

Ricerca di Sistema elettrico



Sviluppo e ottimizzazione della stampa di materiali termoelettrici organici e test di dispositivi stampati organico (tipo p)/inorganico (tipo n) (LA1.3)

A. Imparato, A. De Girolamo Del Mauro, R. Miscioscia

SVILUPPO E OTTIMIZZAZIONE DELLA STAMPA DI MATERIALI TERMOELETTRICI ORGANICI E TEST DI DISPOSITIVI STAMPATI ORGANICI ORGANICO (TIPO P)/INORGANICO (TIPO N) (LA1.3)

Autori: *Imparato A., De Girolamo Del Mauro A., Miscioscia R.* (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 1.3*

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

Responsabile del Work Package: *Francesca Di Benedetto (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.....	22
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	23
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	24

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente:

Prestazioni finali del processo di stampa:

- uniformità del film: $U < (t_{max}-t_{min}) / (t_{max} + t_{min}) < 20\%$
- rugosità superficiale (rms) del film $< 30\%$

Prestazioni del materiale:

- Coefficiente di Seebeck (S) $> 18 \mu V/K$
- Conducibilità elettrica (σ) $> 500 S/cm$

Prestazioni del dispositivo TEG realizzato:

- $P_{max} (\Delta T = 30^\circ C) > 40 nW$ (potenza massima del dispositivo in condizioni di carico adattato)

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti

Prestazioni finali del processo di stampa:

- uniformità del film: $U < (t_{max}-t_{min}) / (t_{max} + t_{min}) \sim 20\%$
- rugosità superficiale del film (rms) $\sim 30\%$

Prestazioni del materiale:

- Coefficiente di Seebeck (S) $\sim 19 \mu V/K$
- Conducibilità elettrica (σ) $\sim 750 S/cm$

Prestazioni del dispositivo TEG realizzato:

- $P_{max} (\Delta T = 30^\circ C) \sim 15 nW$ (potenza massima del dispositivo in condizioni di carico adattato) per dispositivi a struttura planare realizzati utilizzando come materiale tipo p composti a base di PEDOT:PSS con il 20% in peso di SWCNT e come materiale tipo n l' Argento .
- $P_{max} (\Delta T = 30^\circ C) \sim 30 nW$ (potenza massima del dispositivo in condizioni di carico adattato) per dispositivi a struttura verticale con architettura detta "origami" realizzati utilizzando come materiale tipo p composti a base di PEDOT:PSS con il 20% in peso di SWCNT e come materiale tipo n l' Argento .
- $P_{max} (\Delta T = 30^\circ C) \sim 40 nW$ (potenza massima del dispositivo in condizioni di carico adattato) per dispositivi a struttura verticale con architettura detta "origami" realizzati utilizzando come materiale tipo p una pasta commerciale a base di PEDOT:PSS e come materiale tipo n l' Argento .

3 Prodotti attesi

La Linea di Attività 1.3 non prevede la realizzazione di prodotti hardware/software.

4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente sviluppati nella LA, illustrando, per il software, le modalità di accesso per gli utenti (*Aggiungere eventuali prodotti sviluppati non previsti nel capitolato*)

4.1

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

La realizzazione di dispositivi TEG a struttura di tipo planare non ha prodotto il risultato atteso di almeno 40 nW di potenza in uscita in quanto l'area attiva del dispositivo è limitata essendo costituita da 4 coppie p-n in serie. Con l'aumento del numero di coppie del dispositivo planare si sarebbe ottenuto un valore di potenza in linea con le previsioni. Purtroppo, le dimensioni del nuovo dispositivo risultano incompatibili con il sistema di caratterizzazione utilizzato che risulta essere non modificabile nei tempi previsti dal progetto.

È stata realizzata una modifica del layout del dispositivo in modo da avere un aumento dell'area attiva e nello stesso tempo una riduzione dell'ingombro del dispositivo che ha comportato un semplice adattamento del sistema di misura. La struttura di dispositivo realizzata e denominata "origami", descritta nel seguito del report, ha permesso di migliorare le prestazioni generali dello stesso con il raggiungimento del risultato atteso di circa 40 nW.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività di ricerca hanno riguardato lo studio e la caratterizzazione ottica, elettrica e morfologica di film a base di PEDOT:PSS (materiale organico di tipo p) in cui sono stati dispersi nanotubi di carbonio a parete singola (SWCNT) e a parete multipla (MWCNT) con percentuali in peso di nanotubi nell'intervallo 5-20%. I film sono stati ottenuti per stampa serigrafica su substrato flessibile PEN utilizzando opportuni telai serigrafici realizzati con geometrie adatte per la realizzazione di dispositivi TE. In particolare, sono stati preparati telai con geometrie aventi strutture di tipo orizzontale "π" (PI greco) e di tipo "origami". Variando la viscosità della pasta preparata e i parametri di stampa serigrafica sono state ottimizzate la rugosità (200nm) ed uniformità (15%) dei film. Successivamente, i film stampati sono stati trattati con etilen-glicol per migliorare le proprietà elettriche (conducibilità pari a circa 700 S/cm) e termoelettriche ($S = 19$ e $PF = 21$) dei film. I dispositivi TE a struttura planare e a struttura origami realizzati hanno mostrato valori di potenza massima pari a 15 nW per $\Delta t 30^\circ\text{C}$ e pari a 40 nW per $\Delta t 30^\circ\text{C}$, rispettivamente.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Introduzione

La linea di attività 1.3 è stata dedicata alla realizzazione mediante tecnica serigrafica di film a base di PEDOT/PSS e dei suoi compositi con diverse concentrazioni di nanotubi di carbonio (SWCNT e MWCNT). Dopo caratterizzazione ottica, elettrica e morfologica di tale materiale termoelettrico, i film migliori ed ottimizzati sono stati utilizzati come materiale p in dispositivi sia a struttura orizzontale planare sia verticale ad “origami” in coppia con l’Argento, usato in alternativa come materiale di tipo n.

7.2 Ottimizzazione dei parametri di stampa e realizzazione dei film

Per lo studio dell’influenza dei nanotubi di carbonio sui parametri termoelettrici dei film di PEDOT:PSS, l’inchiostro, denominato pasta nel caso di stampa serigrafica, è stato preparato miscelando insieme un PEDOT:PSS commerciale già diluito in acqua con i nanotubi di carbonio a singola faccia (SWCNT) o a faccia multipla (MWCNT). I MWCNT (50-90 nm diametro) sono stati utilizzati così come ricevuti dalla Merck poiché si sono dispersi senza problemi nel PEDOT:PSS mentre i SWCNT nonostante avessero un diametro dei fili minore (diametro 1.2-2.0 nm) formavano agglomerati troppo grandi nella dispersione per stamparli poiché i fili erano molto lunghi (lunghezza non definita dalla ditta Merck). A questo punto, per meglio disperdere i SWCNT commerciali nel PEDOT:PSS, i SWCNT sono stati macinati per 15 minuti mediante ball-milling. Tale macinazione però ha in parte alterato la composizione fisica dei CNT, come riportato da Pierard et al. (*Carbon* 42 (2004) 1691–1697) e come si evince dagli spettri RAMAN di Fig.1. In generale, lo spettro RAMAN dei SWCNT presenta nell’intervallo $1200\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$ due picchi, uno a 1580 cm^{-1} (banda G) corrispondente alla struttura grafiteica dei SWCNT e l’altro intorno ai 1350 cm^{-1} (banda D) relativo alle impurezze e difetti presenti nei nanotubi. Man mano che aumenta l’ampiezza del picco relativo alla banda D si osserva una progressiva distruzione della struttura grafiteica e la formazione di carbone “disordinato” durante il processo. Dal rapporto dell’area della banda G e dell’area della somma delle bande (G+D) si può determinare il contenuto di SWCNT presente nella polvere macinata che nel caso specifico risulta essere pari al 70% partendo da un contenuto di SWCNT commerciale prima della macinazione pari al 88%.

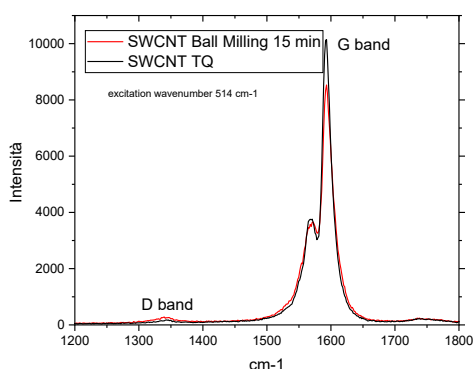


Fig. 1 – Spettri RAMAN della polvere SWCNT: a) come ricevuta dalla ditta Merck, b) dopo macinazione 15 minuti in ball-milling

Dopo aver preparato le dispersioni a base di PEDOT:PSS/SWCNT e PEDOT:PSS/MWCNT con diverse percentuali di nanotubi, esse presentavano una viscosità troppo bassa per poter essere stampate per cui è stato necessario riportarla all’intervallo di valori standard per la stampa serigrafica mediante riduzione per evaporazione del contenuto acquoso con trattamento termico. In dettaglio la dispersione è stata mantenuta

alla temperatura di 60°C per tempi variabili da 2 a 6 ore in modo da ottenere una viscosità finale delle dispersioni compresa nel range 90-150 mPa·s.

Successivamente ogni singola pasta è stata stampata su substrati flessibili di PEN mediante telai serigrafici con mesh diverse. I substrati di PEN utilizzati hanno spessori differenti a seconda se utilizzati per realizzare dispositivi TEG a struttura planare (125 µm) o a struttura "origami" (25 µm).

Diversi sono i parametri di stampa serigrafica che sono stati variati per ottenere film uniformi come la velocità di avanzamento della racla, la pressione esercitata dalla racla sulla tela e la distanza tra telaio e substrato prima della stampa (snap-off). In tabella 1 sono riportati i parametri di stampa ottimizzati.

Velocità racla [mm/sec]	Snap-off [mm]	Pressione Racla [kg]
50	0.3-0.6	3

Tabella 1: Parametri di stampa ottimizzati per la realizzazione di film uniformi di PEDOT:PSS/CNT

Per la valutazione immediata della qualità dei film stampati è stato utilizzato un visore ottico a 15 ingrandimenti con il quale è stata effettuata la valutazione qualitativa dell'uniformità di spessore e delle eventuali deformazioni e scostamenti della geometria della stampa rispetto ai valori nominali immediatamente dopo la stampa. Elevati scostamenti del film rispetto alla geometria nominale non rende possibile la realizzazione dei relativi dispositivi. I film che hanno superato il primo test di stampa (figura 2) sono stati caratterizzati mediante misure ottiche, morfologiche (fig.3) ed elettriche.

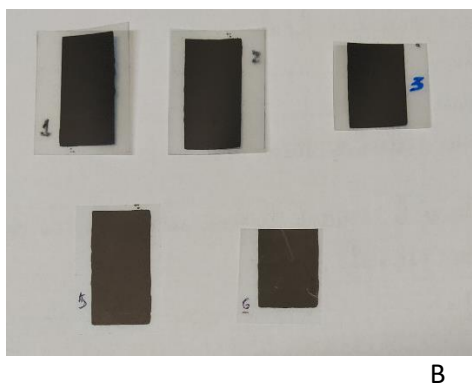


Fig. 2: Immagine di film stampati a base di PEDOT:PSS con SWCNT 20% (campioni 1,2,3) e con MWCNT 20% (campioni 5,6) con spessore uniforme e geometria definita

Come si può osservare dalle immagini SEM di fig.3, i film stampati a base di PEDOT:PSS con 20% SWCNT (A) risultano più uniformi ed omogenei rispetto ai propri omologhi contenenti 20% di MWCNT (B).

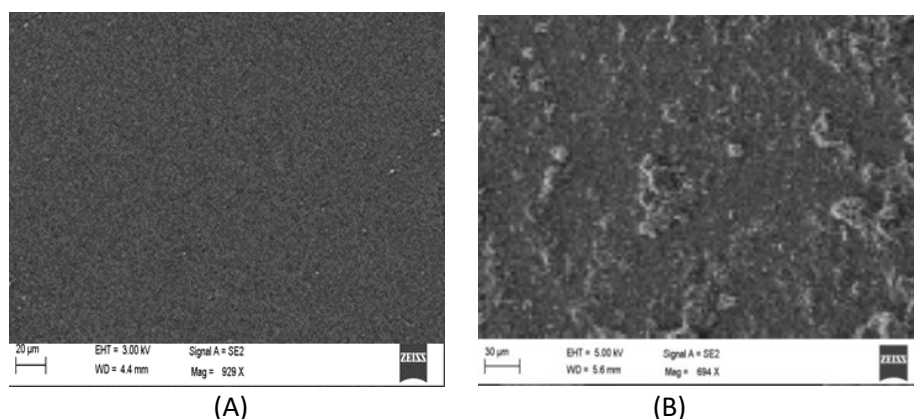


Fig.3: Immagini SEM del film stampato di PEDOT:PSS con SWCNT 20% (A) e con MWCNT 20% (B)

In tabella 2 e 3 sono mostrate le caratteristiche fisiche, elettriche e termoelettriche dei film stampati in funzione della concentrazione in peso dei nanotubi di carbonio rispetto al PEDOT:PSS. In particolare, lo spessore e la rugosità dei film stampati sono stati misurati mediante profilometro ottico Taylor Hobson, la resistenza di sheet è stata misurata mediante strumentazione a 4 punte Napson, Resistest - 8A, il coefficiente di Seebeck è stato misurato mediante apparecchiatura Linseis HCS-1. Il parametro utilizzato per valutare il comportamento termoelettrico dei film è il Power Factor, $PF = \sigma S^2$, con σ conducibilità elettrica e S coefficiente di Seebeck. Per migliorare ulteriormente le proprietà termoelettriche, i film di PEDOT:PSS/CNT sono stati sottoposti a trattamento per immersione in etilene glicole (EG) per 1 ora. Tale trattamento induce un notevole aumento della conducibilità elettrica dei film e una contenuta diminuzione del coefficiente di Seebeck. Il fattore di potenza in tutti i casi aumenta.

SWCNT [%]	Senza trattamento EG					Con trattamento EG				
	Sheet res [Ω]	Spessore nm	Conducibilità [S/cm]	Seebeck [$\mu V/^{\circ}K$]	Power Factor [$\mu W/m^{\circ}K^2$]	Sheet res [Ω]	Spessore nm	Conducibilità [S/cm]	Seebeck [$\mu V/^{\circ}K$]	Power Factor [$\mu W/m^{\circ}K^2$]
5	7100	412	3.42	16.8	0.09	39.8	412	609	15.5	14.65
10	8000	650	1.92	14.04	0.04	40	650	384	10.48	4.22
20	16000	460	1.36	18.51	0.06	28.5	460	763	16.47	20.69
40	3600	850	3.27	17.37	0.09	27.6	850	426	16.54	11.66

Tab. 2: Riepilogo caratteristiche elettriche e morfologiche dei film di PEDOT:PSS/SWCNT a diversa concentrazione dei SWCNT

MWCNT [%]	Senza trattamento EG					Con trattamento EG				
	Sheet res [Ω]	Spessore nm	Conducibilità [S/cm]	Seebeck [$\mu V/^{\circ}K$]	Power Factor [$\mu W/m^{\circ}K^2$]	Sheet res [Ω]	Spessore nm	Conducibilità [S/cm]	Seebeck [$\mu V/^{\circ}K$]	Power Factor [$\mu W/m^{\circ}K^2$]
5	371	920	29.30	18.88	1.04	45	371	241	17.65	7.52
10	245	1430	28.54	17.81	0.90	20	1430	349	14.22	7.07
20	900	1100	10.10	18.07	0.33	45	900	202	13.84	3.86
40	260	1800	21.36	17.65	0.66	20	1800	277	13.84	5.32

Tab. 3: Riepilogo caratteristiche elettriche e morfologiche dei film di PEDOT:PSS/MWCNT a diversa concentrazione dei MWCNT

Le tabelle mostrano che la combinazione migliore dei valori di conducibilità, del coefficiente di Seebeck e del fattore di potenza si ottengono con il film di PEDOT:PSS/SWCNT con il 20% di SWCNT ($PF = 21 [\mu W/m^2K^2]$), dopo trattamento del film con EG. In figura 4 sono riportati i risultati della misura del coefficiente di Seebeck a temperatura ambiente e il suo andamento in funzione della temperatura nell'intervallo 30-120°C.

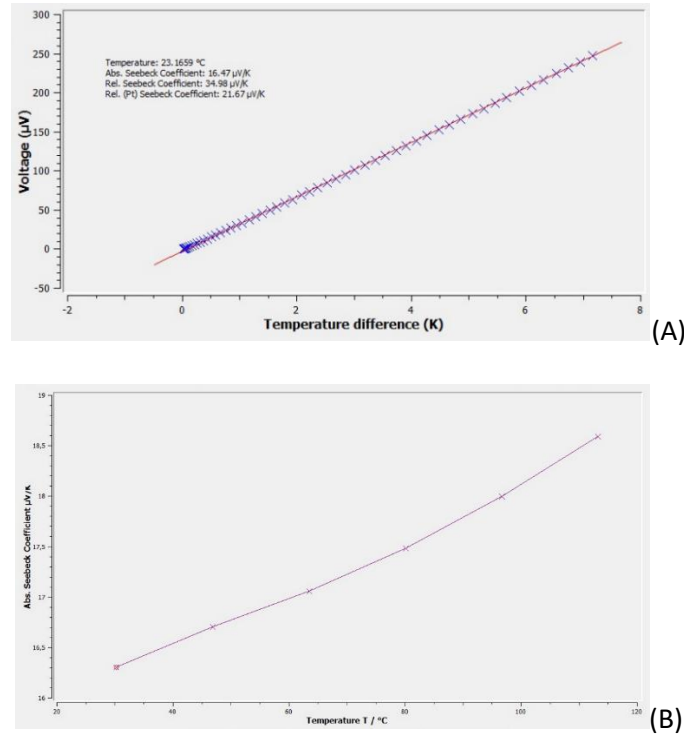


Fig. 4 - Coefficiente di Seebeck del film PEDOT:PSS/20% SWCNT a temperatura ambiente (A) e in funzione della temperatura(B)

7.3 Realizzazione dispositivi TEG a struttura planare e a struttura "origami"

In base ai risultati ottenuti, il film migliore dal punto di vista di proprietà termoelettriche è il PEDOT:PSS con il 20% in peso di SWCNT che è stato utilizzato come materiale organico di tipo "p" per la realizzazione di dispositivi termoelettrici. In sostituzione del materiale "n" viene utilizzato l'argento (Andersson et al, J. Low Power Electron. Appl. 2019, 9, 14) come per i contatti tra i materiali "p" ed "n" e per le connessioni esterne come riportato da Andersson.

La struttura planare del dispositivo utilizzata è la tipica struttura a pi-greco mostrata in figura 5.

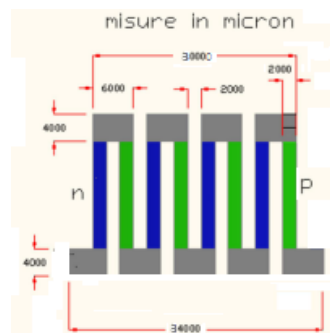


Fig. 5 – Struttura del dispositivo termoelettrico PEDOT:PSS/20%SWCNT – Ag. In blu è rappresentato l'argento (materiale n), in verde il materiale di tipo p (PEDOT:PSS/CNT), in grigio i contatti elettrici (Ag).

Per realizzare tali dispositivi sono stati utilizzati due telai serigrafici, uno per la stampa del materiale organico ibrido e uno per la stampa dell'argento. La figura 6 mostra i due telai utilizzati le cui caratteristiche sono riportate nella tabella 4.

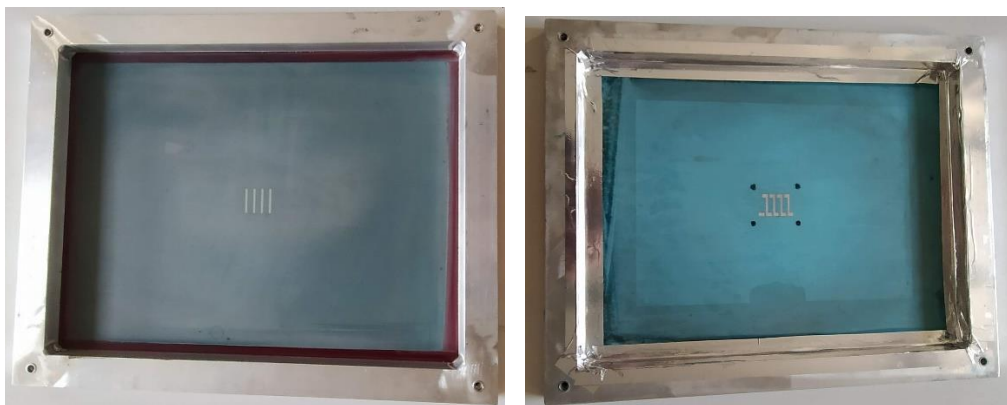


Fig. 6 – Telai per la stampa del dispositivo. A sinistra il telaio per la stampa del materiale organico di tipo p, a destra il telaio per la stampa del materiale di tipo n (Ag) e dei contatti elettrici (Ag)

Materiale da stampare	Mesh	Diametro filo μm	Apertura mm
Materiale p	77	65	67
Materiale n	120	36	47
Contatti elettrici	120	36	47

Tabella 4: Caratteristiche dei telai serigrafici usati per stampare il materiale p, il materiale n e i contatti elettrici

Inoltre, per aumentare lo spessore dei film organici ibridi sono state effettuate fino a quattro stampe sovrapposte. Ulteriori stampe oltre la quarta hanno provocato perdita della geometria con sovrapposizione e corti-circuiti tra il materiale p e n.

Anche in questo caso, prima della stampa dell'argento, i film di PEDOT:PSS/20% SWCNT sono stati sottoposti a trattamento con EG per incrementare i valori dei parametri termoelettrici e in particolare del Power Factor. La figura 7 mostra alcuni dei dispositivi realizzati.

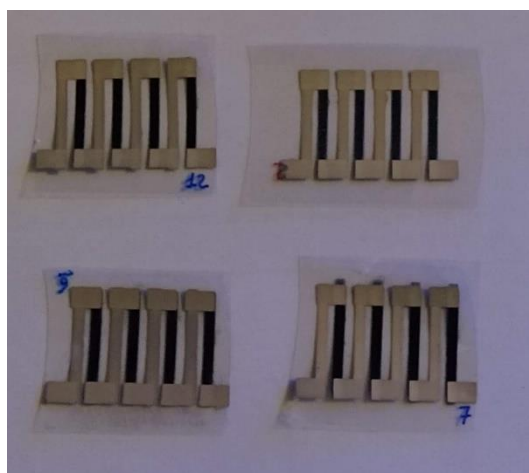


Fig. 7 – Foto dei dispositivi con struttura planare ottenuti per stampa serigrafica

I dispositivi sono stati caratterizzati mediante un sistema di misura costituito da una camera evacuata realizzato ad hoc che permette di impostare e controllare separatamente la temperatura del giunto caldo e quella del giunto freddo e, contemporaneamente, effettuare la misura delle correnti e delle tensioni sviluppate sia in condizioni di circuito aperto che sotto carico.

La figura 8 seguente riporta un particolare del set di misura utilizzato.

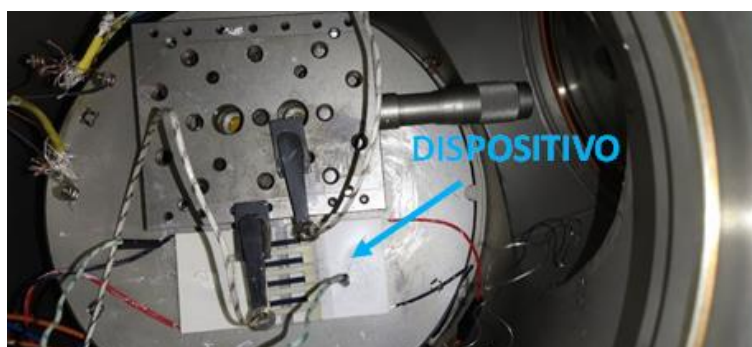


Fig. 8 – Particolare del set di misura dei dispositivi termoelettrici.

La figura 9 riporta i grafici elaborati delle misure effettuate sul dispositivo con struttura planare realizzato con film a base di PEDOT:PSS/20% SWCNT e con argento.

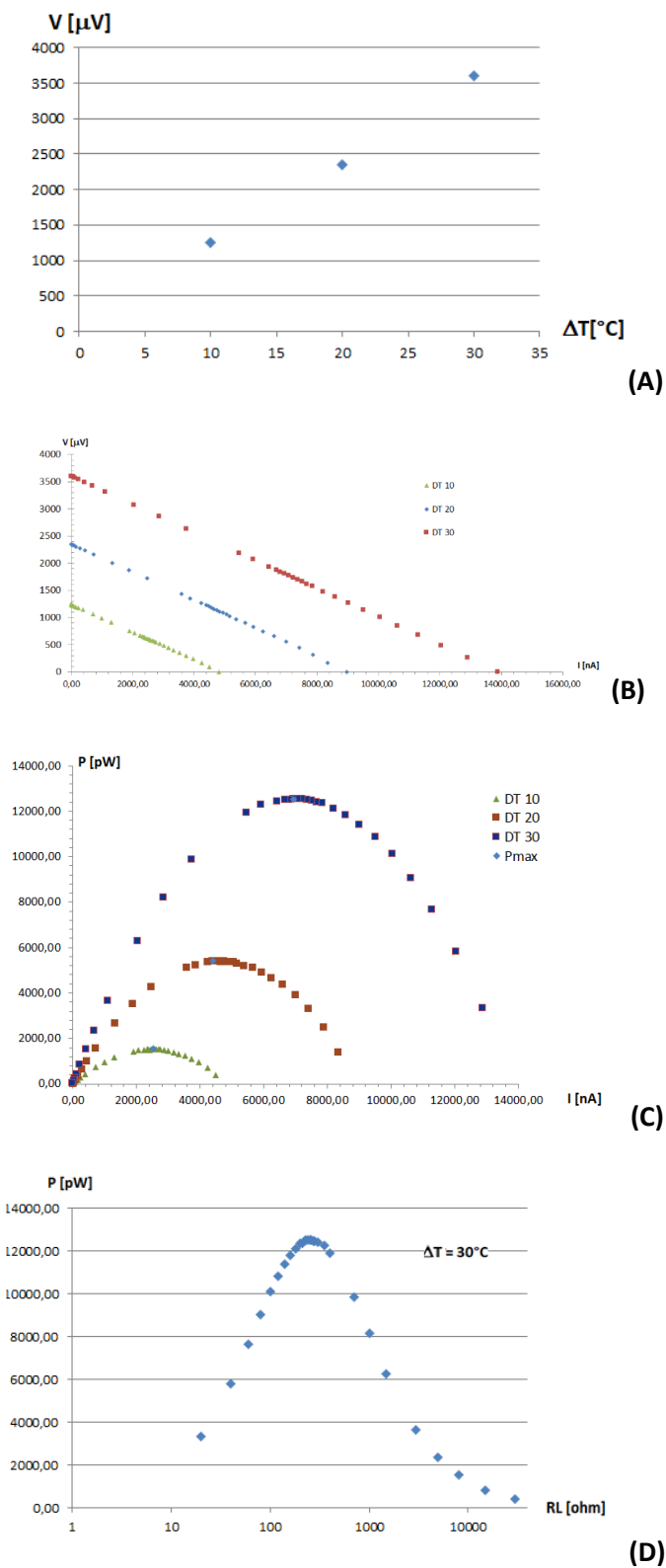


Figura 9: Grafici relativi alle proprietà elettriche del dispositivo in funzione della differenza di temperatura.

- A) Tensione a vuoto in funzione della differenza di temperatura per una temperatura media di 29°C
- B) Tensione sul carico in funzione della corrente
- C) Potenza sviluppata sul carico in funzione della corrente generata
- D) Potenza generata in funzione della resistenza di carico

La tabella 5 mostra i principali parametri elettrici che caratterizzano le prestazioni del dispositivo termoelettrico stampato.

Materiale	Ri [ohm]	10°C			20°C			30°C		
		Isc [nA]	Voc [μV]	Pmax [pW]	Isc [nA]	Voc [μV]	Pmax [pW]	Isc [nA]	Voc [μV]	Pmax [pW]
PEDOT:PSS/SWCNT 20% (p) e Ag (n)	250	2529	1254	1535	4396	2354	5412	6942	3602	12530

Tabella 5: Prestazioni elettriche del dispositivo con struttura planare PEDOT:PSS/SWCNT 20% - Ag .

La figura 9A mostra la dipendenza lineare tra la tensione a circuito aperto e la differenza di temperatura applicata ed evidenzia una pendenza della curva di 110 μV/°C. La figura 9B, invece, riporta la caratteristica I-V del dispositivo per differenti differenze di temperatura. Si osserva che il comportamento del dispositivo stampato ha una caratteristica di tipo ohmico con andamento lineare della tensione rispetto alla corrente. Il valore di potenza massima osservabile nella figura 9C è di 13 nW per una differenza di temperatura di 30°C. Dal confronto del grafico tensione-corrente alle varie temperature (figura 9B) con il grafico resistenza di carico-potenza valutato alle stesse temperature (figura 9D) si evince che la potenza massima si trasferisce nelle condizioni di carico adattato, condizione in cui la resistenza di carico è pari alla resistenza interna del dispositivo.

Con lo scopo di aumentare le prestazioni del dispositivo in termini di potenza in uscita in caso di carico adattato sono stati realizzati moduli con struttura cosiddetta ad “origami” che, pur essendo realizzati mediante deposizione di strutture planari in forma di film presentano, dopo opportune piegature del substrato, una forma finale di tipo verticale comunemente detta cuboide.

Proprio per facilitare la piegatura, la stampa dei film è stata effettuata su substrati di spessore pari a 25 μm e quindi più sottili rispetto a quelli utilizzati per i dispositivi precedenti (125 μm).

Per realizzare tali dispositivi si è reso necessario utilizzare nuovi telai con una geometria idonea alla stampa dei materiali di tipo p e di tipo n. La figura 10 mostra in dettaglio le stampe effettuate in sequenza per la realizzazione di un modulo tipo “Origami”. Ciascun modulo contiene 16 dispositivi disposti elettricamente in serie e, una volta ripiegati a formare un cuboide, risulteranno essere termicamente in parallelo.

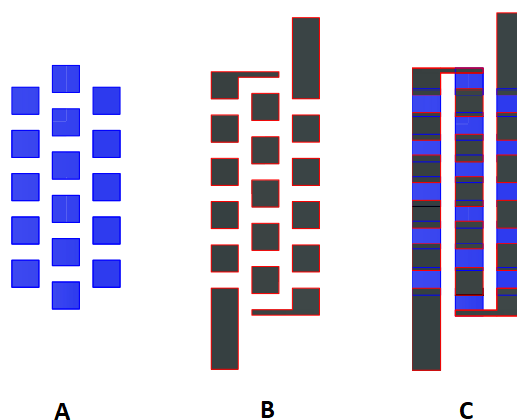


Fig. 10 – Disegno delle stampe per il materiale di tipo p e tipo n. A=organico tipo p B=argento tipo n C=Modulo completo

Avendo a disposizione sia i materiali, sia il sistema di caratterizzazione si è proceduto alla realizzazione “home made” dei telai secondo la procedura illustrata in figura 11.

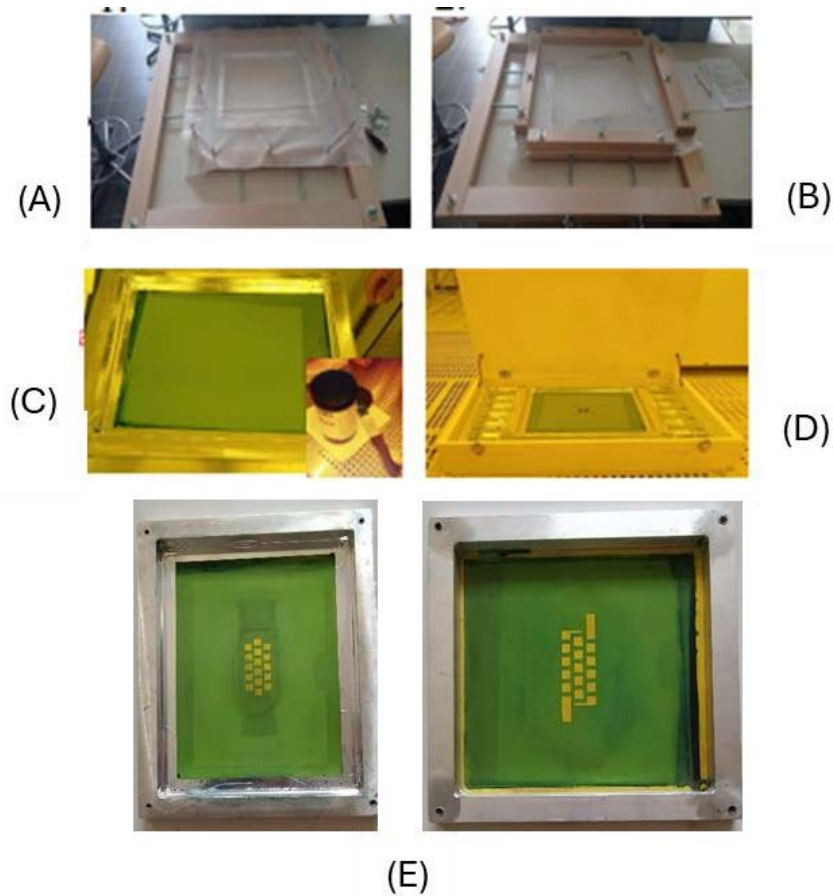


Fig.11: Realizzazione “home made” dei telai serigrafici: A) B) Applicazione tela su cornice; C) Deposizione foto-emulsione; D) Esposizione UV; E) Telai pronti per la stampa

In tabella 6 le caratteristiche dei telai preparati per la realizzazione dei moduli con struttura “origami”.

Materiale da stampare	Mesh	Diametro filo μm	Apertura mm
Materiale p	120	36	47
Materiale n	120	36	47
Contatti elettrici	120	36	47

Tabella 6: Caratteristiche dei telai serigrafici usati per stampare il materiale p, il materiale n e i contatti elettrici

Sono stati quindi realizzati i seguenti moduli con stessa struttura “origami” utilizzando due differenti paste per il materiale di tipo p:

- a) pasta commerciale a base di PEDOT:PSS (ORGACON 5015 della Dupont)
- b) pasta a base di PEDOT:PSS/SWCNT 20% da noi realizzata secondo quanto descritto in precedenza

La figura 12 riporta le foto di un modulo ottenuto dopo la sequenza di stampa.

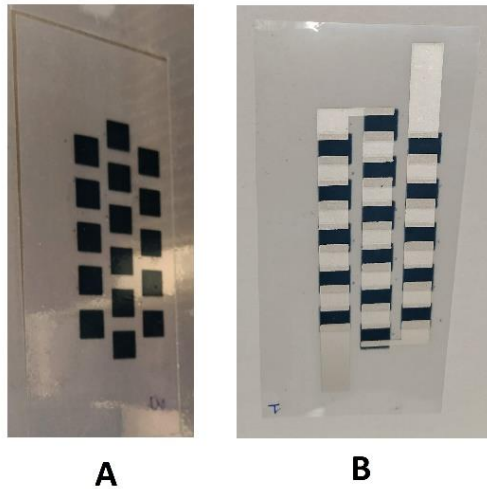


Fig. 12 – Sequenza di stampa origami. A= stampa organico tipo p (PEDOT:PSS/20%SWCNT) B=stampa completa con argento

Il substrato è stato successivamente piegato in modo da ottenere un modulo compatto. La figura 13 mostra la sequenza di piegature (A) e il modulo ottenuto, pronto per essere testato (B).

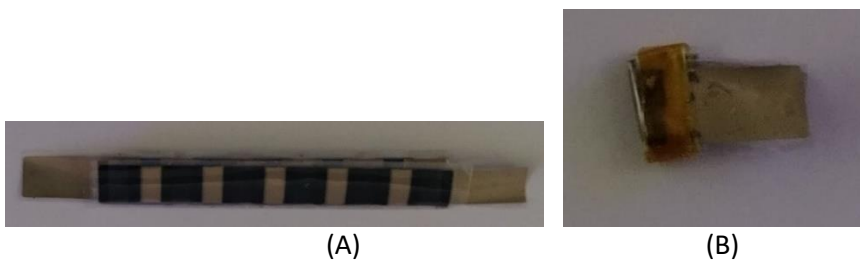


Fig. 13 – Sequenza di piegature (A) e modulo piegato in struttura “origami”(B)

Per mantenere la compattezza del dispositivo è stato applicato del kapton adesivo lungo i bordi (fig.13 B) non soggetti a riscaldamento e/o raffreddamento.

Il sistema di misura delle caratteristiche elettriche del dispositivo è stato originariamente pensato per strutture di dispositivo di tipo planare. In particolare, per impostare le temperature sono state utilizzate due celle di Peltier su cui il dispositivo è appoggiato, figura 14A. Per la caratterizzazione del dispositivo a struttura verticale, invece, è stato necessario modificare la posizione delle celle di Peltier secondo quanto indicato in figura 14B.

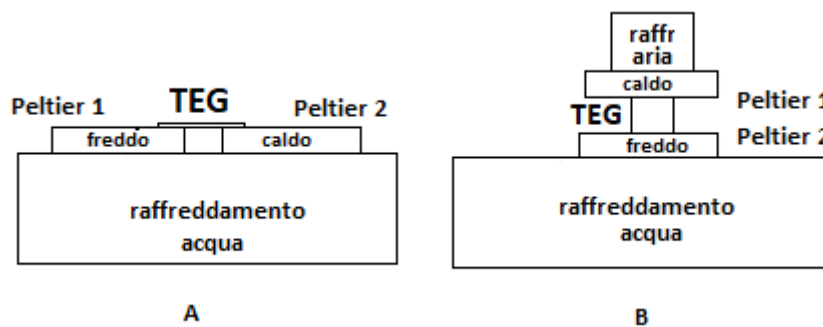
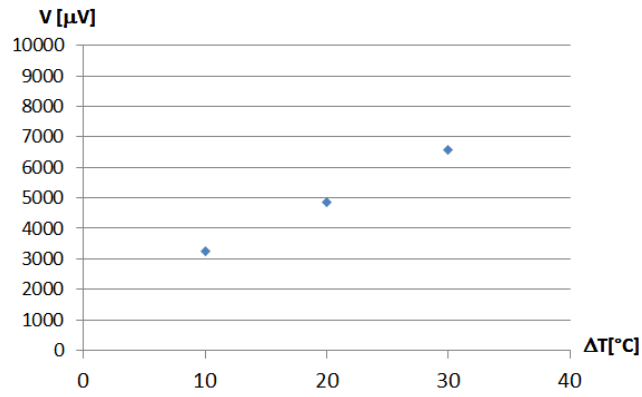
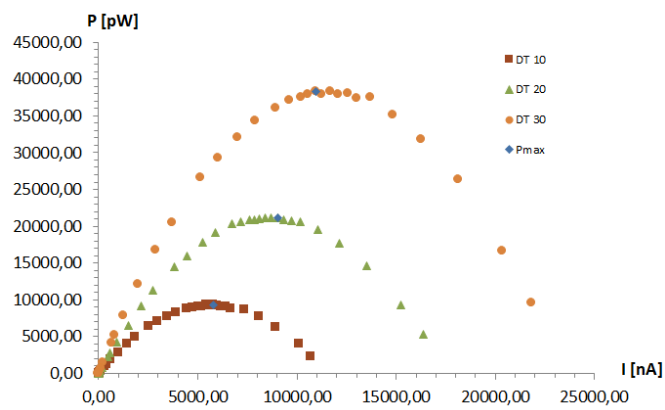


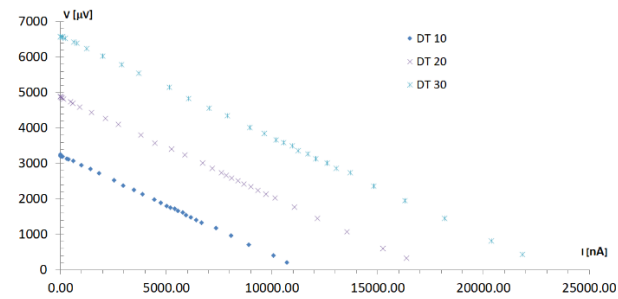
Fig. 14 – Confronto tra lo schema del sistema di misura per dispositivi planari (A) e origami (B) I risultati della caratterizzazione elettrica dei moduli con struttura “origami” sono riportati graficamente nelle figure 15 e 16



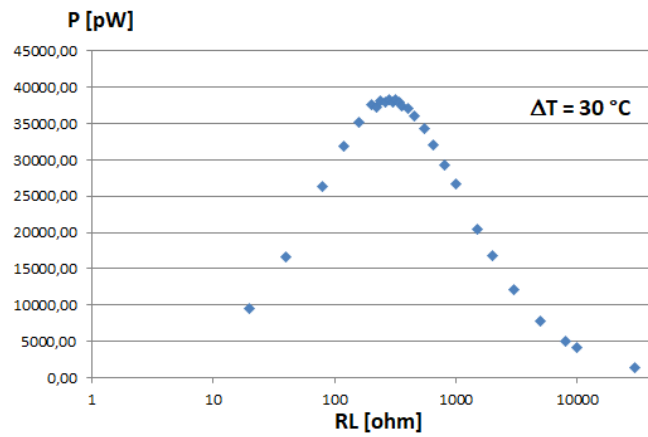
(A)



(B)



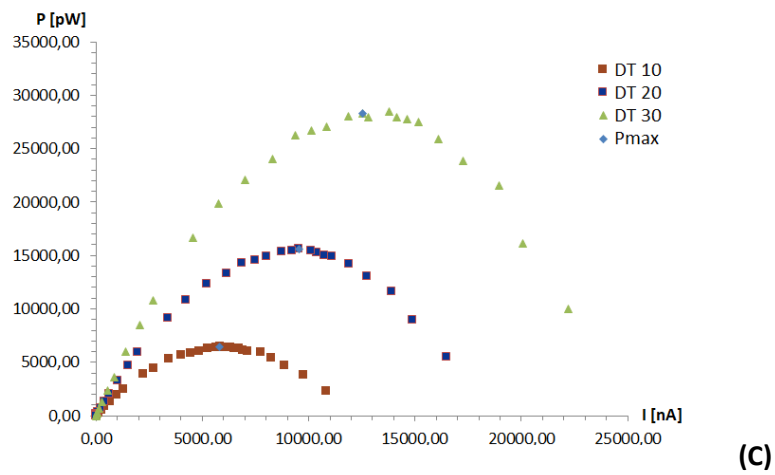
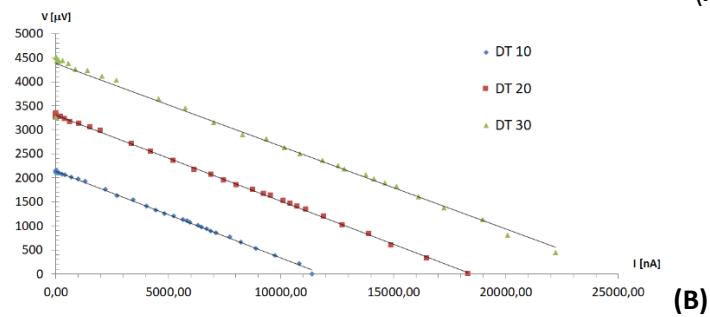
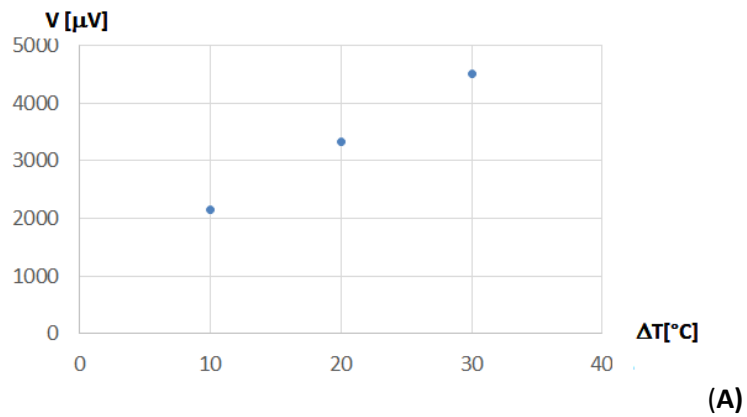
(C)



(D)

Figura 15: Grafici relativi alle proprietà elettriche del modulo a) (PEDOT:PSS ORGACON 5015) in funzione della differenza di temperatura.

- A) Tensione a vuoto in funzione della differenza di temperatura
- B) Tensione sul carico in funzione della corrente
- C) Potenza sviluppata sul carico in funzione della corrente generata
- D) Potenza generata in funzione della resistenza di carico



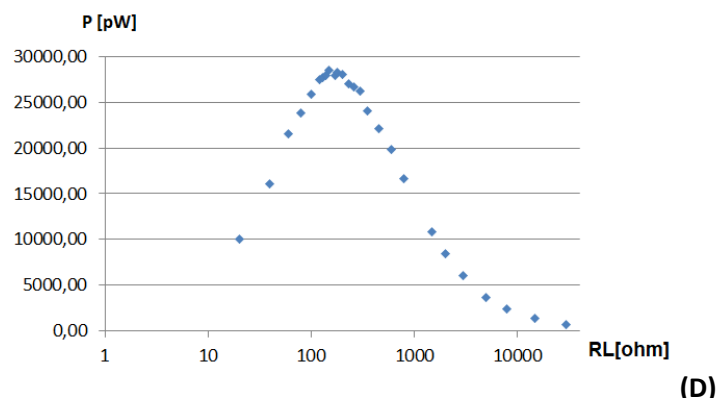


Figura 16: Grafici relativi alle proprietà elettriche del modulo b) (PEDOT:PSS/20% SWCNT) in funzione della differenza di temperatura.

- A) Tensione a vuoto in funzione della differenza di temperatura
- B) Tensione sul carico in funzione della corrente
- C) Potenza sviluppata sul carico in funzione della corrente generata
- D) Potenza generata in funzione della resistenza di carico

La tabella 7 mostra i principali parametri elettrici che caratterizzano le prestazioni dei moduli termoelettrici stampati con struttura “origami”.

Materiall	Ri [ohm]	10°C			20°C			30°C		
		Isc [nA]	Voc [μV]	Pmax [pW]	Isc [nA]	Voc [μV]	Pmax [pW]	Isc [nA]	Voc [μV]	Pmax [pW]
PEDOT:PSS 5015 (p) e Ag (n)	280	5782	3260	9367	9011	4866	21114	10950	6567	38368
PEDOT:PSS/SWCNT 20% (p) e Ag (n)	150	5827	2150	6451	9568	3320	15562	12535	4500	28282

Tabella 7: Prestazioni elettriche dei moduli con struttura Origami.

Le figura 15Ae 16A mostrano la dipendenza lineare tra la tensione a circuito aperto e la differenza di temperatura applicata ed evidenziano una pendenza delle curva di $160 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e $117 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, rispettivamente. Le figura 15B e 16B riportano la caratteristica I-V dei dispositivi per differenti differenze di temperatura. Si osserva che il comportamento dei moduli stampati ha una caratteristica di tipo ohmico con andamento lineare della tensione rispetto alla corrente.

Il valore di potenza massima osservabile nella figura 15C è 40 nW e nella figura 16C di 28 nW per una differenza di temperatura di 30°C . Dal confronto del grafico tensione-corrente alle varie temperature (figure 15B e 16B) con il grafico resistenza di carico-potenza valutato alle stesse temperature (figure 15D e 16D) si evince che la potenza massima si trasferisce nelle condizioni di carico adattato, condizione in cui la resistenza di carico è pari alla resistenza interna del dispositivo.

I moduli con struttura “origami” migliori sono risultati essere quelli con materiale tipo p a base di il PEDOT:PSS ORGACON 5015 che hanno raggiunto i 40 nW di potenza massima in condizioni di carico adattato.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Durante il periodo di riferimento, l'attività riportata non ha richiesto l'uso di consulenze esterne.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

9.1

- 1) Articolo accettato dalla rivista Macromol. Symp. 2023 dal titolo "Flexible Screen-printed Thermoelectric materials based on PEDOT:PSS/DWCNT Composites"

10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione eventualmente scaturiti dall'attività svolta

10.1

- 1) Partecipazione con un poster dal titolo: "Flexible Screen-printed Thermoelectric materials based on PEDOT:PSS/DWCNT Composites" alla 11th Conferenza Internazionale TOP (Times of Polymers and Composites), 11-15 Giugno 2023, Ischia-Italy.