

Ricerca di Sistema elettrico



Realizzazione e ottimizzazione di dispositivi pireolettrici per accumulo di energia (LA2.1)

A. Montone, F. Cognini, G. De Santis

REALIZZAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DI DISPOSITIVI PIROELETTRICI PER ACCUMULO DI ENERGIA (LA2.1
Realizzazione mediante processo convenzionale di componenti ceramici e loro integrazione nei relativi dispositivi piroelettrici prototipali per accumulo di energia)

A. Montone, F. Cognini, G. De Santis (ENEA)

Giugno 2023

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: LA 2.1

Responsabile del Progetto: *Daniele Mirabile Gattia (ENEA)*

Responsabile del Work Package: *Amelia Montone (ENEA)*

Responsabile Linea di Attività: *ENEA*

Mese inizio previsto: gennaio 2022

Mese inizio effettivo: gennaio 2022

Mese fine previsto: giugno 2023

Mese fine effettivo: giugno 2023

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	5
4	PRODOTTI SVILUPPATI	6
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	7
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	8
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	23
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	24
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	25

1 Risultati attesi

- Caratterizzazione dal punto di vista funzionale dei provini di ZnO di spessore sottile.
- Misure dei coefficienti piroelettrici e della corrente al variare della temperatura in intervalli da ambiente fino a 200°C.
- Integrazione dei provini più performanti nei dispositivi piroelettrici prototipali per la loro ottimizzazione.
- Realizzazione di dispositivi in grado di recuperare energia dall'ambiente esterno e di accumularla per la produzione di energia pulita per utilizzi applicativi andando ad ottimizzare il circuito di carica sfruttando anche la parte a polarità inversa del ciclo ed inserendo un raddrizzatore a ponte di diodi a bassa caduta di tensione, per realizzare in modo passivo l'accumulo.

2 Risultati ottenuti

La maggior parte degli ambienti di conversione energetica opera a temperature elevate. Pertanto, è fondamentale sviluppare metodi per raccogliere energia a temperature più elevate che siano più vicini ai sistemi realistici. I materiali piroelettrici sono stati utilizzati con successo come sensori della temperatura. L'energia elettrica generata dai materiali piroelettrici è stata utilizzata anche come fonte di energia per piccoli dispositivi elettronici ed è stata anche immagazzinata utilizzando condensatori e super condensatori commerciali. Sono stati utilizzati spesso materiali che contenevano piombo e/o altri materiali non compatibili con le alte temperature. In questo progetto verranno utilizzate pastiglie ceramiche di ZnO, l'ossido di Zinco è un materiale piroelettrico a basso costo, a bassa tossicità ed ecologico. Le pastiglie sono state prodotte massimizzando la densità del materiale ed incrementando il rapporto superficie/spessore. I dispositivi piroelettrici ottenuti sono in grado di generare corrente e potenza che può essere utilizzata per dispositivi elettronici o immagazzinata in condensatori.

Questi i risultati ottenuti:

Coefficiente piroelettrico: $p = 4,3 \pm 1,85 \mu\text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}$ a $T=100 \text{ }^\circ\text{C}$

Corrente max: $0,24 \text{ nA cm}^{-2}$

Tensione max: 5 V su condensatore da 10 μF (energia accumulata 125 μJ)

Potenza max: 42 nW in continuo, 1,25 μW intermittente

3 Prodotti attesi

-Rapporto tecnico sulla realizzazione e ottimizzazione di dispositivi piroelettrici per accumulo di energia

-Dispositivi piroelettrici per accumulo di energia (corrente generata $i_P \geq 0.2 \text{ nA/cm}^2$ per gradienti di temperatura di 1-10 K/s)

4 Prodotti sviluppati

Rapporto tecnico sulla realizzazione e ottimizzazione di dispositivi piroelettrici per accumulo di energia.

Realizzazione di dispositivi piroelettrici per accumulo di energia.

Sono state caratterizzate le proprietà piroelettriche dei provini di ZnO.

Sono stati messi a punto circuiti per l'accumulo in condensatori di energia prodotta per effetto piroelettrico.

E' stato dimostrato l'utilizzo dell'energia in resistori e circuiti esterni.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

La presente LA non ha richiesto scostamenti tecnici/economici rispetto a quanto preventivato e non sono state riscontrate criticità in riferimento al piano dei rischi presentato.

6 Sintesi delle attività svolte

Sintesi delle attività svolte e dei risultati ottenuti in relazione ai risultati attesi.

Sono state caratterizzate proprietà piroelettriche di campioni in ZnO realizzati nei laboratori Enea con diversi processi di sinterizzazione a partire da polveri nanometriche commerciali. Sono state valutate:

- la resistività;
- Il coefficiente piroelettrico mediante rampe uniformi di riscaldamento;
- la corrente erogata in cicli veloci con diverse tempistiche.

Sono stati messi a punto circuiti per l'accumulo in condensatori di energia prodotta per effetto piroelettrico, mediante raddrizzamento con:

- ponte di diodi (ciclo completo);
- relè (semi onda positiva).

E' stato dimostrato l'utilizzo dell'energia in resistori e circuiti esterni, sia in continuo che in intermittenza, il tutto ai livelli di potenza resi disponibili da una superficie attiva dell'ordine di 1 cm^2 , escursioni termiche $\geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

7 Dettaglio delle attività svolte

I materiali ceramici utilizzati per la realizzazione dei dispositivi sono stati ottenuti con il processo di fabbricazione del Two-Step Sintering (TSS) e Single Step Sintering (SSS) utilizzando come materiale precursore una polvere commerciale di dimensione nanometrica di ZnO esagonale. In Tabella 1 sono riportati i campioni utilizzati per il dispositivo piroelettrico, la densità relativa, il processo di sinterizzazione, le dimensioni dei grani e le misure della pasticca.

Provino	Spessore (mm)	Diametro (mm)	Densità relativa (%)	Lotto/step
1	1,5	11,5	92,1	I/1
10	1,3	11,2	98,8	II/1
15	1,3	11,2	99,4	II/2
25	1,1	11,2	98,5	II/2

Tabella 1: pasticche utilizzate nel dispositivo

Saranno mostrati i risultati dei campioni 1, 10, 15 e 25 per mostrare l'andamento al variare del processo di sinterizzazione e dello spessore. Nel dispositivo piroelettrico gli elettrodi superiori e inferiori sono evaporati sul campione, in particolare è stato evaporato un *layer* di Au di spessore controllato di 150 nm. Il campione è posto su di una base metallica inferiore cui è vincolato dalla forza esercitata da una molla per mezzo di un'astina con l'estremità isolante. Con questo sistema si sono raggiunte temperature fino a 200 °C. La misura di dispositivi piroelettrici sui campioni di wurtzite di ZnO è stata effettuata con convezione forzata, con questo sistema e con l'utilizzo della molla si è riusciti infatti ad arrivare a temperature maggiori, a modulare la frequenza con facilità e ad effettuare cicli in temperatura. Il sistema permette quindi di poter misurare la corrente piroelettrica, il coefficiente piroelettrico, andando a basse frequenze e ad effettuare ripetuti cicli in temperatura permettendo così di controllare la bontà del dispositivo. Un analogo setup ma con cella Peltier ha prestazioni più limitate in quanto non permette il raggiungimento di temperature elevate e le velocità di riscaldamento e raffreddamento sono minori pertanto saranno mostrate solo le misure effettuate con convezione forzata. La strumentazione impiegata è la seguente:

- cartuccia scaldante per aria/gas, 600 W, 240 Vca;
- controllore/programmatore di temperatura con ingresso termocoppia e uscita di controllo;
- unità di potenza;
- elettrometro Keithley 6517 B;
- sistema di acquisizione NI compactDAQ.

In Figura 1 è mostrato il set up completo utilizzato, in Figura 2 il dettaglio del dispositivo e la convezione forzata.



Figura 1: setup per misure su campioni piroelettrici

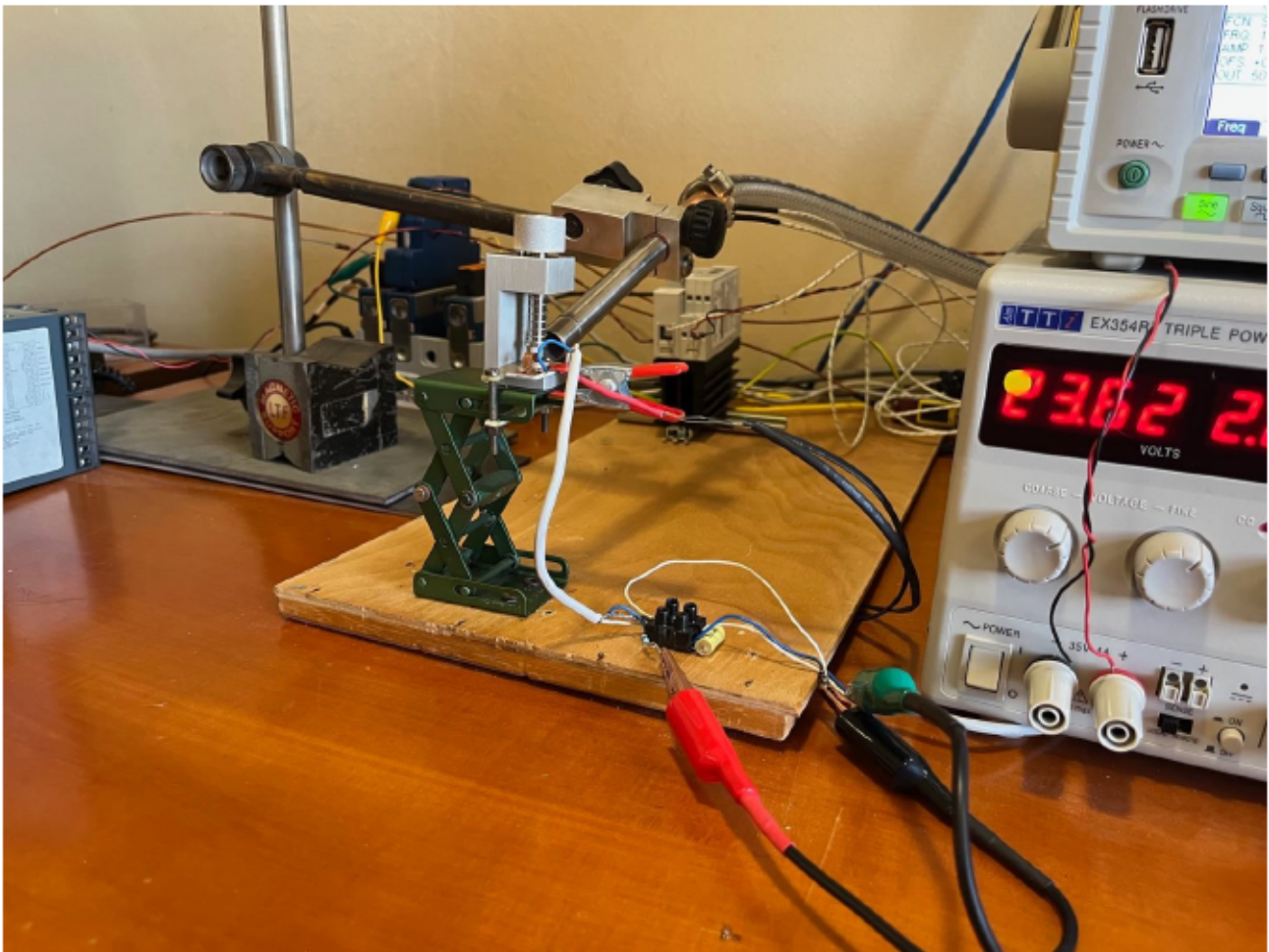


Figura 2: dettaglio porta campione e generatore di aria calda

In via preliminare si è provveduto a misurare la conducibilità dei campioni ricevuti mediante misure di resistenza, riassunte in Tabella 2.

ID camp.	R (Ω)	D (cm)	H (cm)	ρ (Ω cm)
1	1,10E+04	1,15	0,15	8,43E+04
25	2,15E+04	1,12	0,11	2,19E+05
10	1,00E+06	1,12	0,13	8,62E+06
15	4,90E+04	1,12	0,13	4,22E+05

Tabella 2: conducibilità dei campioni di ZnO

7.1 Coefficiente piroelettrico

Il coefficiente piroelettrico ($p=dP/dT$) dei campioni in ZnO è stato valutato mediante la misura della corrente generata durante rampe di riscaldamento a velocità r costante ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$). La corrente è rilevata da un amperometro (Keithley 6517 B) con resistenza interna trascurabile, per cui¹

$$p(T) = \frac{i(T)}{A r}$$

La temperatura va da T_{amb} a 150°C . I campioni testati sono 1, 10, 15 e 25, ciascuno alle due velocità $r = 5$ e $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

In Figura 3 è mostrato l'andamento di temperatura e corrente del campione 15 ZnO a $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

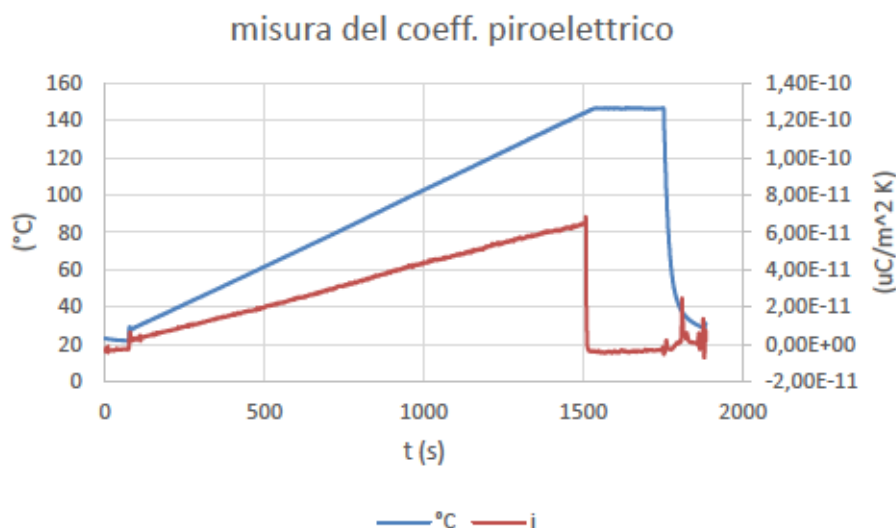


Figura 3: campione 15 ZnO a $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

In Figura 4 è mostrato il coefficiente p per tutti i campioni alle diverse velocità di salita. Le tracce risultano raggruppate in base alla velocità di prova con valori più alti di p per la salita “lenta”.

Non si evidenziano correlazioni tra le dimensioni dei grani e i valori dei coefficienti piroelettrici; le dimensioni dei grani sono di qualche micron per i campioni ottenuti dal processo SSS e sub micrometriche per il TSS.

¹ A. M. Glass, J. Appl. Phys. 40, 4699–4713 (1969).

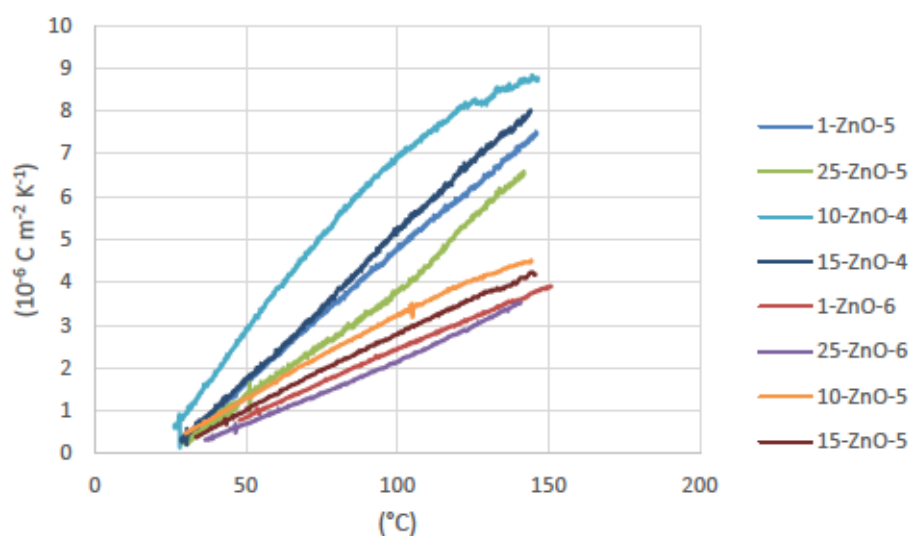


Figura 4: andamento $p(T)$ da T ambiente a 150°C

7.2 Cicli termici veloci

Campioni in ZnO sono stati sottoposti a cicli termici con il sistema a convezione forzata per valutare la risposta in corrente in condizioni dinamiche, rappresentative dell'uso reale. I cicli prevedono: salita da 30 a 100°C a velocità 5 o 10°C/s , sosta di 60 secondi, discesa rapida a 30°C .

Il collegamento elettrico è lo stesso dei test con rampa lenta ma è stato inserito in serie al campione un resistore da $10\text{ M}\Omega$, per stabilizzare la lettura che risulta così meno affetta da disturbi esterni.

I campioni provati sono stati $1, 10, 15, 20$, ciascuno a 5 e 10°C/s . In Figura 5 è riportata una misura rappresentativa ottenuta con il campione ZnO-10 a 5°C/s .

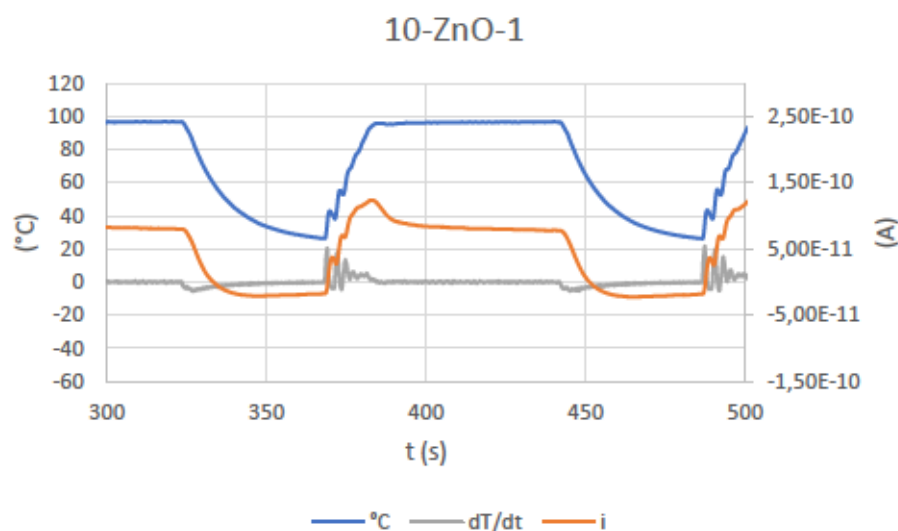


Figura 5: campione ZnO-10, ciclo termico 5°C/s

In Figura 6 è riportata la corrente massima rilevata nelle diverse prove con cicli rapidi.

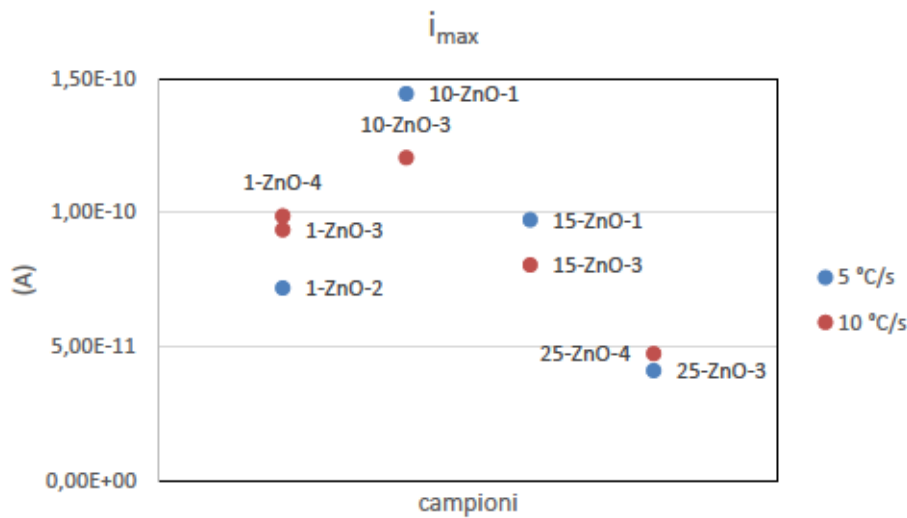


Figura 6: correnti massime rilevate nelle prove dinamiche sui campioni ZnO

I valori letti sono da analizzare ulteriormente per valutare l'influenza della resistenza del campione. ZnO infatti ha resistività² dell'ordine di $10^7 \Omega \text{ cm}$, piuttosto bassa se confrontata ad esempio con quella del PZT, tipicamente $10^9 \Omega \text{ cm}$. Ne risulta che, secondo lo schema di Figura 7 la corrente prodotta è

$$i_0 = i \left(1 + \frac{R}{R_0} \right)$$

Nel caso del campione ZnO-10, la resistenza interna misurata è $R_0 = 1 \text{ M}\Omega$ e la corrente generata dal campione è superiore a quella rilevata.

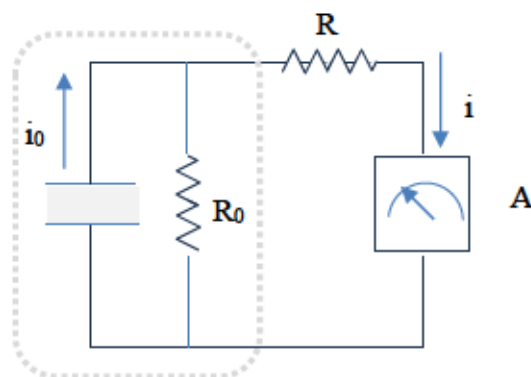


Figura 7: effetto di una resistenza esterna al campione

La massima corrente piroelettrica generata è quindi valutabile in $1,6 \text{ nA/cm}^2$.

Sono stati ottenuti quindi dispositivi piroelettrici per accumulo di energia (corrente generata $i_P \geq 0.2 \text{ nA/cm}^2$ per gradienti di temperatura di $1\text{-}10 \text{ K/s}$)

7.3 Test a temperatura elevata

² M. A. Fraga et al., *Microsyst Technol* (2014) 20:9–21

I cicli termici sopra descritti si fermano a $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per valutare a temperature medie maggiori il comportamento del materiale ZnO sinterizzato, sono stati eseguiti test tra T_{amb} e $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ in un range che comprende³ la temperatura di Curie ($127\text{ }^{\circ}\text{C}$). Un tracciato rappresentativo è mostrato in Figura 8. La corrente massima registrata è $0,24\text{ nA}$.

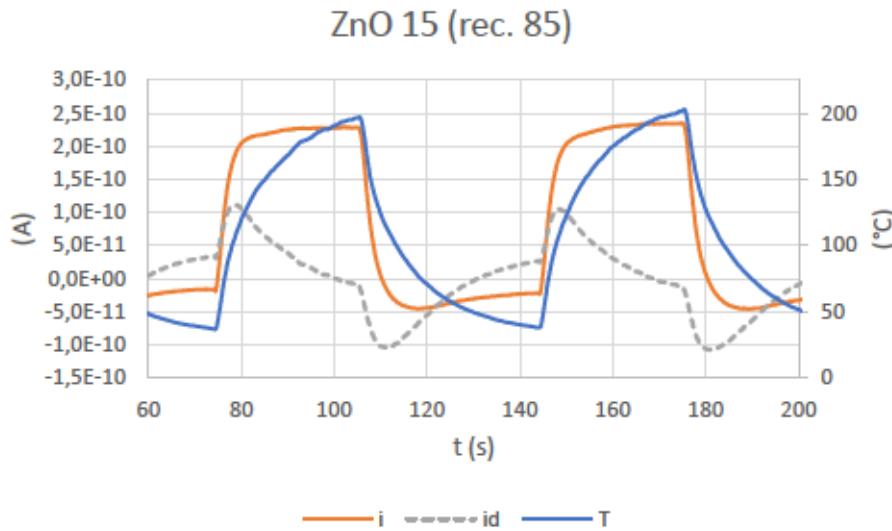


Figura 8: tracciato test a $T_{\text{max}}=200\text{ }^{\circ}\text{C}$

La curva tratteggiata “ i_d ” è ottenuta sottraendo alla corrente totale un’aliquota ottenuta con il fit lineare tra i e T : si nota la somiglianza con l’andamento intuibile della velocità di variazione di temperatura (dT/dt). Questo per confermare la natura piroelettrica della corrente (o di una parte consistente di essa).

Le prove sono state ripetute variando il valore della resistenza in serie (R , vedi Figura 7) tra $5,6$ e $10\text{ M}\Omega$. La Figura 9 riassume i risultati in termini di corrente massima misurata (serie “ i ”). Prendendo in considerazione la resistenza del campione 15-ZnO ($49\text{ k}\Omega$) si possono estrapolare i valori di corrente massima (serie “ i_0 ”) a livello del campione come visto precedentemente.

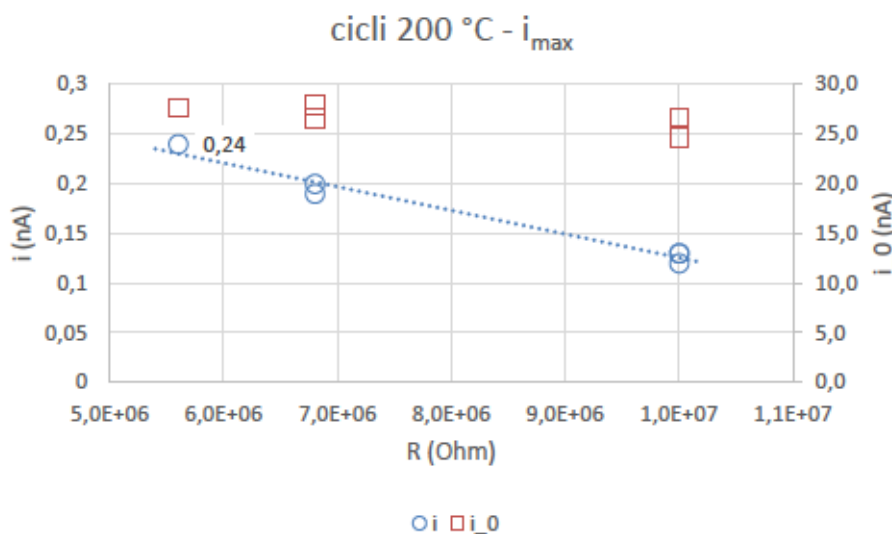


Figura 9: riassunto prove dinamiche fino a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$

³ Mengying Xie, et al., Int. J. Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 37, 2017, Pages 23437-23445,

Le correnti i_0 hanno una minore variabilità relativa il che confermerebbe che l'analisi fatta è plausibile; d'altra parte, l'utilizzo del materiale piroelettrico non può prescindere dalla presenza di un carico esterno e pertanto gli effetti della conducibilità dello ZnO (e le relative perdite) non sono eliminabili.

7.4 Ripetibilità dei risultati

Come indicatore di ripetibilità dei risultati si considera il coefficiente piroelettrico a $T=100\text{ }^\circ\text{C}$, rilevato come descritto precedentemente (Figura 4). I valori sono riassunti nella tabella seguente

Campione	Prova	r ($^\circ\text{C}/\text{min}$)	P ($\mu\text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
25	6	10	2,1
1	6	10	2,2
15	5	10	2,8
10	5	10	3,1
10	4	5	7,0
15	4	5	5,3
1	5	5	4,9
25	5	5	3,9

Tabella 3: coeff. piroelettrico a $T=100\text{ }^\circ\text{C}$

La differenza tra i valori ottenuti a diversa velocità di riscaldamento fa ritenere di non poter considerare omogeneo l'intero campione (effetto della diversa uniformità di riscaldamento).

I valori ottenuti con $r=10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ hanno $\mu=2,6$ e $\sigma=0,48\text{ } \mu\text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

L'intervallo di confidenza al 95% è $p=2,6 \pm 0,76\text{ } \mu\text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

Con $r=5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, $\mu=6,0$ e $\sigma=1,78\text{ } \mu\text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

L'intervallo di confidenza al 95% è $p=6,0 \pm 2,83\text{ } \mu\text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

Considerando tutti i test insieme si ottiene $p=4,3 \pm 1,85\text{ } \mu\text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

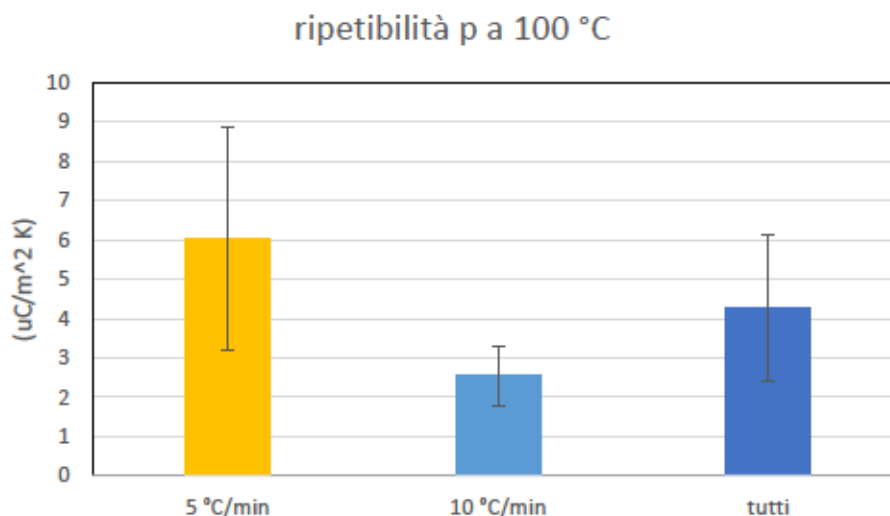


Figura 10: variabilità coefficiente piroelettrico a $100\text{ }^\circ\text{C}$ nelle prove con rampa costante

7.5 Energia accumulata

Sono stati realizzati e provati circuiti per l'accumulo della carica elettrica generata da campioni piroelettrici, soggetti a cicli termici nelle modalità sopra descritte.

Sono stati impiegati condensatori di capacità dell'ordine di alcuni μF ; l'energia accumulata è

$$E = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2$$

(Q: carica elettrica; V: d.d.p. tra le armature).

La tecnica circuitale utilizzata è estremamente semplificata e si avvale di un diodo, per catturare correnti di un solo segno o di un ponte di diodi, per sfruttare entrambe le semionde.

Considerando che le tensioni in gioco sono generalmente piuttosto piccole e comunque dell'ordine del Volt, si è tentato altresì di utilizzare elementi attivi (relè) che non introducessero cadute di tensione.

Per i diodi sono stati inizialmente valutati gli Schottky che hanno una minore tensione di soglia (0,3 V circa): alcune prove hanno mostrato però l'effetto dannoso della corrente inversa (Figura 11) che tende a scaricare il condensatore per cui si è scelto di utilizzare il diodo raddrizzatore 1N4148.

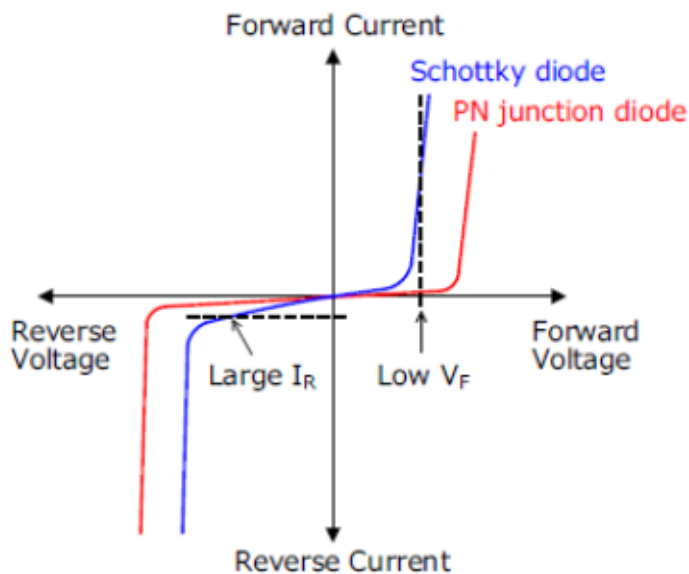


Figura 11: confronto delle caratteristiche di diodi normali e Schottky⁴

La Figura 12 mostra lo schema circuitale per la carica di un condensatore. In campione è flottante ma per il resto non sono necessarie modifiche al setup utilizzato per la caratterizzazione.

⁴ <https://www.semicon.sanken-ele.co.jp/ch/guide/basics/diode/3.html>

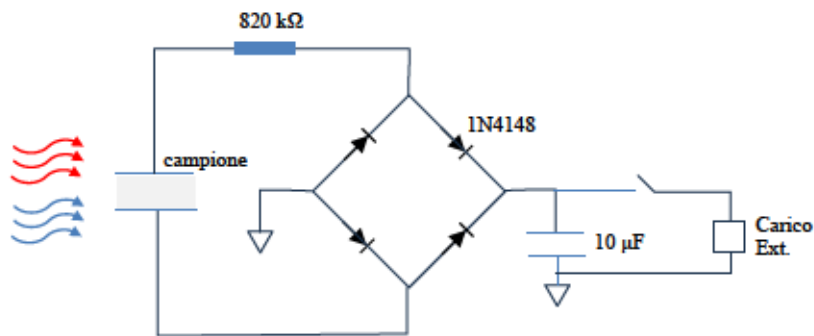


Figura 12: circuito di carica condensatore

Nella Figura 13 sono riportati gli andamenti della temperatura del campione e della d.d.p. al condensatore in una prova rappresentativa.

test di carica di un condensatore

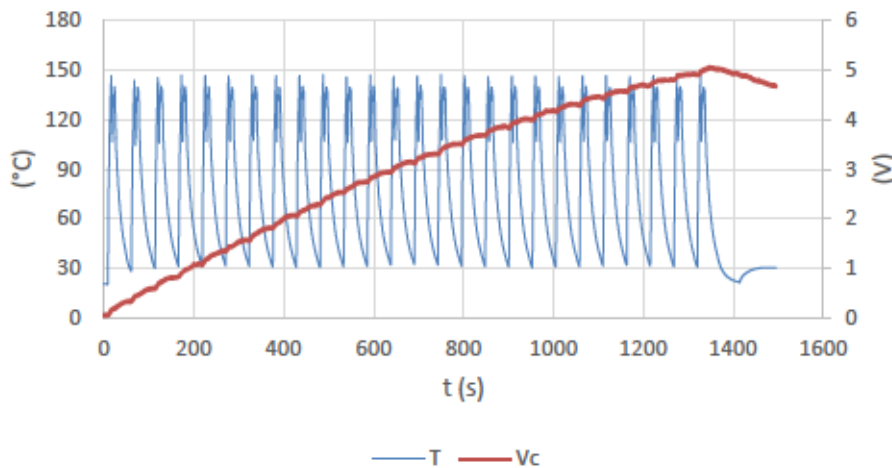


Figura 13: test di carica di condensatore con il collegamento di Figura 12

Il ciclo termico in convezione forzata comprende un rampa di salita fino a 140 °C, una breve stasi e una rampa fino a 30 °C con un periodo complessivo di un minuto circa. Con 25 cicli la d.d.p. al condensatore (da 10 uF) raggiunge 5 V cui corrisponde un'energia di 125 μJ. Il dettaglio dell'andamento di Vc all'inizio della prova (Figura 14, sinistra) mostra abbastanza chiaramente il contributo delle due fasi del ciclo, a polarità positiva (temperatura crescente) e negativa. Al proseguire si nota una diminuzione del tasso di crescita complessivo della tensione legato sia al limite intrinseco del processo (tensione a vuoto del campione) che alle perdite nel condensatore. Il tratto finale della curva della Vc infatti mostra un'evidente discesa del segnale.

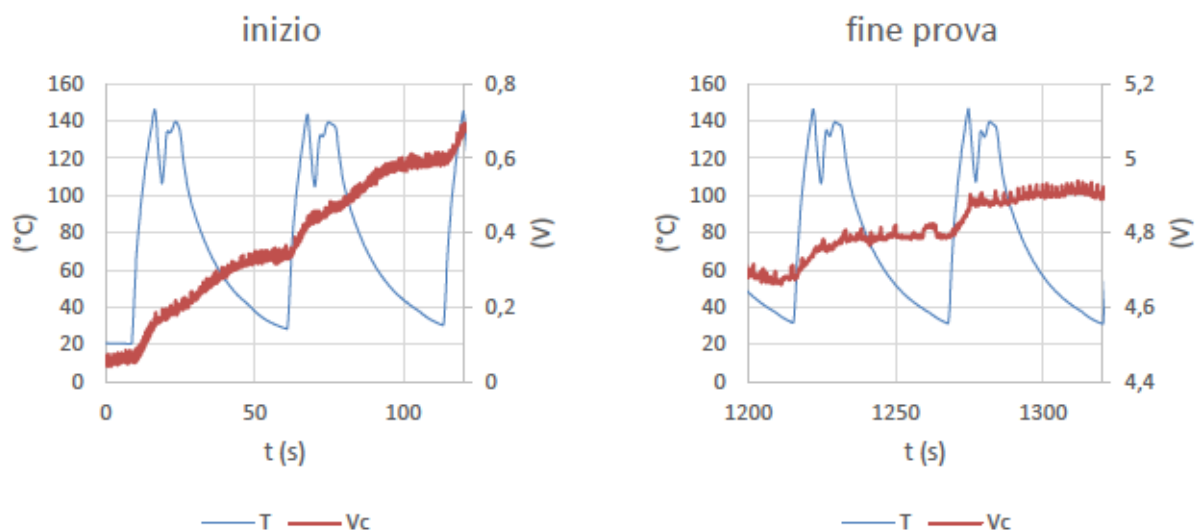


Figura 14: dettaglio ciclo termico e andamento d.d.p.

Un test in cui veniva inserito un carico in parallelo al condensatore ha l'andamento mostrato in Figura 15. Nella prima parte della prova è presente un resistore da $10\text{ M}\Omega$ che viene poi escluso al tempo $t=700\text{ s}$ circa. A parità di ciclo termico e, presumibilmente di risposta del campione, la tensione raggiunge un plateau di $0,65\text{ V}$ per risalire poi con pendenza di circa 5 mV/s dopo l'esclusione del carico. Con la capacità del condensatore di $10\text{ }\mu\text{F}$ tale velocità corrisponde a una corrente media di 50 nA mentre la resistenza, nella fase precedente, arrivava ad essere percorsa dalla corrente $V/R=0,65/10\text{e}6=65\text{ nA}$. I due valori sono tendenzialmente in accordo.

Dal punto di vista del campione, prendendo in considerazione solo l'ordine di grandezza dei diversi fattori, si ha il coefficiente piroelettrico (del PZT) $p\sim 10^{-4}\text{ C/m}^2\text{K}$, l'area $A\sim 10^{-4}\text{ m}^2$, il salto di temperatura $\Delta T\sim 10^2$, il periodo del ciclo $t\sim 10\text{ s}$

La corrente è quindi dell'ordine di $Q/t=p\text{ A}\Delta T/t\sim 10^{-7}\text{ A}=100\text{ nA}$. Anche in questo caso si ha un sufficiente accordo tra il fenomeno alla base del processo e le misure effettuate.

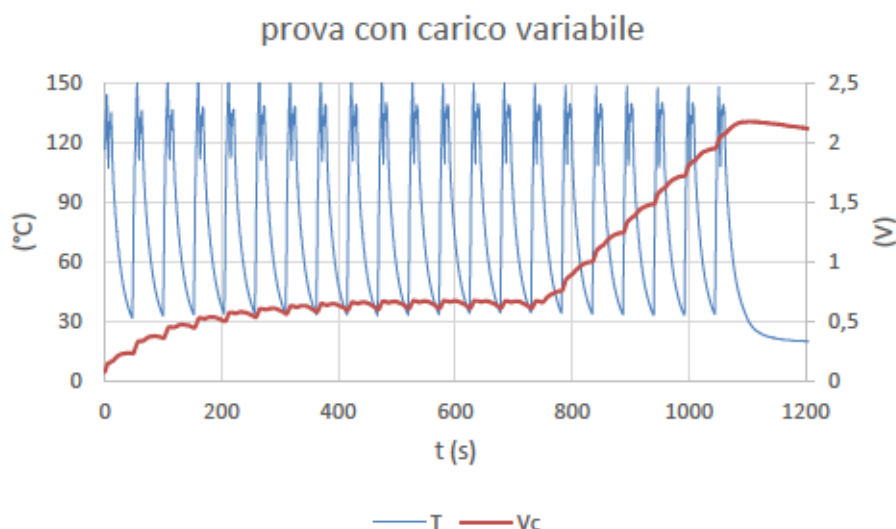


Figura 15: condensatore con resistenza in parallelo

La potenza assorbita dal resistore, al plateau, in continuo, è $P=V^2/R=42\text{ nW}$. Quella fornita dal campione deve anche sopperire alle perdite nei diodi per cui si tratta di un valore stimato per difetto. La caduta di tensione nei diodi costituisce una limitazione specialmente per i campioni con minore tensione a vuoto. Pertanto è stata indagata la possibilità di utilizzare elementi attivi per raddrizzare la

corrente piroelettrica. Il setup di Figura 16 mostra l'impiego di un relè elettromeccanico controllato da una scheda di i/o digitale, integrata nel sistema di misura NI cDAQ. È stata implementata la logica: se($V_A > V_B$) attiva l'uscita C, altrimenti disattiva C. In tal modo è stato possibile accumulare la carica prodotta dal campione durante la salita della temperatura.

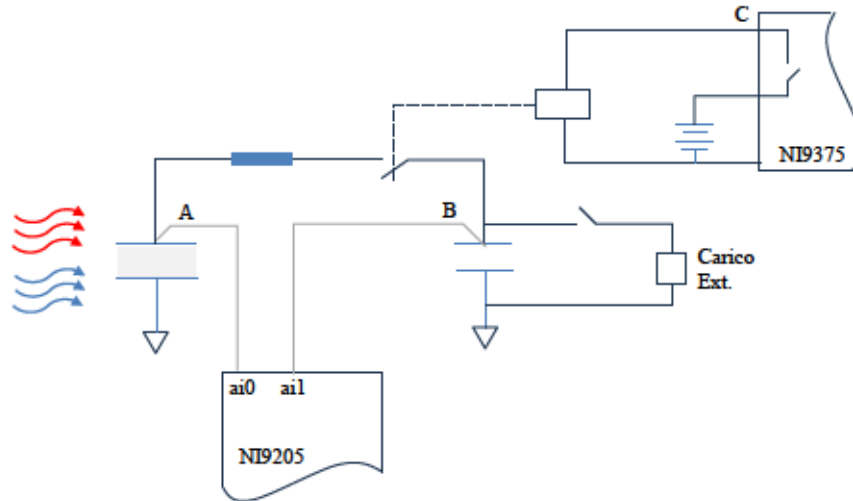


Figura 16: circuito di carica con raddrizzatore attivo

La Figura 17 mostra l'andamento della tensione con un ciclo termico simile a quello di Figura 13. La salita avviene al tasso medio di 3 mV/s contro i 5 mV/s della prova con ponte di diodi. Ciò è chiaramente legato al non utilizzo della fase a polarità inversa. A favore di tale sistema si ha l'assenza della caduta di tensione nel diodo (e relativa dissipazione di energia). È stata prevista l'estensione di questo schema al ponte completo, utilizzando due relè a due scambi. L'effettiva applicazione all'*harvesting* richiede lo sviluppo di dispositivi auto alimentati, eventualmente facendo uso di una carica iniziale per il *bootstrap* del sistema.

A scopo dimostrativo è stato predisposto il collegamento, in parallelo al condensatore, di un orologio digitale da polso, alimentato a 1,5 V nominali. Come visibile in Figura 17, il carico è stato alimentato al superamento di 1,6 V (per non danneggiarlo) e il condensatore (da 10 uF) ha fornito l'energia per un funzionamento di 7 secondi circa con una caduta di tensione di 0,7 V. Il ciclo si è potuto ripetere dopo la ricarica del condensatore durata 300 secondi (5 cicli termici).

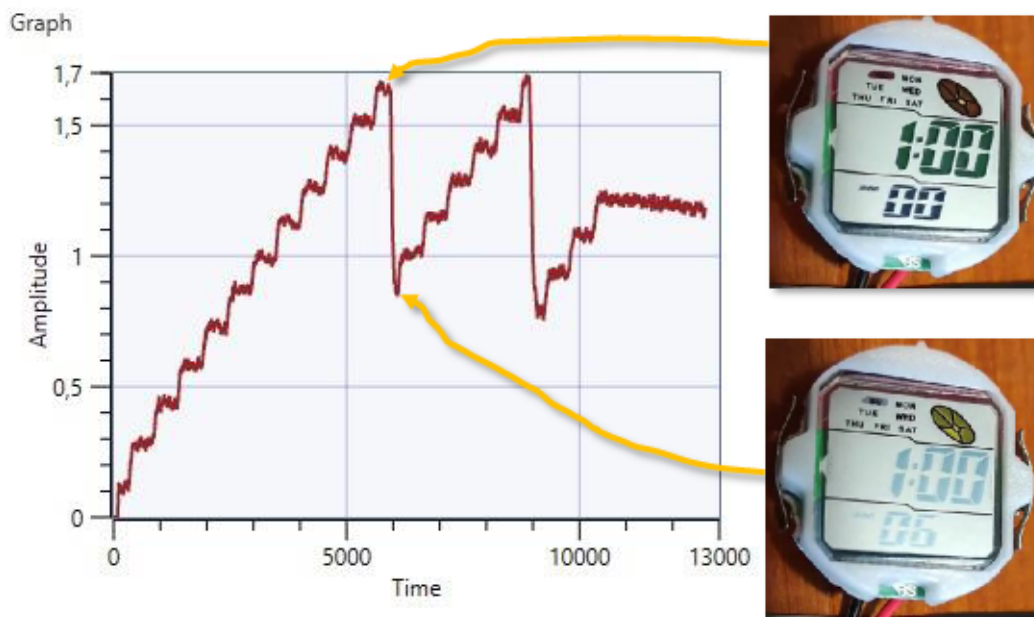


Figura 17: carica condensatore da 10 μF con semionda positiva ed esempio di utilizzatore (Time=0,1 s)

A differenza del resistore da 10 $\text{M}\Omega$ di Figura 15, un utilizzo continuo non è possibile. La corrente media assorbita dall'orologio, con la caduta di tensione di 0,7 V in 7 secondi, è pari a 1 μA , 20 volte maggiore di quella prodotta dal campione piroelettrico (50 nA). Nel caso specifico il ciclo utile è ancora più basso perché in media viene utilizzata metà della corrente disponibile infatti a fronte di 7 secondi di funzionamento ne necessitano 300 di ricarica e il rapporto tra le correnti, disponibile e necessaria è $300/7=43$.

La potenza media durante il funzionamento dell'orologio è

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1/2 C (V_1^2 - V_0^2)}{\Delta t} = \frac{10 \cdot 10^{-6} (1,6^2 - 0,9^2)}{2 \cdot 7} = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ W}$$

Per confronto, in continuo, nella prova precedente era stata assorbita la potenza utile di 42 nW.

Il funzionamento di un dispositivo con tale assorbimento può quindi essere solo intermittente a meno di effettuare un adeguato *scale-up* mettendo in parallelo più elementi attivi.

7.6 Conclusioni

Sono state valutate le proprietà piroelettriche di campioni in ZnO preparati in Enea a partire da polveri commerciali.

È stata verificata la presenza dell'effetto piroelettrico valutando il relativo coefficiente in condizioni diverse, con rampe continue e cicli dinamici, realizzati mediante riscaldamento in convezione forzata con apposito sistema servo-controllato, messo a punto per migliorare l'immunità ai disturbi e l'affidabilità delle misure.

Il materiale oggetto di indagine ha mostrato proprietà in linea con i valori in letteratura, per quanto riguarda le proprietà dielettriche e piroelettriche⁵. Si ritiene utile, al fine di ottimizzare l'impiego del materiale, che presenta note caratteristiche di biocompatibilità, proseguire lo studio dello *scale-up* al fine di aumentare la corrente e/o la tensione, collegando più elementi attivi e realizzando nuovi elementi di supporto per lo scambio termico in convezione forzata. A tal fine è possibile avvalersi di tecniche di Manifattura Additiva per realizzare geometrie complesse sia in materiali polimerici che in metallo.

⁵ Yan Zhang, et al., Nano Energy, Volume 58, 2019, Pages 183-191,

Dal punto di vista dell'accumulo di energia, i circuiti messi a punto hanno dato risultati consistenti e potranno essere completati con stadi di regolazione della tensione, a basso consumo di cui esistono già esempi commerciali anche se principalmente dedicati a generatori piezoelettrici⁶.

E' stata dimostrata la capacità di alimentare, anche se in modo intermittente, dispositivi generici, pertanto si propone di continuare selezionando sensori e sistemi di trasmissione a basso consumo in grado di acquisire dati utili, per esempio ambientali, con la cadenza compatibile con il livello di potenza attualmente disponibile.

⁶ AD LTC3588-1, Nanopower Energy Harvesting Power Supply

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

Presentazione a Nanoinnovation 2022 , Roma 19-23 settembre 2022, poster: A.Montone, G. De Santis, F. Cognini, F. Mazzanti, S. Grilli, E. Salernitano, G. Magnani, *ENEA*

“Pyroelectric device of ZnO ceramics as thermal energy harvesting”

https://www.nanoinnovation2022.eu/home/poster/MONTONE_Amelia.pdf

<https://www.nanoinnovation2022.eu/home/index.php/programme/posters/poster-session>

9.1

10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione eventualmente scaturiti dall'attività svolta

Presentazione a *Nanoinnovation 2022* , Roma 19-23 settembre 2022, poster: A.Montone, G. De Santis, F. Cognini, F. Mazzanti, S. Grilli, E. Salernitano, G. Magnani, *ENEA*
“Pyroelectric device of ZnO ceramics as thermal energy harvesting”
https://www.nanoinnovation2022.eu/home/poster/MONTONE_Amelia.pdf