

Misurare la salute del sangue con un sensore alimentato dal calore corporeo

Una sperimentazione IMEC dimostra la fattibilità e i vantaggi di un dispositivo in grado di misurare le pulsazioni e l'ossigenazione del sangue utilizzando un sensore wireless indossabile, capace di autoalimentarsi sfruttando il calore generato dal corpo umano

Tom Torfs*, Vladimir Leonov*
Ruud J.M. Vullers**

La realizzazione delle innovative Body Area Network (BAN) richiede la disponibilità di sistemi miniaturizzati basati su nodi wireless in grado di consumare non oltre $100 \mu\text{W}$. Tale limite consente di utilizzare particolari generatori termoelettrici (TEG, ThermoElectric Generator) capaci di ricavare energia rigenerando il calore disperso naturalmente dal corpo umano. Questi innovativi dispositivi riescono, infatti, a produrre fino a $30 \mu\text{W}$ per centimetro quadrato corporeo e, dunque, costituiscono oggi una risorsa sicuramente attraente. La sperimentazione ha permesso di realizzare un misuratore dell'ossigeno e delle pulsazioni del sangue wireless interamente alimentato da un sistema TEG, montato su un orologio da polso e basato su una comune termopila BiTe. Questa soluzione, in un intervallo di 15 secondi riesce a richiedere al generatore circa $89 \mu\text{W}$ e, dunque, ben

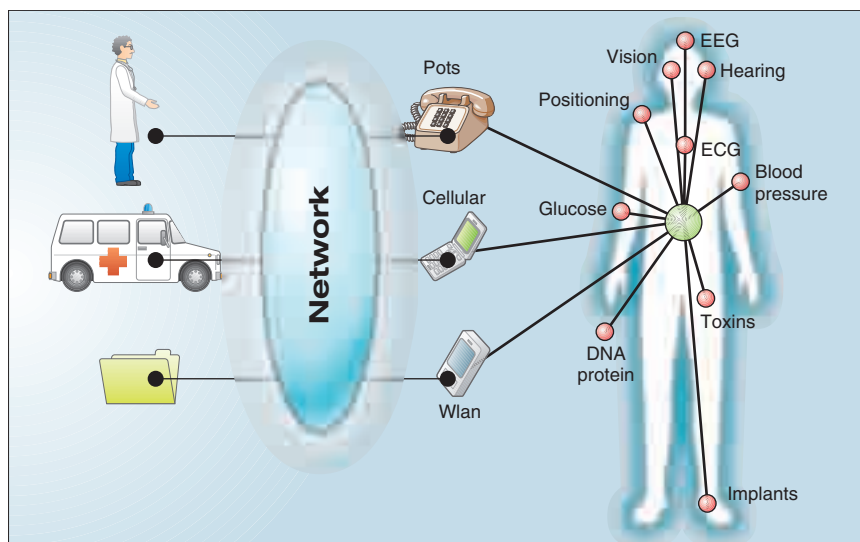


Fig. 1 – Un probabile panorama tecnologico per l'anno 2010, quando molte persone indosseranno le Body Area Network che li aiuteranno a svolgere svariate funzionalità negli ambiti sanitario, sportivo o d'intrattenimento

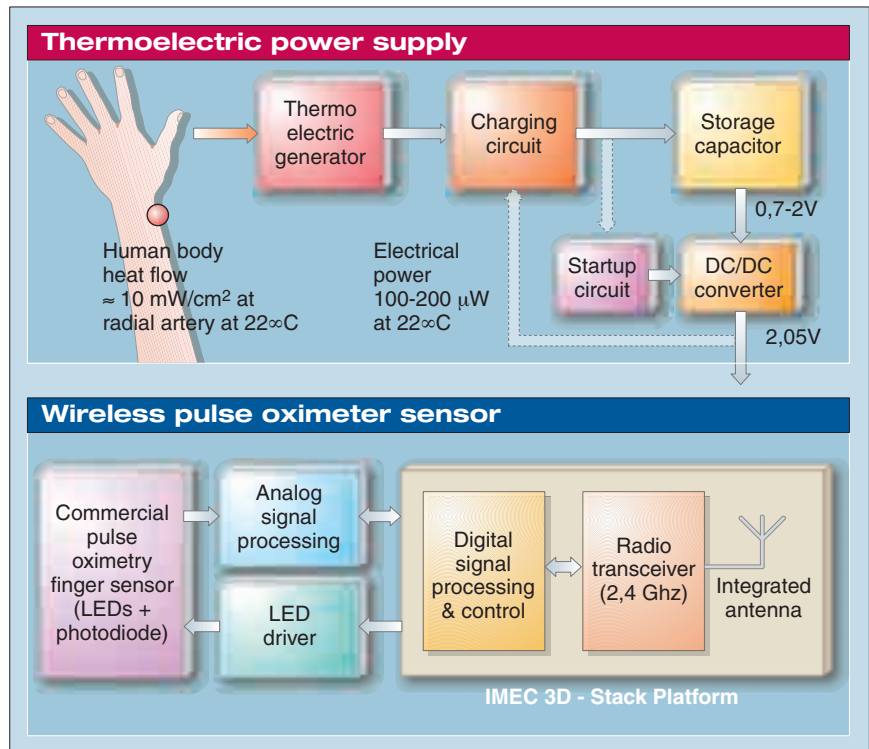
al di sotto del budget previsto di $100 \mu\text{W}$. Ciò dimostra la realistica autosufficienza per questo tipo di misuratori wireless di ossigeno e pulsazioni. D'altra parte, un ulteriore miglioramento nelle prestazioni è possibile solo ricorrendo ai TEG basati sulle termopile MEMS di nuova

generazione, attualmente in fase di sviluppo. Invero, i sistemi di sensori miniaturizzati energeticamente autonomi e connessi in forma di reti wireless a corto raggio si stanno oggi diffondendo in una varietà di ambiti applicativi dalla salute al comfort, dai processi industriali al

Fig. 2 – Schema a blocchi del sensore wireless per la misura dell'ossigeno e delle pulsazioni del sangue

controllo automotive, dall'agricoltura ai laboratori di ricerca. In particolare nelle diagnosi mediche, i sensori wireless possono essere sfruttati per rilevare, misurare e interpretare i dati osservati direttamente sul corpo umano, migliorando l'accuratezza e l'affidabilità delle decisioni del medico, mentre si riducono al tempo stesso i costi delle analisi. Si tratta, dunque, di una tecnologia che permette d'implementare reti BAN personali ottime per svariate tipologie di applicazioni negli ambiti sanitario, sportivo o d'intrattenimento.

Uno dei problemi cruciali tipici di quest'area di ricerca è lo sviluppo dei rigeneratori di energia, preziosi apparecchi capaci di far diventare il corpo umano stesso un'utilissima sorgente dalla quale ricavare l'energia da utilizzare per alimentare un'intera rete di sensori in modo autonomo e conveniente. I due più immediati approcci a tal proposito riguardano i convertitori termoelettrici, ossia i rigeneratori di energia che sfruttano il calore generato naturalmente dal corpo umano, e le celle solari. In tutte le condizioni ambientali indoor ed embedded, naturalmente, è più difficile sperare di poter disporre di una sufficiente quantità di energia solare e, dunque, ecco che i rigeneratori termici diventa-



no la scelta più congeniale. L'analisi delle caratteristiche e delle prestazioni di molti componenti elettronici commerciali suggerisce che un'uscita lineare di 1,5 V e una potenza media di circa 50-100 µW siano livelli di valori da considerare ragionevoli per i generatori termoelettrici TEG. Questi vincoli di potenza, sebbene sembrano severi, sono tuttavia necessari per poter garantire un'alimentazione di potenza stabile ai sensori, nonché ai circuiti di regolazione e ai trasceiventi annessi.

Pertanto, è indispensabile che sia garantita la sussistenza energetica di questo tipo di soluzioni soprattutto quando si

parla di apparecchi destinati alle applicazioni biomediche. La sperimentazione IMEC dimostra la validità e l'utilità di un sensore wireless nel monitoraggio non invasivo delle pulsazioni e dell'ossigeno del sangue delle persone. È stata, inoltre, dimostrata anche la fabbricabilità dei dispositivi necessari a tal scopo su scala industriale.

La misura dell'ossigeno e delle pulsazioni del sangue

Il sistema concepito dai ricercatori IMEC è composto da due blocchi indipendenti: l'alimentatore di potenza termoelettrico e il sensore wireless per la misura dell'ossigeno (ossimetro) e delle pulsazioni (pulsimetro). In pratica, il sensore viene indossato sopra a un dito, mentre tutta l'elaborazione dei segnali viene eseguita sul modulo allacciato al polso. Per l'elaborazione digitale e le comunicazioni wireless, il sistema utilizza una piattaforma wireless 3D-stack ideata da IMEC e basata su un'antenna a 2,4 GHz. I dettagli del progetto sono par-

Fig. 3 – Il generatore termoelettrico che ha la forma di un orologio (a sinistra), il modulo con i circuiti elettronici di controllo (in mezzo) e lo strumento di misura indossato sul dito (a destra)



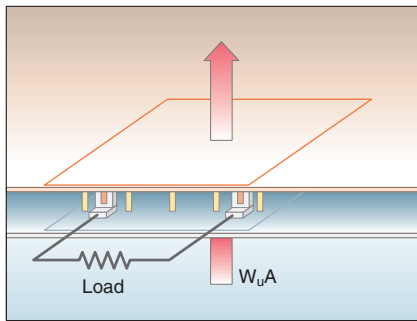
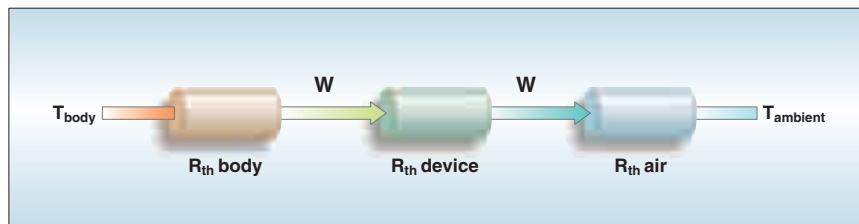


Fig. 4 – (A) Schema del generatore termoelettrico (B) Schema delle caratteristiche termiche ed elettriche del circuito di controllo che attorna il generatore



ticularmente innovativi, ma di semplice concezione. Il rigeneratore di energia termica è proprio il TEG che per trasformare i gradienti di temperatura in elettricità sfrutta l'effetto Seebeck. Il TEG è costruito come un sandwich di termopile fra due piatti, uno freddo e uno caldo. Le termopile sono attorniate da un gran numero di termocoppie, le quali sono a loro volta connesse prima in parallelo per moltiplicarne le prestazioni termiche e poi in serie per sommarne le caratteristiche elettriche.

Un'approfondita sperimentazione dei diversi aspetti della tecnologia TEG ha evidenziato ciò che più occorre tenere in considerazione nel mettere a punto una soluzione ottimale per il corpo umano. Innanzi tutto, la massima potenza elettrica viene generata quando il carico è adattato alla resistenza elettrica

del generatore e quando la conduttanza termica del TEG eguaglia la conduttanza termica esterna, per esempio, quella presente fra il calore sorgente (dal corpo umano) e il calore dissipato (nell'aria dell'ambiente). In secondo luogo, è indispensabile costruire un apparecchio TEG con dimensioni nell'ordine di pochi centimetri. Il limite utile per la produzione di energia elettrica è di circa $30 \mu\text{W}$ per centimetro quadrato di corpo umano, giacché oltre le sperimentazioni segnalano un sensibile calo di comfort da parte della persona che indossa il dispositivo. Inoltre, il sensore wireless autoalimentato non deve essere più grande di un centimetro quadrato, in modo tale da consumare all'incirca 50 o $100 \mu\text{W}$. In terzo luogo, la resistenza termica interna al corpo deve essere ridotta in ogni caso per potersi realizzare un

TEG veramente indossabile in un bracciale da orologio (o in una fascia attorno alla testa, oppure attorno all'arteria radiale o al nervo ulnare). Infine, è opportuno installare sulla parte esterna di ogni nodo un radiatore per favorire lo smaltimento del calore nell'ambiente.

Queste considerazioni sono state tenute presenti nella modellazione del generatore termoelettrico composto da una termopila a quattro stadi con ben 5000 termocoppie. In questo modello, ciascuno stadio è rappresentato da una resistenza termica RCERAMIC, formata da due piatti ceramici connessi in serie ai due resistori in parallelo della termopila, mentre RAIR THP rappresenta l'aria interna alla termopila.

La termopila è stata costruita in tal modo con $0,21$ mm di larghezza e $1,27$ mm di lunghezza, ma è stato inoltre aggiunto un radiatore da 38×34 mm così da rendere il TEG utilizzabile anche negli ambienti indoor. Con temperatura ambiente di 22°C , questo generatore produce più di $100 \mu\text{W}$ di potenza elettrica e, dunque, tale valore può essere considerato il limite massimo per i consumi di potenza entro il quale viene assicurata la corretta funzionalità operativa del sistema indossato. Una capacità deve essere aggiunta per fungere da elemento buffer per immagazzinare energia al fianco della batteria standard. A tal scopo è necessario un condensatore di 22 mF grande come un gettone per garantire che l'ossimetro termini un ciclo completo di misura e mantenere l'alimentazione minima di $100 \mu\text{W}$ sul carico.

Fig. 5 – Il circuito termico usato per modellare il TEG; nel quale il numero di stadi è tipicamente variabile, anche se in questo caso ne sono stati scelti quattro

Fig. 6 – Diagrammi dell'efficienza del convertitore dc/dc, del rettificatore e della potenza di riposo

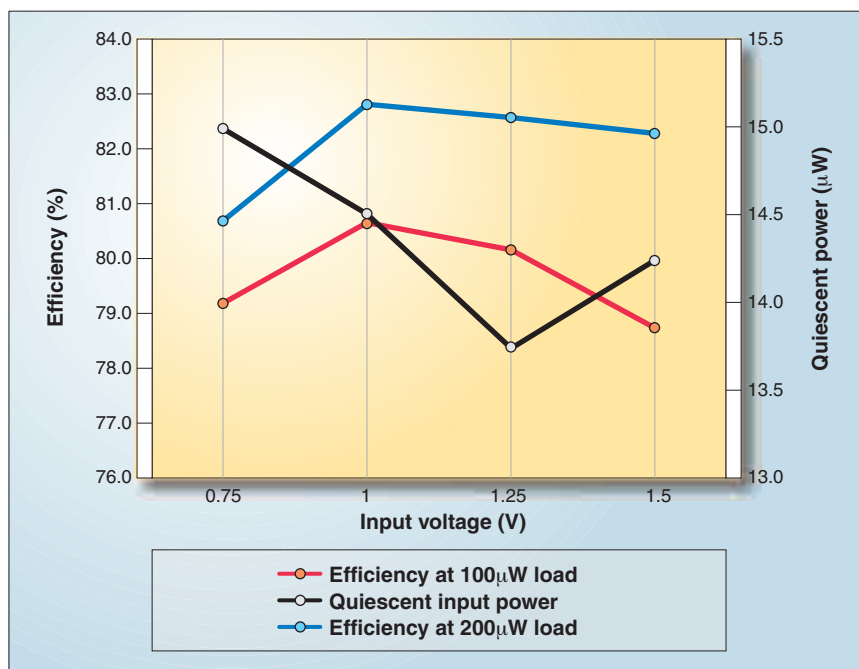
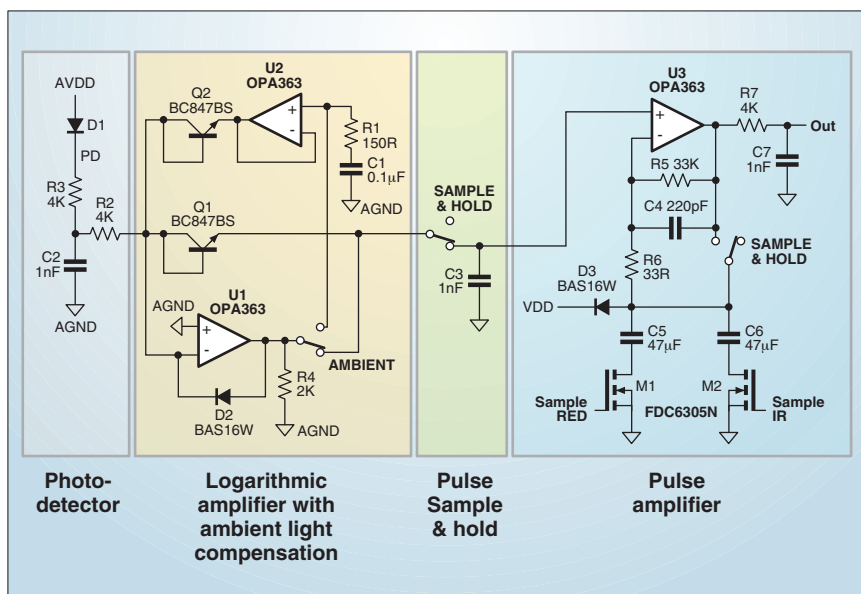


Fig. 7 – Il circuito di condizionamento del segnale analogico per la misura dell'ossigeno e delle pulsazioni del sangue



Ottimizzare la potenza

Un misuratore dell'ossigeno e delle pulsazioni del sangue è, in pratica, uno strumento di misura non invasivo che si occupa di monitorare la quantità di ossigeno presente nel sangue e le sue pulsazioni. Tipicamente, è formato da un paio di piccoli LED che affacciano un fotodiode attraverso quel particolare trasduttore costituito dalla parte del corpo del paziente di volta in volta prescelta, come ad esempio la punta di un dito. Uno dei LED emette nel rosso (con lunghezza d'onda di 660 nm), mentre l'altro emette nel vicino infrarosso (a 905, 910 o 940 nm). Queste lunghezze d'onda sono assorbite in modo significativamente differente dall'emoglobina che trasporta ossigeno e dalla sua forma senza ossigeno. Dunque, è proprio verificando il rapporto fra i due assorbimenti che si può calcolare il livello di ossigenazione del sangue. Nella sperimentazione si sono utilizzati componenti attualmente in commercio fra cui due LED di 660 nm e 910 nm e un comune fotodiode di silicio. Il circuito di condizionamento dei segnali analogici misurati è calibrato sul misuratore e ottimizzato per minimizzarne i consumi. Fondamentalmente, alla base c'è un circuito amplificatore logaritmico che genera una tensione proporzionale al

La tensione d'uscita a circuito aperto del generatore termoelettrico alla temperatura di 22 °C è di circa 1,2-2 V con resistenza serie di circa 3,3 kOhm, mentre il massimo della potenza è estraibile con carico adattato alla tensione media dell'ingresso che corrisponde a circa la metà rispetto a quella d'uscita a circuito aperto, ossia fra 0,6 e 1 V. Un convertitore dc/dc step-up è stato, inoltre introdotto per garantire l'alimentazione stabile di 2 V al sensore di misura. Questo lavora con 0,8 V d'ingresso e

supporta la possibilità d'installare un circuito di start-up addizionale, il quale deve servire per mantenere il convertitore dc/dc in shutdown fintanto che il condensatore non si carica a sufficienza, dopodiché permette l'accensione del sistema. L'efficienza del convertitore dc/dc e del rettificatore a pieno carico è stata analizzata e riportata come si vede nel grafico allegato: escludendo la potenza in standby, l'efficienza della conversione di potenza con un carico del 100 % è pari a circa l'80%.

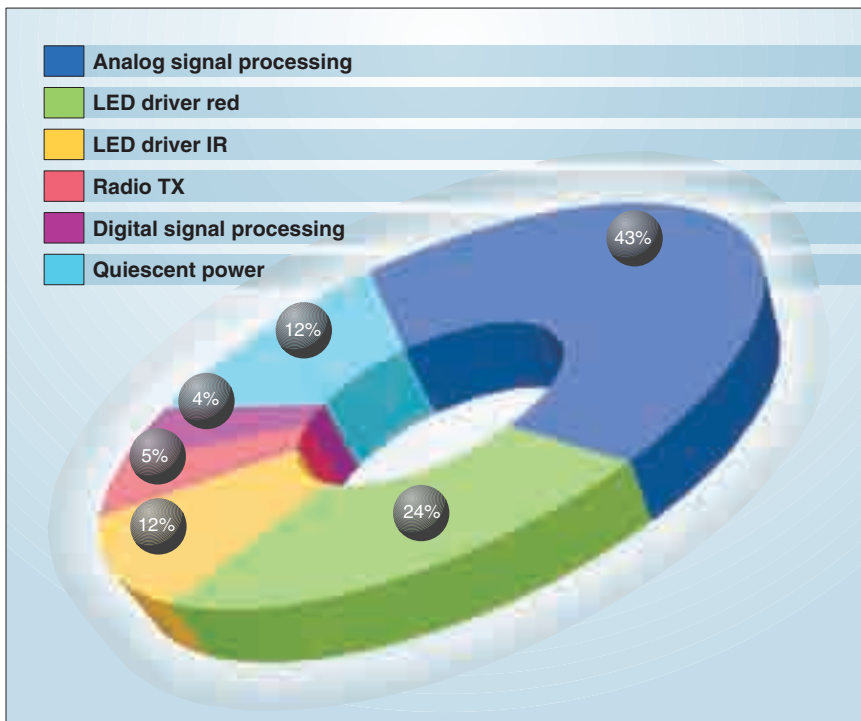


Fig. 8 – La distribuzione dei consumi di potenza per il misuratore di ossigeno e pulsazioni del sangue

logaritmo della fotocorrente creata dalla luce ambientale interferente. Dopodiché, un amplificatore a impulsi provvede ad amplificare la componente alternata dei segnali rosso e infrarosso. Il tutto viene alimentato con una tensione continua di 2 V. L'operatività a basso consumo è garantita dalla presenza di un amplificatore operazionale dotato di shutdown che può essere abilitato solo quando effettivamente è necessario. Un circuito sample&hold è stato, inoltre, aggiunto vicino al LED che, dovendo attivarsi a impulsi, può così commutare più rapidamente.

Poiché, infine, il sistema deve essere gestito con un duty cycle adeguato a ben precise esigenze elettriche e finalizzato a contenere i consumi di energia, ecco che è indispensabile che i due condensatori C5 e C6 abbiano valore relativamente elevato in modo tale da riuscire a catturare il segnale in continua per almeno 10 secondi o anche più, così da distinguerlo chiaramente dalla dispersione del circuito nello stato OFF. Per accelerare l'accensione del circuito è stato necessario posizionare il commutatore molto vicino al condensatore di accensione, così da farlo caricare più in fretta possibile.

Il processore di segnali digitali, dopo il filtraggio digitale, calcola la velocità degli impulsi utilizzando un algoritmo di autocorrelazione. La velocità degli impulsi e il rapporto misurato sono poi trasmessi wireless al vicino ricevitore insieme ai dati sulle rispettive potenze misurate. Il software in ricezione utilizza un'opportuna tabella di look-up per trasformare il rapporto fra i segnali rosso e infrarosso nella percentuale di ossigenazione del sangue. Naturalmente, va tenuto presente che questa tabella di look-up deve essere adeguatamente calibrata e verificata.

Un'ulteriore tecnica per ridurre i consumi è applicabile implementando un duty cycle del 26% ed effettuando le misure ogni 15 secondi. In queste condizioni, il consumo medio di energia dello strumento è esattamente pari a 62 μ W, ma questa potenza è da attribuire in vario modo fra i diversi componenti del sistema. Prefissando un'efficienza in potenza di circa il 70% fra l'ingresso e l'uscita (compresa la potenza di riposo), si deduce che il generatore deve almeno erogare una potenza media di 89 μ W. Dunque, questo valore è adeguatamente inferiore al limite di 100 μ W predefinito in fase teorica e, pertanto, ciò dimo-

stra la reale fattibilità di questa soluzione di misura e l'effettiva applicabilità del sensore in ambito biomedico.

La competitività commerciale

Se il fattore costo non fosse dominante, anche le termopile attualmente già in commercio potrebbero essere utilizzate per realizzare sensori intelligenti autoalimentabili. Tuttavia, oltre a essere un po' costose, queste termopile hanno anche un altro grosso svantaggio negli elevati consumi che non ne permettono la miniaturizzazione alle dimensioni di un orologio. In realtà, una tensione minima di 1 V potrebbe essere ben sufficiente per alimentare l'elettronica di controllo, ma in tal modo occorrerebbe un numero molto maggiore di termocoppie e bisognerebbe, inoltre, ridurre ulteriormente le dimensioni, ma a tal proposito per quanto riguarda i dispositivi commerciali vi sono ancora dei limiti tecnologici. Tuttavia, per la produzione su scala industriale si potrà far uso delle moderne tecnologie microelettroniche (MEMS), che consentono di realizzare termocoppie molto più piccole e più convenienti anche nei costi di fabbricazione. Tali soluzioni hanno il potenziale vantaggio di ridurre notevolmente la dimensione laterale della termopila, pur garantendo un ottimale rapporto costi/prestazioni.

IMEC ha concepito un'innovativa soluzione che riesce a superare queste difficoltà. Il progetto è particolarmente efficace e unisce un'ampia resistenza termica,

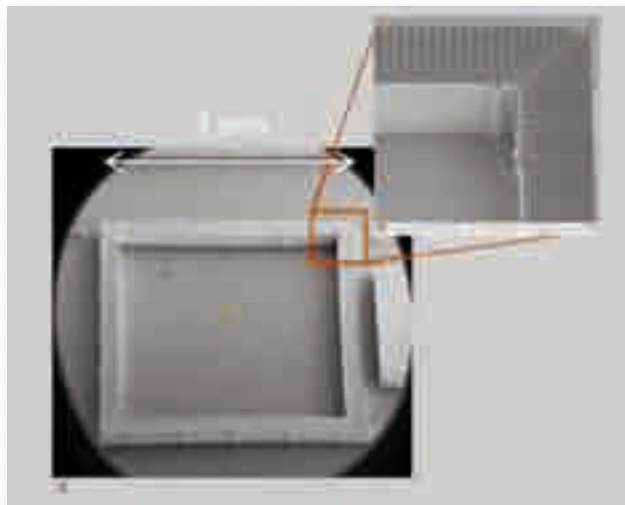


Fig. 9 – Rappresentazione al microscopio a scansione di una termopila fabbricata sopra a un cerchio di silicio di 3 x 3 mm

necessaria per ottimizzare la potenza, con un abbondante numero di termocoppie, indispensabile per ottimizzare il voltaggio. Così, la termopila consiste in qualche migliaio di microtermocoppie fabbricate sopra a un cerchio di silicio, la cui funzione è quella di minimizzare le conduttanze parassite che potrebbero ingenerarsi a causa dell'esigua altezza delle termocoppie. Inoltre, per semplificare la fabbricazione delle termocoppie e garantirne una larghezza di almeno 1 o 2 μm , è stata introdotta proprio sotto a ciascuna termocoppia una microcavità di 3 μm di spessore. I primi prototipi sono stati realizzati utilizzando il poli-SiGe che offre la miglior compatibilità con i processi di fabbricazione MEMS attualmente già in uso, come deriva dai calcoli di simulazione sul corpo umano che imponevano come limite di potenza circa 5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ a 1,5 V. Tuttavia, utilizzando nuovi materiali con migliori prestazioni termoelettriche come il Bi₂Te₃, ecco che si può innalzare il limite di potenza anche fino a 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ e oltre 4 V, senza modificare alcunché nella configurazione. Attualmente ci sono dei prototipi di questo tipo in fase di sviluppo e sperimentazione e sembrano confermando la validità e le potenzialità di questa tecnologia. Un esempio di termopila fabbricata in poli-SiGe è illustrato in figura 9. In ultima analisi, per misurare la concentrazione di ossigeno e le pulsazioni del sangue si può utilizzare un misuratore wireless che può essere totalmente alimentato da un generatore termoelettrico azionato dal

calore umano stesso. Il misuratore dell'ossigeno e delle pulsazioni del sangue elabora direttamente in loco il segnale misurato e consuma pochissimo, dato che trasmettendo i dati elaborati ogni 15 secondi richiede dal TEG 62 μW in

media e, come massimo, 89 μW . Tali valori sono indubbiamente adatti all'applicazione pratica di queste soluzioni anche in ambito biomedico.

Fra qualche tempo, tuttavia, le prospettive saranno ancora più interessanti, grazie al prossimo sviluppo delle termopile MEMS a film sottile che possono molto più efficacemente sostituire le termocoppie attualmente in commercio, migliorandone ulteriormente il rapporto prestazioni/prezzo. \triangleleft

* IMEC, Kapeldreef 75, 3001 Leuven, Belgium

** IMEC-NL/Holst Centre, High Tech Campus 42, 5656 AE Eindhoven, the Netherlands
www.imec.be

PCB-POOL®
Per la realizzazione dei tuoi prototipi

1 EUROCARD
+ Impianto
+ Photoplots
+ IVA

€49*

*Prezzo esemplificativo.
Altre dimensioni disponibili.

Conforme alle direttive ROHS / WEEE

Quotazioni e ordini istantanei online
Consegna in 2-8 giorni
Garanzia di alta qualità e puntualità

email: sales@pcb-pool.com readerservice.it n.19024

WWW.PCB-POOL.COM