

Ricerca di Sistema elettrico



Materiali e componenti avanzati per impianti CSP-
Fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di
sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli
specchi autopulenti (LA1.9)

Anna Castaldo, Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello

Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli specchi autopulenti(LA1.9)

Anna Castaldo, Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello (ENEA)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.9 "Solare termodinamico"

Linea di attività: LA1.9

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Anna Castaldo, ENEA

Mese inizio previsto: 25

Mese inizio effettivo: 25

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Individuazione di formulazioni nano-composite ibride con potenzialità autodiagnostiche integrabili nei rivestimenti autopulenti.....	11
7.1.1	Formulazioni piezoelettriche.....	11
7.1.2	Resistivi inorganici e polimerici.....	14
7.2	Prototipi.....	16
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	17
9	Pubblicazioni scientifiche	18
10	Eventi di disseminazione	19

Indice delle figure

Figura 1 Principio di funzionamento. a) le particelle di polvere si depositano sulla superficie esposta dello specchio. b) La pressione esercitata dalla forza peso della polvere induce una deformazione nel film piezoelettrico generando un segnale elettrico proporzionale.....	12
Figura 2 Confronto tra lo spettro RX di un campione di AlN piezoelettrico e (in blu) e un AlN amorfo (in rosso).	13
Figura 3 Misure di trasmittanza di film di nitruro depositati nelle medesime condizioni al variare dello spessore. In azzurro la misura del substrato di riferimento: un vetro Eagle 1,1mm.....	14
Figura 4 Determinazione della Tg di un composito polimerico autopulente trasparente e autodiagnostico al variare della temperatura.....	16
Figura 5 - Foto dei dispositivi prototipali su scala laboratoriale.	16

Indice delle tabelle

Tabella 1 Esempio di tre campioni di nitruro di alluminio realizzati con diverse condizioni di deposizione che mostrano caratteristiche molto diverse.....	12
Tabella 2 Compendio delle misure di conducibilità planare e ortogonale dei film di ZnO	15

1 Risultati attesi

La linea di attività LA1.9 si propone di aggiungere alle soluzioni autopulenti sviluppate nel corso delle precedenti annualità funzionalità sensoristiche idonee alla razionalizzazione delle operazioni di pulizia e, più in generale, al monitoraggio dinamico del livello di prestazione sia del singolo elemento che dell'intero campo solare. I risultati attesi nell'ambito della presente linea di attività, funzionali agli obiettivi prefissi della LA1.9 sono:

- la deposizione attraverso tecniche scalabili a livello industriale (quali lo sputtering, e/o lo spray, e/o la stampa) di film sottili piezoelettrici e/o resistivi per ottenere rivestimenti autopulenti in grado di fornire informazioni sul livello di sporramento/degrado delle prestazioni del componente su cui sono applicati;
- la fabbricazione di un prototipo di sensore, su scala laboratoriale, integrabile in rivestimenti autopulenti per specchi solari.

2 Risultati ottenuti

Sono stati ottenuti i seguenti risultati previsti dal Progetto:

1. Deposizione attraverso tecniche scalabili a livello industriale (quali lo sputtering, e/o lo spray, e/o la stampa) di film sottili piezoelettrici e/o resistivi per ottenere rivestimenti autopulenti in grado di fornire informazioni sul livello di sporcamento/degrado delle prestazioni del componente su cui sono applicati.
2. Prototipo di sensore piezoelettrico su scala laboratoriale.
3. Come risultato aggiuntivo è stato eseguito uno studio di fattibilità di prototipi di sensori resistivi per specchi BSM e FSM fabbricati su scala laboratoriale.

Il conseguimento di siffatti risultati si configura come beneficio per il sistema elettrico nazionale e i suoi utenti, in quanto la disponibilità di innovativi rivestimenti sensori per superfici riflettenti potrà determinare, in una prospettiva di medio-lungo termine, un impatto considerevole in termini di riduzione dei costi delle operazioni di ordinaria manutenzione del campo solare (riduzione del consumo di acqua per singolo lavaggio e della frequenza dei cicli di pulizia) e, quindi, del costo dell'energia prodotta mediante tecnologia CSP, in quanto consentirà di gestire on demand le operazioni di pulizia.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi dalla linea di attività LA1.9 sono n° 1 report tecnico e n° 1 prototipo:

- Report: "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli specchi autopulenti" (Dicembre 2024).
- N° 1 prototipo di sensore, su scala laboratoriale, integrabile in rivestimenti autopulenti per specchi solari.

4 Prodotti sviluppati

I prodotti sviluppati nell'ambito della LA1.9 sono il presente n° 1 report tecnico e n° 1 prototipo:

- A. Castaldo, E. Gambale, G. Vitiello, "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli specchi autopulenti", Dicembre 2024, Report RdS_PTR 22-24_PR1.9_LA1.9_303.
- N° 1 prototipo di sensore, su scala laboratoriale, integrabile in rivestimenti autopulenti per specchi solari.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Le attività della LA1.9 non hanno avuto scostamenti tecnici rispetto a quanto previsto dal capitolato vigente di Progetto e non vi sono state criticità nel loro espletamento.

In merito agli scostamenti economici, i costi totali (escluse spese generali) sostenuti e rendicontati per l'esecuzione della LA1.9, pari a circa 55,5 k€, sono minori rispetto a quelli a preventivo, pari a circa 60,5 k€. Le principali motivazioni degli scostamenti sono:

- I costi di personale (cat. A) a consuntivo, pari a 46,5 k€, sono minori del preventivo, pari a 49,5 k€, in quanto ENEA ha sostenuto ma non ha potuto esporre a consuntivo, causa superamento del contributo totale massimo ammesso dal capitolato vigente di Progetto, ulteriori circa 3 k€ di costi di personale.
- I costi per strumenti, attrezzature e software specifico (cat. B) a consuntivo, pari a circa 8,3 k€, sono minori del preventivo, pari a 10 k€, perché, a causa di ritardi principalmente dovuti a problematiche amministrative nella procedura di affidamento dell'appalto, l'entrata in funzione di un analizzatore di parametri elettrici integrato (strumentazione per caratterizzazione elettrica) che era prevista a inizio Ottobre 2023, nell'ambito della precedente LA1.8, è effettivamente avvenuta il 27/02/2024, nell'ambito della LA1.9 con minori costi esposti (cfr. applicazione criterio quota d'uso).

6 Sintesi delle attività svolte

La LA1.9 ha ampliato il lavoro su nanocompositi nitrurici e polimeri trasparenti resistivi per specchi solari, aggiungendo funzionalità di autodiagnosi del livello di sporramento e failure dello specchio solare. Sono state studiate le proprietà piezoelettriche e resistive dei materiali per monitorare polvere e guasti. È stato sviluppato un sensore piezoelettrico con coefficiente d_{33} di 1,8 pC/N e testati compositi inorganici a base di ZnO e organici a base di polisilsesquiossani, combinando proprietà piezoelettriche e resistive. I rivestimenti mantengono trasparenza e capacità autopulenti, consentono l'integrazione in architetture neurali per il sensing distribuito e agiscono nella riduzione dei costi di manutenzione. È stata dimostrata la scalabilità industriale di film sottili autopulenti con potenziali applicazioni sensoristiche, realizzando un prototipo piezoelettrico e sensori resistivi integrabili negli specchi solari.

7 Dettaglio delle attività svolte

Le principali aziende del settore energetico, tra cui Schneider Electric, Siemens, Bosch, GE, ABB e Honeywell, stanno progressivamente adottando strategie orientate alla digitalizzazione. Nell'ambito dell'energia solare a concentrazione (CSP), la digitalizzazione degli impianti rappresenta una frontiera chiave per migliorare l'efficienza e la gestione operativa. Per questo motivo, le aziende produttrici di componenti per tali sistemi, insieme ai Centri di Ricerca, stanno investendo nella trasformazione intelligente del campo solare.

L'obiettivo di questa evoluzione è ottimizzare il monitoraggio del funzionamento degli impianti, individuare fenomeni di sporco che possano ridurre le prestazioni e rendere più efficienti gli interventi di manutenzione ordinaria. Per raggiungere questi risultati, si stanno sviluppando tecnologie avanzate che comprendono sensori innovativi, attuatori intelligenti e sistemi di comunicazione avanzati, supportati da nuovi brevetti e soluzioni digitali all'avanguardia [1].

Attualmente, non esistono impianti CSP operativi che siano interamente gestiti tramite tecnologie digitali. Per colmare questa lacuna, sarebbe necessario implementare un'adeguata sensoristica nei punti strategici del sistema, tra cui il campo solare, gli elementi ricevitori, i serbatoi di accumulo e la turbina. Inoltre, tali sensori dovrebbero essere interfacciati con soluzioni digitali avanzate e integrati in un ecosistema tecnologico connesso, in grado di elaborare i dati raccolti e fornirli in maniera efficace al decisore-gestore dell'impianto [2].

Per migliorare il monitoraggio del campo solare, una possibile strategia consiste nell'installazione ex post di sensori sugli specchi, sia commerciali che prototipali, oppure nell'adozione di un unico sensore rappresentativo dell'intero sistema. Tuttavia, la distribuzione di sensori su ogni specchio risulta particolarmente costosa. Ad esempio, per un impianto sperimentale come ENEA-SHIP, con una potenza termica di picco di 190 kWt, il costo stimato per l'installazione di sensori piezoelettrici commerciali destinati al monitoraggio dello sporco ammonta a circa 20.000 euro, senza contare le spese per le schede di acquisizione dati necessarie all'elaborazione delle informazioni raccolte.

Una soluzione alternativa è stata sperimentata nell'impianto di Benguerir, in Marocco, dove si sta testando un dispositivo prototipale per la rilevazione dello sporco degli specchi solari basato su immagini fotografiche. Questo sistema, anziché utilizzare riflettometri portatili per misurare la riflettanza, sfrutta una rete neurale convoluzionale (CNN) che analizza le immagini scattate sul singolo specchio e le confronta con un database contenente dati di riflettanza a diversi livelli di sporco [3]. Un siffatto sistema, oltre ad essere difficilmente implementabile richiede complesse operazioni di calibrazione per confronto e di certo non

[1] Villasante-Corredoir, C., Mabe-Alvarez, J., Les Aguerrea, I., Peña-Lapiente, A., Sanchez-Gonzalez, M., Lopez, S. (2020). SMARTCSP: INDUSTRY 4.0 APPROACH FOR AN EFFECTIVE CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP) COST REDUCTION. DYNA, 95(6). 629-634. DOI: <https://doi.org/10.6036/9766>

[2] Adak, D., Bhattacharyya, R., Barshilia, H.C., 2022. A state-of-the-art review on the multifunctional selfcleaning nanostructured coatings for PV panels, CSP mirrors and related solar devices. Renew. Sustain. Energy Rev. 2022 159 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112145>.

[3] Massaab El Ydrissi, Hicham Ghennoui, El Ghali Bennouna, Azouzoute Alae, Mounir Abraim, Ibrahim Taabane, Abdi Farid, Dust InSMS: Intelligent soiling measurement system for dust detection on solar mirrors using computer vision methods, Expert Systems with Applications, Volume 211, 2023, 118646, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118646>.

sembra eccellere per versatilità. Diversamente, l'utilizzo di una rete neurale è da considerarsi profittevole, ma a nostro avviso il meccanismo di sensing dovrebbe essere distribuito. Ci troviamo chiaramente agli albori di una tecnologia ancora in fase di sviluppo e caratterizzata da una serie di sfide da affrontare. Il primo passo consiste nell'identificare con precisione i parametri da monitorare: sporcamento, guasti derivanti da impatti meccanici, eccessiva umidità, formazione di brina o altri fenomeni critici. Occorre inoltre stabilire la frequenza del monitoraggio (per ogni specchio, per ogni fila o per l'intero campo solare), il livello di affidabilità richiesto, il numero e la tipologia di interfacce da interrogare, nonché i relativi costi di implementazione.

Considerata la complessità della sensorizzazione ex post, un'opportunità interessante potrebbe derivare dal **sensing distribuito**, ovvero la capacità di integrare elementi sensibili direttamente negli strati già previsti negli specchi solari, come ad esempio quelli protettivi, che in precedenti sviluppi progettuali sono stati resi autopulenti. In tale contesto, le formulazioni individuate per scopi sensoristici sono le seguenti:

- **Fasi piezoelettriche a base di nitruro di alluminio e suoi politipoidi**, fabbricabili mediante sputtering con specifiche modifiche ai parametri di processo, per lo sviluppo di sensori gravimetrici in grado di rilevare la presenza di polveri.
- **Fasi conduttive di nanocompositi ibridi**, depositabili attraverso tecniche avanzate di processing dei polimeri, per la realizzazione di sensori multi-parametrici.

Il principio alla base di queste scelte risiede nella possibilità di sfruttare le medesime linee produttive – e dunque contenendo i costi – per realizzare una sorta di **"pelle intelligente"** dello specchio solare, capace di svolgere sia funzioni autopulenti sia attività di autodiagnosi, migliorando così l'efficienza e l'affidabilità complessiva del sistema.

7.1 Individuazione di formulazioni nano-composite ibride con potenzialità autodiagnostiche integrabili nei rivestimenti autopulenti.

7.1.1 Formulazioni piezoelettriche

Nelle precedenti annualità, l'attività di ricerca svolta aveva come obiettivo quello di proporre soluzioni (economiche e facilmente integrabili nei processi produttivi) che limitassero il consumo di acqua nelle operazioni di lavaggio degli specchi solari. Una delle soluzioni proposte (e finalizzate nel prototipo di dimensioni reali testato nell'impianto dimostrativo ENEASHIP) ha previsto la sostituzione dell'ultimo layer (allumina, Al_2O_3) degli specchi solari BSM di vetro con il nitruro di alluminio (AlN). Questo, come ben noto in letteratura [4], manifesta comportamenti molto differenti (auxetismo, alta idrofobicità, piezoelettricità) al variare delle condizioni di fabbricazione. Qui, in particolare, ci siamo concentrati sul suo comportamento piezoelettrico, al fine di ottenere un sensore di sporcamento. Le fasi piezoelettriche sviluppano un dipolo elettrico quando viene applicata loro la sollecitazione meccanica. Tutti i dipoli si sommano sull'intero materiale e producono una polarizzazione netta che si traduce nella generazione di un campo elettrico, che può essere trasdotto piezo-elettricamente in tensione e corrente elettrica e, quindi, rilevato (in Figura 1 è indicato il principio di funzionamento).

[4] McKinlay, M., Fleming L., García M. P., L. N. Sierra, P. V. Castro, D. Araujo, B. J. García, D. Gibson, C. G. Nuñez, On the Piezoelectric Properties of Zinc Oxide Thin Films Synthesized by Plasma Assisted DC Sputter Deposition. Adv. Mater. Interfaces 2024, 11, 2400252. <https://doi.org/10.1002/admi.202400252>

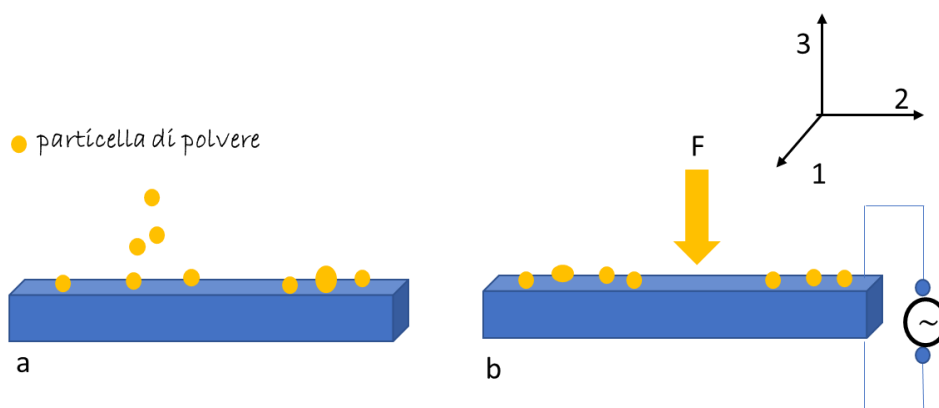


Figura 1 Principio di funzionamento. a) le particelle di polvere si depositano sulla superficie esposta dello specchio. b) La pressione esercitata dalla forza peso della polvere induce una deformazione nel film piezoelettrico generando un segnale elettrico proporzionale

In altri termini, se rivestiamo uno specchio solare con un materiale piezoelettrico, possiamo trasformarlo in un sensore di polvere. Negli ambienti desertici, dove le condizioni di polvere sono estreme, la quantità di polvere che si accumula su uno specchio solare può essere significativa. In regioni come il Sahara o il Medio Oriente, i tassi di deposizione della polvere variano da 10 a 100 g/m² al giorno, con una media di circa 1,5 kg/m² nel corso di un mese [5]. Questo accumulo di polvere esercita una pressione sulla superficie dello specchio, che può essere rilevata dal materiale piezoelettrico come un segnale elettrico. La trattazione delle proprietà del materiale al variare delle condizioni di processo, svolta per selezionare le migliori condizioni di fabbricazione del dispositivo prototipale richiederebbe uno spazio molto più cospicuo e non è ritenuta indispensabile ai fini della comprensione dell'attività. Si tenga presente che è stata effettuata una campagna sperimentale di sintesi e caratterizzazione di film sottili di nitrato di alluminio atto a definire le condizioni che massimizzassero il coefficiente piezoelettrico senza compromettere le proprietà ottiche (in Tabella 1 un esempio di campioni realizzati con proprietà diverse al variare delle condizioni di deposizione).

Tabella 1 Esempio di tre campioni di nitrato di alluminio realizzati con diverse condizioni di deposizione che mostrano caratteristiche molto diverse

Campione	Potenza (W)	Pressione (Pa)	Ar flux (sccm)	N2 flux (sccm)	Spessore (nm)	WCA (°)
AlNpiezo	P=3600W	0.4	200	70	341±1.5	95.3±1.0
	I=5.90A					
	V=618V					
AlNaux	P=1800W	4	200	90	96.1±0.3	100.8±2
	I=6.8A					
	V=269V					
AlNam	P=1800W	2.4	200	70	219.5±0.5	90.3±1.0
	I=6.80A					
	V=270V					

[5] Ahmed Amine Hachicha, Israa Al-Sawafta, Dhouha Ben Hamadou, Numerical and experimental investigations of dust effect on CSP performance under United Arab Emirates weather conditions, Renewable Energy, Volume 143, 2019, Pages 263-276, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.144>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119306287>)

L'attività sperimentale di fabbricazione ha previsto una prima fase di ricerca delle condizioni di deposizione per realizzare un film di AlN amorfo. Dalle condizioni di fabbricazione di un amorfo, per promuovere la coalescenza di grani di wurtzite colonnari fini in grani più grandi abbiamo proceduto diminuendo la pressione di processo e un aumento della potenza fornita al target di alluminio. In Figura 3, il confronto tra lo spettro X di due film sottili di AlN depositati in differenti condizioni al fine di fabbricare un film piezoelettrico (in blu) e uno amorfo (in rosso).

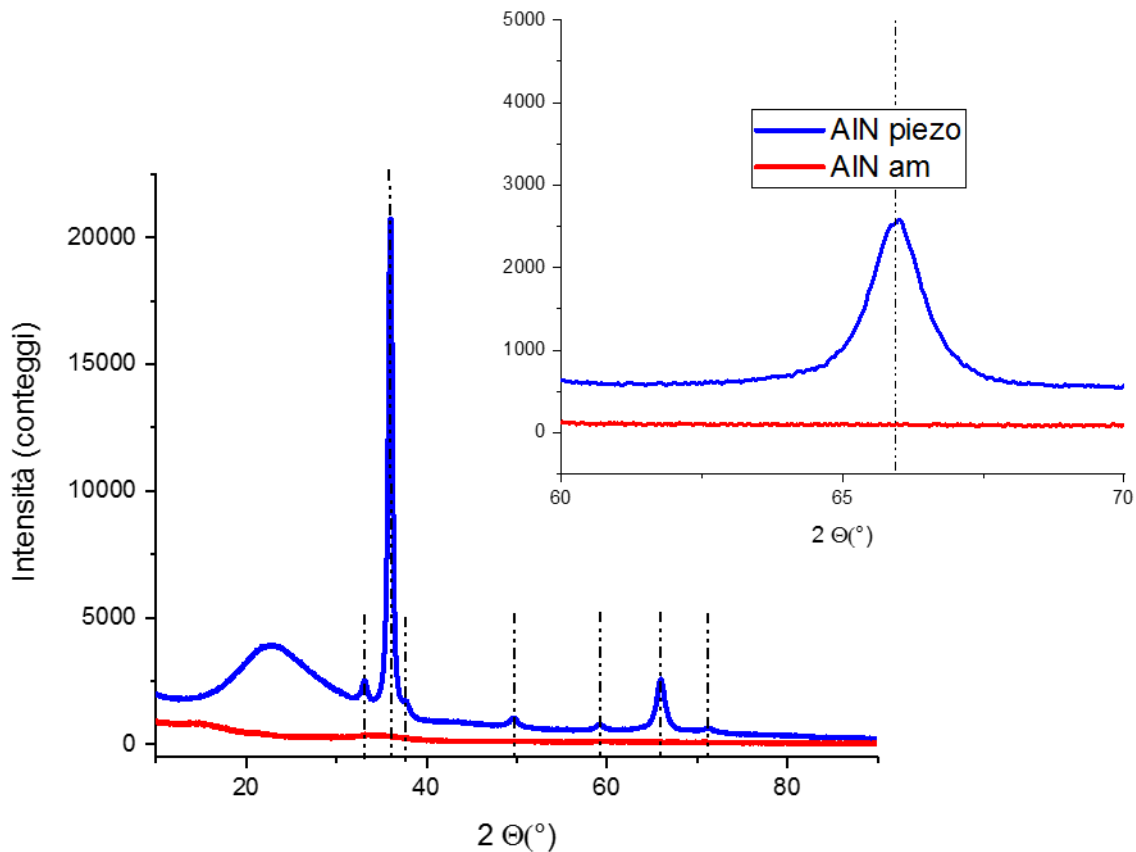


Figura 2 Confronto tra lo spettro RX di un campione di AlN piezoelettrico e (in blu) e un AlN amorfo (in rosso).

L'effetto piezoelettrico è direzionale e dipende dall'anisotropia del materiale. Viene valutato attraverso parametri come il coefficiente di deformazione d_{33} , che misura la relazione tra la deformazione lungo la direzione di polarizzazione e il campo elettrico applicato. Un valore più alto di d_{33} indica una maggiore efficienza nella conversione dell'energia meccanica in elettrica. L'entità del valore d_{33} ha un impatto diretto sulle prestazioni del materiale piezoelettrico e di conseguenza influisce sull'efficacia del materiale nelle applicazioni sensoristiche.

Nella precedente annualità, uno degli obiettivi dell'attività sperimentale prevedeva l'istallazione in un campo sperimentale reale dei prototipi di specchio realizzati. Dallo studio è emerso con forza che lo sporco, non solo non è uniforme sull'area dell'intero campo solare, ma non lo è neanche sull'area del singolo specchio. Pertanto la dislocazione di singoli sensori lungo il campo solare potrebbe non dare informazioni del reale grado di "sporco" del campo. Appare cruciale il passaggio al sensing distribuito. In questa ottica il prerequisito di alta trasparenza dell'area sensorizzata è più stringente e di conseguenza anche la fase di

ottimizzazione tra le proprietà “elettriche” e quelle ottiche: al crescere dello spessore del materiale aumenta l'intensità del segnale piezoelettrico (i sensori piezoelettrici in commercio sono spesso diversi micrometri) ma diminuisce la trasparenza e quindi, la qualità del riflettore. Inoltre, altro aspetto da tenere in considerazione è che su un'area relativamente piccola, come 1 cm^2 , il segnale piezoelettrico generato dalla pressione della polvere sarebbe molto piccolo, nell'ordine dei picovolt (pV), che è troppo basso per essere facilmente rilevabile dai sensori standard. Tuttavia, aumentando l'area sensibile a 1 m^2 , il segnale generato aumenta in modo significativo, raggiungendo circa 10 microvolt (μV), che è molto più rilevabile del segnale da un'area più piccola. L'importanza di distribuire il rilevamento in questo caso è cruciale. Un'area sensibile più ampia non solo amplifica il segnale piezoelettrico abbastanza da superare la soglia di rumore (tipicamente nell'intervallo dei nanovolt), ma consente anche un monitoraggio più preciso dell'intera superficie dello specchio, calcolando la media delle variazioni di pressione localizzate causate dalla polvere.

Per quanto riguarda la trasparenza del rivestimento in Figura 3, è mostrata la misura di trasmittanza di film di nitruro depositati nelle medesime condizioni al variare dello spessore.

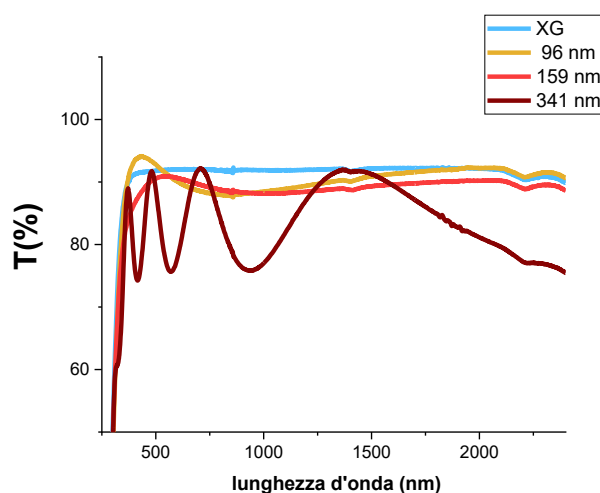


Figura 3 Misure di trasmittanza di film di nitruro depositati nelle medesime condizioni al variare dello spessore. In azzurro la misura del substrato di riferimento: un vetro Eagle 1,1mm.

7.1.2 Resistivi inorganici e polimerici

Una proprietà utile per rilevare i guasti negli specchi solari, indipendentemente dalla loro architettura, è la variazione della conducibilità elettrica del rivestimento. L'idea centrale è che una “pelle intelligente” debba essere multifunzionale, ossia capace di fornire diverse informazioni, analogamente ai materiali utilizzati nel settore edilizio.

Seguendo questo principio, il futuro sviluppo di una **rete neurale di dispositivi**, basata su materiali selezionati, potrebbe essere semplificato scegliendo proprietà facilmente integrabili. Il nitrato di alluminio, noto per le proprietà isolanti, è attualmente oggetto di studio per un possibile drogaggio **con particelle metalliche**, al fine di ottenere compositi resistivi in grado di modificare la loro resistività elettrica in risposta a diversi fattori legati ai guasti.

Parallelamente, è stato testato un altro materiale come possibile **rivestimento sensibile per specchi solari di architettura BSM**: una famiglia di **compositi inorganici** contenenti diverse concentrazioni di ossido di zinco (ZnO). Questi materiali mostrano sia proprietà piezoelettriche – grazie all'anisotropia del film sottile e al comportamento intrinseco dello ZnO – sia proprietà resistive, dovute alla presenza di **isole cristalline conduttive di ZnO** all'interno di una matrice silicatica isolante. Ciò significa che ogni composito può essere ottimizzato per svolgere

funzioni specifiche, come il rilevamento di guasti, la misurazione dello sporco o il monitoraggio dell'umidità relativa.

La fabbricazione di questi compositi è stata realizzata attraverso una reazione allo stato solido tra strati ultrasottili di silicio e ossido di zinco, depositati tramite sputtering e sottoposti a temperature comprese tra 450 °C e 560°C. Questo processo porta alla formazione di domini cristallini di ZnO di varie dimensioni all'interno di una matrice silicatica trasparente, che conferisce al materiale anche capacità autopulenti.

Anche in questo caso la trattazione chimico-fisica del processo di sintesi e caratterizzazione viene omessa, preferendo esibire i risultati della caratterizzazione elettrica di questi compositi.

In Tabella 1, sono mostrate le conducibilità di dispositivi fabbricati.

Tabella 2 Compendio delle misure di conducibilità planare e ortogonale dei film di ZnO

<i>Sample</i>	$\rho_{\parallel}$ [Ω cm]	$\rho_{\perp}$ [Ω cm]	c-ZnO
<i>C-1-4</i>	16	$4.7 \cdot 10^4$	present
<i>C-85-4</i>	$1.6 \cdot 10^8$	$1.4 \cdot 10^5$	not present
<i>C-85-45</i>	$2.6 \cdot 10^7$	$2.1 \cdot 10^4$	not present
<i>C-85-45b</i>	5	$1.8 \cdot 10^3$	present

Domini di ZnO si sviluppano nel piano del film, mentre la matrice isolante è disposta lungo la direzione verticale. Quando le dimensioni dei domini di ZnO vengono ridotte fino alla scala nanometrica, la conducibilità elettrica diminuisce, poiché prevale l'effetto isolante della matrice silicatica.

Il coefficiente piezoelettrico d_{33} dei campioni realizzati è stato misurato e, per il campione selezionato C1-4, risulta pari a -0,8 pC/N sotto l'applicazione di una forza di 5 N. Questo valore, combinato con la differente conducibilità elettrica nelle direzioni laterale e verticale, rende tale materiale adatto all'impiego come rivestimento sensibile per specchi solari.

Altra famiglia di materiali studiati per rivestire specchi solari e renderli oltre che autopulenti anche auto-diagnostici è quella dei **nanocompositi polimerici resistivi**. L'idea è stata quella di inserire filler nelle matrici autopulenti in modo da creare percorsi conduttivi a seguito di una sollecitazione esterna, secondo il meccanismo di swelling noto ed adoperato nei sensori resistivi di VOC. Una possibile causa di degrado delle performance di specchi FSM è legata allo strato di rivestimento polimerico che per esposizione agli agenti atmosferici subisce una transizione vetrosa e si spacca. La temperatura di transizione vetrosa (T_g) è la temperatura alla quale un polimero amorfo passa da uno stato rigido e vetroso a uno più morbido e gommoso. Questo parametro è cruciale per determinare le proprietà meccaniche e termiche dei polimeri.

Oltre alle tecniche tradizionali come la calorimetria a scansione differenziale (DSC), la T_g può essere determinata attraverso misure elettriche di conduttanza in funzione della frequenza, utilizzando l'analisi termica dielettrica (DETA). Questa tecnica misura la variazione della permittività del materiale in funzione della temperatura e della frequenza del campo elettrico applicato.

In pratica, applicando un campo elettrico oscillante al polimero, si osservano variazioni nella sua permittività e polarizzabilità. Queste variazioni sono più evidenti in corrispondenza di transizioni di fase, come la transizione vetrosa. Misurando la risposta dielettrica del materiale, è possibile identificare la T_g attraverso i cambiamenti nei parametri dielettrici, come la permittività relativa e il fattore di perdita.

L'analisi dielettrica offre vantaggi significativi, come la possibilità di monitorare in situ processi di reticolazione nei polimeri termoindurenti e di ottenere informazioni sulla viscosità del materiale. Inoltre, è particolarmente sensibile alle transizioni di fase, rendendola una tecnica efficace per la determinazione della T_g . In Figura 4 è riportato un esempio di determinazione della T_g di un composito polimerico autopulente trasparente e autodiagnostico al variare della temperatura.

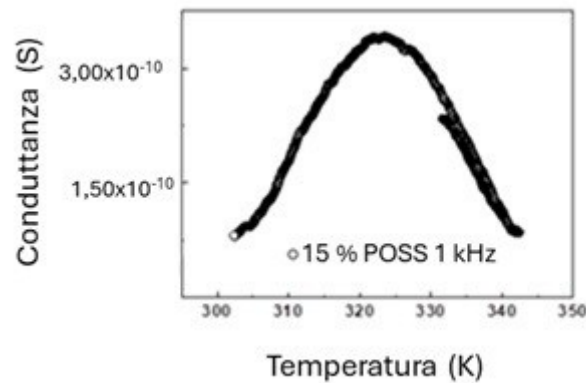


Figura 4 Determinazione della T_g di un composito polimerico autopulente trasparente e autodiagnostico al variare della temperatura.

7.2 Prototipi

La presente attività prevedeva la fabbricazione di un prototipo di sensore, su scala laboratoriale, integrabile in rivestimenti autopulenti per specchi solari ed ha visto la realizzazione di diversi dispositivi fabbricati a partire dai materiali individuati e descritti nel paragrafo precedente. La figura 6 è un'immagine fotografica del dispositivo prototipale a base di AlN di dimensioni 5x5 cm depositato in due configurazioni (quadrata e circolare) idonee alle misure precedentemente descritte e del materiale resistivo polimerico depositato su un circuito prestampato.

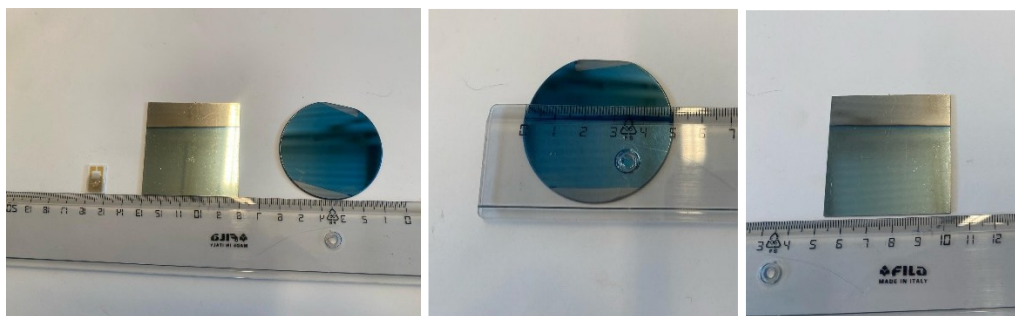


Figura 5 - Foto dei dispositivi prototipali su scala laboratoriale.

Il valore di coefficiente d_{33} misurato per il nitrato di alluminio piezoelettrico del prototipo è 1.8 pC/N, superiore al target atteso dal progetto (> 1 pm/V). La resistività (ρ) dei vari compositi polimerici (uno dei quali rappresentato in figura), si attesta su valori abbondantemente compresi nel target $\rho < 10^5 \Omega\text{cm}$.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate nell'ambito della LA1.9.

9 Pubblicazioni scientifiche

Sulla base dei risultati della precedente LA1.8 è stato pubblicato un articolo su rivista scientifica internazionale indicizzata:

- A. Castaldo, E. Gambale, G. Vitiello, G. Cara, "Self-Cleaning Solar Mirror Coatings: From the Laboratory Scale to Prototype Field Tests", Applied Sciences (2024), 14, 6669. <https://doi.org/10.3390/app14156669>.

Inoltre, sulla base dei risultati della LA1.9 è stato prodotto un articolo che sarà a breve sottomesso per la pubblicazione su rivista scientifica internazionali indicizzata:

- A. Castaldo, E. Gambale, G. Vitiello, "From Self-Cleaning to Self-Aware Solar Mirror Skin", to be submitted to Applied Sciences.

10 Eventi di disseminazione

Dalle attività svolte nella LA1.9 e nella precedente LA1.8 è scaturita la partecipazione ai seguenti eventi:

1. Evento "Stati Generali del Solare Termico a Concentrazione", Roma, Italia, 29 Gennaio 2024 –Presentazione orale "Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari e superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP", a cura di: Salvatore Esposito, Anna Castaldo.
2. Conferenza "2024 E-MRS (European Materials Research Society) Spring Meeting and Exhibit", Strasburgo, Francia, 27-31 Maggio 2024 – Presentazione orale "Self-cleaning solar mirrors coatings: from laboratory tests on field", a cura di Anna Castaldo.
3. Evento divulgativo aperto ai cittadini "Notte europea dei ricercatori 2024", Centro Ricerche ENEA di Portici, Portici (NA), Italia, 27 Settembre 2024 - "LA CASA DEGLI SPECCHI", a cura di: Anna Castaldo, Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello.
4. Conferenza "30th SolarPACES Conference", Roma, Italia, 8-11 Ottobre 2024 – Presentazione poster "Outdoor testing of self-cleaning solar mirror prototypes" e "From self-cleaning to self-aware solar mirrors skin", a cura di Anna Castaldo.
5. "Evento di disseminazione finale del Progetto 1.9 «Solare termodinamico» PTR 2022-2024 della Ricerca di Sistema", Roma, Italia, 16 Dicembre 2024 –Presentazione orale "Superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP", a cura di Anna Castaldo.