contenente circa 2500 termocoppie in SiGe policristallino che costituisce una termopila appena prima della formazione del bordo**