



Ricerca di Sistema elettrico

## Ottimizzazione, realizzazione e caratterizzazione di filtri solari del tipo interferenziale

S. Esposito, A. Antonaia, A. Guglielmo, G. Vitiello

OTTIMIZZAZIONE, REALIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI FILTRI SOLARI DEL TIPO INTERFERENZIALE

S. Esposito, A. Antonaia, A. Guglielmo, G. Vitiello (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia elettrica da fonte solare - Solare termodinamico

Obiettivo: Sviluppo di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

*Si ringrazia per la fattiva collaborazione nell'espletamento delle attività sperimentali il Dott. Antonio D'Angelo della ditta Archimede Solar Energy*

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	6
2.1 FILTRO INTERFERENZIALE MULTISTRATO A BASE DI MO.....	6
2.2 FILTRI INTERFERENZIALI MULTISTRATO A BASE DI MO E AG .....	9
3 CONCLUSIONI.....	13
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	15

## Sommario

L'attività di ricerca e sviluppo descritta in questo documento ha come obiettivo la realizzazione di filtri interferenziali multistrato ceramico-metallico utilizzando film metallici sottili di argento e molibdeno messi a punto in una precedente fase sperimentale dettagliatamente descritta nel documento dal titolo: "Ottimizzazione di strati sottili metallici adatti alla realizzazione di filtri solari del tipo interferenziale".

Il primo filtro interferenziale è stato realizzato utilizzando come materiale metallico sottili strati di molibdeno, e come materiale ceramico strati di nitruro di alluminio e di biossido di silicio. La progettazione ottica del filtro è stata condotta in modo da avere, con i materiali a disposizione, l'assorbanza solare più alta possibile assicurando un valore della riflettanza del filtro maggiore del 65% a 2500 nm. Una volta definita la struttura ottimizzata, il progetto ottico è stato trasformato in una ricetta di deposizione per l'impianto di sputtering. La struttura multistrato è stata quindi realizzata e caratterizzata otticamente. La risposta spettrale del filtro interferenziale è stata quindi confrontata con quella del progetto ottico per verificare l'accuratezza della procedura sviluppata per progettare e realizzare i filtri interferometrici multistrato. La stima dei parametri foto-termici ha evidenziato che, nonostante i materiali metallici sviluppati in forma sottile avessero proprietà metalliche eccellenti per quelle che sono gli standard dei processi di sputtering convenzionali, tali proprietà non erano sufficientemente buone da assicurare emissività emisferiche paragonabili con quelle dei rivestimenti solari realizzati con tecnologia cermet. Inoltre, l'impossibilità di mantenere buone proprietà metalliche per film sottili di molibdeno con spessori inferiori a 7 nm non consentiva di realizzare filtri solari interferometrici con assorbimenti solari confrontabili con quelli dei rivestimenti solari realizzati con tecnologia cermet.

Il secondo filtro interferenziale è stato progettato utilizzando come materiali metallici strati sottili di molibdeno e d'argento, e come materiali ceramici strati di nitruro di alluminio e di biossido di silicio. In questo caso il progetto ottico è stato condotto in modo da massimizzare l'assorbanza solare assicurando un valore delle riflettanza maggiore del 70% a 2500 nm. Lo scopo di questo secondo filtro era di valutare come la risposta spettrale del filtro interferometrico si alzava maggiormente nell'infrarosso per aver inserito sotto il primo strato di molibdeno un metallo ad alta riflettanza nell'infrarosso come l'argento. La struttura ottimizzata è stata ancora una volta trasformata in una ricetta di deposizione per impianto di sputtering. Il filtro è stato quindi realizzato e caratterizzato otticamente. Anche in questo caso la risposta spettrale sperimentale è stata confrontata con quella del progetto ottico per valutare l'accuratezza della procedura sviluppata per realizzare i filtri interferometrici. La stima dei parametri foto-termici ha mostrato che c'era un miglioramento dell'emissività emisferica ma si era ancora lontani dai valori ottenibili con i rivestimenti solari realizzati con tecnologia cermet.

Infine, è stato progettato e realizzato un terzo filtro interferenziale utilizzando gli stessi materiali del secondo filtro con la differenza che questa volta il primo strato metallico incontrato dalla radiazione solare è stato l'argento. In questo caso il progetto ottico è stato condotto con l'unica finalità di massimizzare l'assorbanza solare visto che la riflettanza sarebbe stata in ogni caso molto alta a causa della presenza dell'argento come primo strato metallico del filtro interferometrico. La struttura ottimizzata è stata trasformata in una ricetta di deposizione per l'impianto di sputtering e il filtro solare è stato realizzato. La successiva caratterizzazione ottica del filtro ha mostrato che il miglioramento dell'emissività emisferica si pagava con un peggioramento considerevole dell'assorbanza solare che si attestava ad un valore dell'80%. Anche in questo caso la riflettanza sperimentale e quella del progetto ottico sono state confrontate per verificare la bontà della procedura sviluppata per realizzare i filtri interferometrici.

## 1 Introduzione

L'attività di ricerca e sviluppo descritta in questo documento ha lo scopo di realizzare filtri interferometrici multistrato ceramico-metallico con metalli, quali il molibdeno e l'argento, cresciuti in forma di film sottili con la tecnica di deposizione del DC magnetron sputtering. I processi di deposizione dei film sottili (pochi nm) di molibdeno e argento sono stati ottimizzati per realizzare materiali con proprietà metalliche simili se non addirittura migliori di quelle dei film omologhi spessi (centinaia di nm) cresciuti con processi DC magnetron sputtering di tipo convenzionale.

Nei filtri interferenziali multistrato ceramico-metallico, il primo strato metallico che incontra la radiazione solare deve essere molto sottile e con delle buone proprietà metalliche. Inoltre, questo strato deve avere una bassa riflettanza nella zona del visibile (VIS) e un'alta riflettanza nella zona dell'infrarosso (IR). Queste proprietà ottiche sono facilmente riscontrabili nel molibdeno che è stato scelto come materiale principe per la progettazione e realizzazione dei filtri interferenziali multistrato da utilizzare come rivestimenti dei tubi ricevitori di impianti solari termodinamici. L'argento invece è stato scelto perché, tra i materiali conosciuti, è quello con la più alta riflettanza nell'infrarosso per cui una volta depositato sotto il primo strato di molibdeno può aiutare a migliorare la riflettanza del filtro interferometrico nell'infrarosso.

Sono stati progettati con il software di simulazione ottica Macleod tre diversi rivestimenti, il primo composto da AlN e SiO<sub>2</sub> come materiali ceramici e da Mo come materiale metallico, il secondo composto sempre da AlN e SiO<sub>2</sub> come materiali ceramici e da Mo e Ag come materiali metallici. Infine, il terzo filtro è stato realizzato utilizzando AlN come materiale ceramico e Mo e Ag come materiali metallici, solo che questa volta l'argento è stato messo come primo strato metallico del filtro interferometrico. In effetti, non è consigliabile utilizzare come primo strato metallico l'argento se si vogliono avere assorbanze solari apprezzabili, tuttavia, questa struttura è stata realizzata lo stesso per valutare quale fosse il miglioramento dell'emissività emisferica utilizzando l'argento come primo strato metallico e allo stesso tempo valutare quale fosse l'ordine di grandezza dell'assorbanza solare di una struttura di questo tipo.

I tre progetti sono stati trasformati in altrettante ricette di deposizione da implementare sull'impianto di sputtering per realizzare i filtri solari. Una volta realizzati i filtri, si è passati alla loro caratterizzazione ottica per stimare l'assorbanza solare e l'emissività emisferica. In questa fase, le riflettanze spettrofotometriche sperimentali dei tre rivestimenti sono state confrontate con quelle degli omologhi progetti ottici al fine di valutare l'accuratezza della procedura sviluppata per realizzare i filtri interferometrici solari.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

In questa sezione è descritta in dettaglio l'attività svolta per progettare e realizzare filtri interferenziali multistrato ceramico metallico. Nel primo paragrafo è descritta l'attività che ha permesso di realizzare filtri interferenziali solari a base di molibdeno mentre e nel secondo paragrafo è descritta l'attività condotta per realizzare filtri interferenziali solari a base di molibdeno e argento.

### 2.1 Filtro interferenziale multistrato a base di Mo

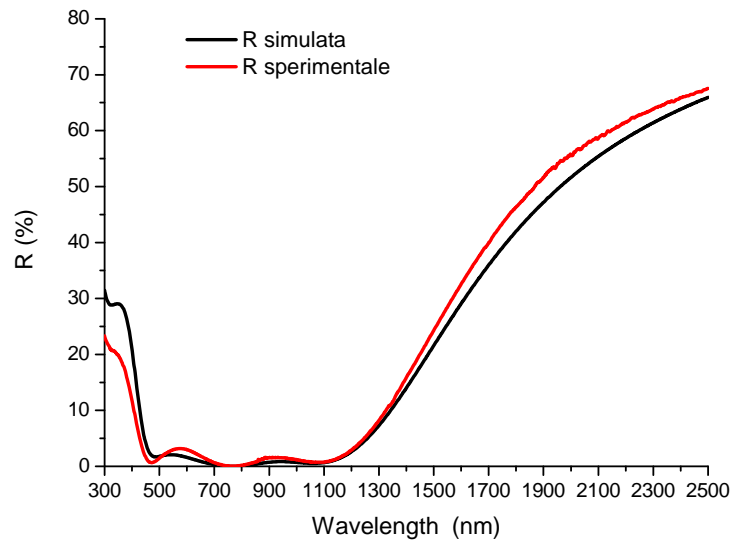
Il primo filtro interferenziale multistrato è stato progettato e realizzato utilizzando come metallo in forma di film sottile il molibdeno e come strati ceramici il nitrato di alluminio e il biossido di silicio. La progettazione ottica è stata effettuata utilizzando il software di simulazione ottica Macleod imponendo che la curva di riflettanza generata soddisfacesse simultaneamente il requisito di massima assorbanza solare e riflettanza maggiore del 65% a 2500 nm. In tabella 1 è riportato il progetto ottico di questo filtro interferenziale multistrato che è stato identificato dalla sigla ENEA #6L. Il progetto ottico è stato trasformato in una ricetta che una volta implementata sull'impianto di sputtering ha consentito di realizzare il filtro solare interferometrico. In figura 1 è mostrata la riflettanza spettrofotometrica sperimentale del filtro interferenziale a confronto con quella del progetto ottico nell'intervallo spettrale 300-2500 nm. La riflettanza spettrofotometrica è stata calcolata utilizzando lo spettrofotometro Lambda 900 della Perkin-Elmer equipaggiato con una sfera d'integrazione di dimensioni 15 cm.

**Tabella 1. Progetto del filtro solare interferenziale ENEA #6L**

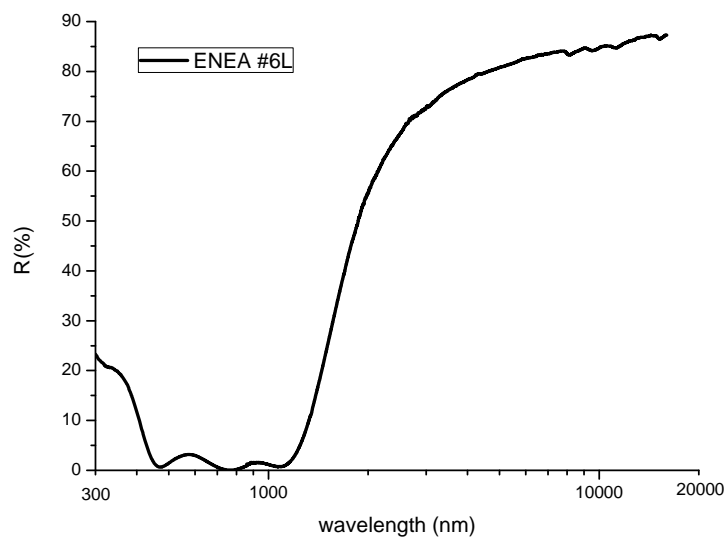
<b>Design: ENEA #6L</b>		
<b>Layer</b>	<b>Material</b>	<b>Thickness (nm)</b>
<b>1</b>	SiO <sub>2</sub>	63.69
<b>2</b>	AlN	52.22
<b>3</b>	Mo	7.00
<b>4</b>	AlN	67.20
<b>5</b>	Mo	13.00
<b>6</b>	AlN	89.27
<b>Substrate</b>	steel	

Come si può vedere dalla figura 1, vi è un eccellente accordo tra la curva della riflettanza del progetto ottico e quella sperimentale a testimonianza dell'accuratezza della stima delle costanti dielettriche dei materiali che partecipano alla formazione del filtro e della bontà della procedura sviluppata per progettare e realizzare filtri interferenziali solari. Dalla figura 1 emerge anche che la maggiore riflettanza della curva sperimentale rispetto a quella della curva simulata nel vicino infrarosso è dovuta probabilmente al miglior comportamento metallico dei film sottili di molibdeno depositati rispetto a quelli utilizzati nella progettazione ottica (vedi rapporto "Ottimizzazione di strati sottili metallici adatti alla realizzazione di filtri solari del tipo interferenziale").

In figura 2 invece è riportata la curva di riflettanza nell'intervallo spettrale 300-16000 nm, calcolata nella regione dell'infrarosso con lo spettrofotometro Equinox 55 della Bruker equipaggiato con una sfera d'integrazione in oro di 5 cm. Come si può vedere dalla figura, la riflettanza non supera il 90% nell'infrarosso per cui l'emissività emisferica di questa struttura sarà piuttosto alta se confrontata con quella dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet.



**Figura 1. Riflettanza simulata e sperimentale del filtro solare interferenziale ENEA #6L**



**Figura 2. Riflettanza sperimentale del filtro solare interferenziale ENEA #6L in tutta la regione spettrale d'interesse**

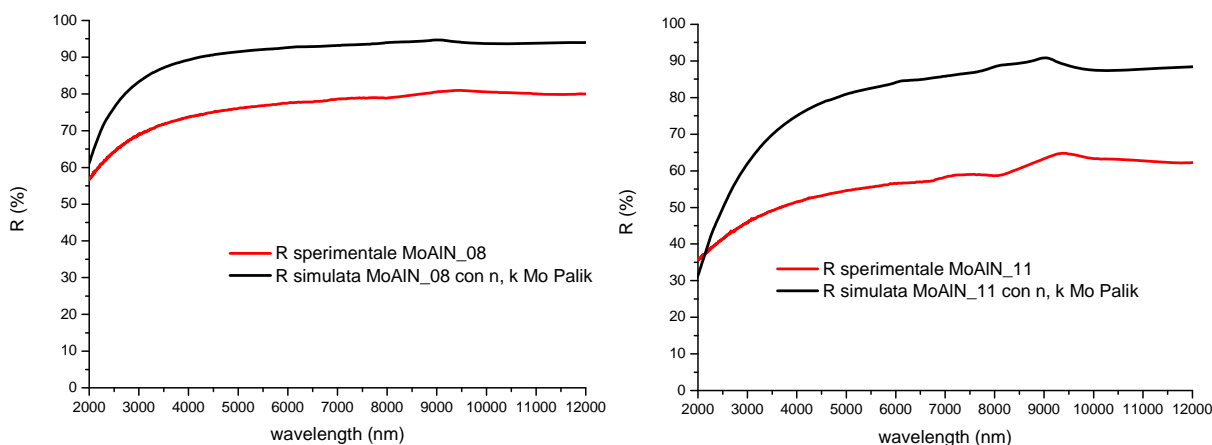
In tabella 2 è riportata l'assorbanza solare e l'emissività emisferica a 400°C e a 580°C della struttura ENEA #6L.

**Tabella 2. Parametri foto-termici del filtro solare interferenziale ENEA #6L**

<b>Design: ENEA #6L</b>		
Assorbanza solare (%)	Emissività emisferica a 400°C (%)	Emissività emisferica a 580°C (%)
93	19.3	22.3

Nonostante i film sottili di molibdeno avessero proprietà metalliche eccellenti se confrontate con quelle di molibdeni spessi realizzati con processi di sputtering convenzionali, non erano sufficientemente buone per assicurare valori di emissività emisferiche confrontabili con quelle dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet. Allo stesso tempo, l'impossibilità di realizzare film sottili di molibdeno con spessori minori di 7 nm con buone proprietà metalliche, non consentiva di realizzare filtri solari interferometrici con assorbanze solari confrontabili con quelle dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet.

A questo punto potrebbe essere interessante quantificare quale dovrebbe essere il miglioramento delle proprietà metalliche del molibdeno affinché risulti adatto a realizzare un filtro solare interferometrico dalle prestazioni foto-termiche migliori di quelle dei rivestimenti solari realizzati con tecnologia cermet. Per fare ciò, le strutture MoAlN\_08 e MoAlN\_11, realizzate nell'ambito dell'attività sperimentale descritta nel rapporto dal titolo "Ottimizzazione di strati sottili metallici adatti alla realizzazione di filtri solari del tipo interferenziale", sono state caratterizzate otticamente nell'IR e le risposte spettrali sono state confrontate con le risposte spettrali simulate di omologhe strutture in cui l'indice di rifrazione e il coefficiente di estinzione del molibdeno erano quelli del materiale bulk [1]. Da notare che il molibdeno bulk si era dimostrato adatto a realizzare filtri solari interferenziali multistrato con prestazione foto-termiche migliori di quelle dei rivestimenti realizzati con tecnologia cermet. In figura 3 sono riportate le riflettanza spettrofotometriche dei due campioni a confronto con quelle simulate. Ricordiamo che la struttura simulata MoAlN\_08 era composta da uno strato di molibdeno bulk spesso 13 nm tra un substrato di vetro spesso 1.1 mm e uno strato di AlN di spessore 54 nm. La struttura simulata MoAlN\_11 era invece composta da uno strato di molibdeno bulk spesso 7 nm tra un substrato di vetro spesso 1.1 mm e uno strato di AlN di spessore 54 nm. Dall'analisi delle figure risulta chiaro che le proprietà metalliche dei molibdeni realizzati sono ancora molto lontane da quelle dei materiali bulk, specialmente quelle del molibdeno più sottile da cui dipendono fortemente le proprietà foto-termiche del filtro solare interferenziale. A conclusione dell'analisi fatta, è lecito pensare che la tecnica di deposizione dello sputtering impiegata in modalità convenzionale non sia la tecnica migliore per realizzare i film sottili di molibdeno adatti alle finalità di questo progetto.



**Figura 3. Riflettanza sperimentale dei campioni MoAlN\_08 e MoAlN\_11 a confronto con le riflettanze simulate delle strutture omologhe calcolate con gli n e k del molibdeno bulk**

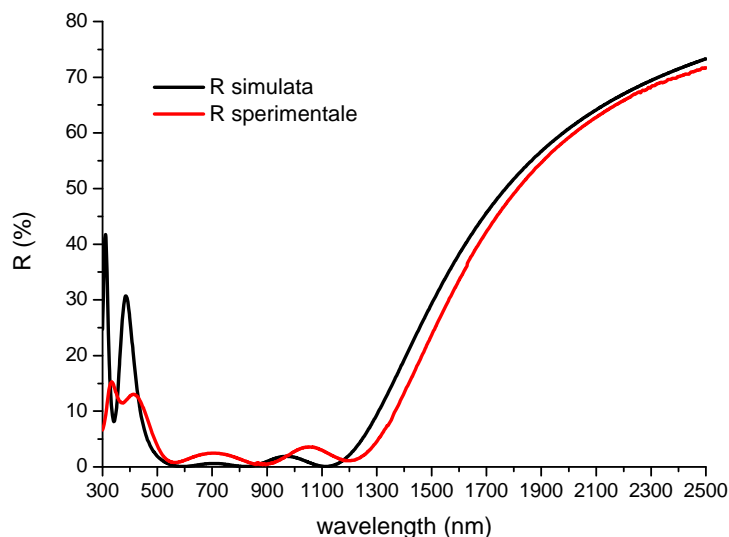


## 2.2 Filtri interferenziali multistrato a base di Mo e Ag

Il secondo filtro interferenziale multistrato è stato progettato e realizzato utilizzando come metalli in forma di film sottile il molibdeno e l'argento, e come strati ceramici il nitrato di alluminio e il biossido di silicio. L'argento è stato inserito nel progetto ottico del filtro solare interferometrico nel tentativo di migliorare la riflettanza del filtro nella regione dell'infrarosso. Anche in questo caso la progettazione ottica è stata effettuata utilizzando il software di simulazione ottica Macleod imponendo che la curva di riflettanza generata soddisfacesse simultaneamente il requisito di massima assorbanza solare e riflettanza maggiore del 70% a 2500 nm. In tabella 3 è riportato il progetto ottico di questo filtro interferenziale multistrato che è stato identificato dalla sigla ENEA #8L. Il progetto ottico è stato trasformato in una ricetta che una volta implementata sull'impianto di sputtering ha consentito di realizzare il filtro solare interferometrico. In figura 4 è mostrata la riflettanza spettrofotometrica sperimentale del filtro interferenziale a confronto con quella del progetto ottico nell'intervallo spettrale 300-2500 nm.

**Tabella 3. Progetto del filtro solare interferenziale ENEA #8L**

Design: ENEA #8L		
Layer	Material	Thickness (nm)
1	SiO <sub>2</sub>	59.96
2	AlN	49.71
3	Mo	7.00
4	AlN	52.91
5	Ag	9.00
6	AlN	150.31
7	Mo	7.00
8	AlN	48.68
Substrate	steel	

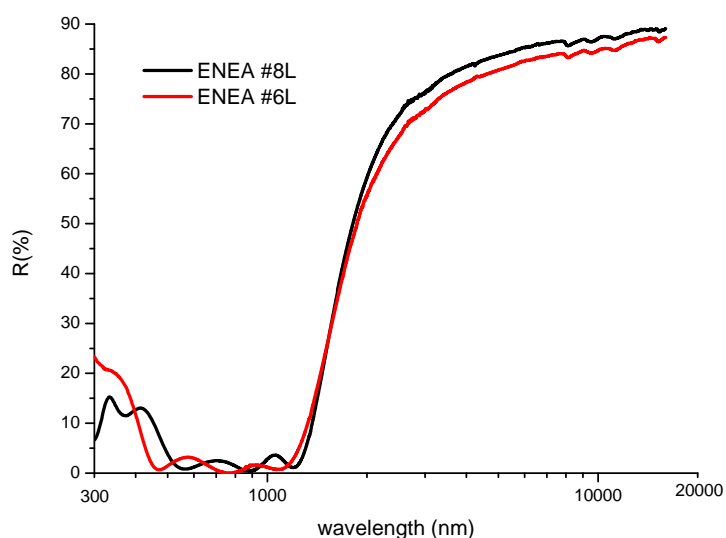


**Figura 4. Riflettanza simulata e sperimentale del filtro solare interferenziale ENEA #8L**

Come si può vedere dalla figura 4, vi è un buon accordo tra le curve delle riflettanze ma non eccellente come nel caso del filtro solare a ENEA #6L. Probabilmente, il non perfetto accordo tra le curve è dovuto al

fatto che dopo l'attività sperimentale condotta per ottimizzare gli strati sottili d'argento e durante la fase di messa a punto dei processi di deposizione per realizzare film sottili di molibdeno con buone proprietà metalliche, il target di argento è stato utilizzato per depositare film di argento per attività di ricerca diverse da quelle in oggetto. Il consumo del target avrà portato a una riduzione della velocità di deposizione per cui lo strato depositato sarà stato di spessore inferiore a 9 nm e avrà avuto anche proprietà metalliche leggermente inferiori a quelle dell'argento utilizzato per il progetto ottico.

In figura 5 è riportata la curva di riflettanza del filtro solare ENEA #8L nell'intervallo spettrale 300-16000 nm a confronto con quella del filtro solare ENEA #6L. Come si può vedere dalla figura, anche se la riflettanza di ENEA #8L è maggiore di quella di ENEA #6L, essa continua ad essere inferiore al 90% nell'infrarosso. Di conseguenza, l'emissività emisferica di questa struttura sarà piuttosto alta se confrontata con quella dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet.



**Figura 5. Riflettanza sperimentale del filtro solare interferenziale ENEA #8L e del filtro ENEA #6L in tutta la regione spettrale d'interesse**

In tabella 4 è riportata l'assorbanza solare e l'emissività emisferica a 400°C e a 580°C della struttura ENEA #8L.

**Tabella 4. Parametri foto-termici del filtro solare interferenziale ENEA #8L**

<b>Design: ENEA #8L</b>		
<b>Assorbanza solare (%)</b>	<b>Emissività emisferica a 400°C (%)</b>	<b>Emissività emisferica a 580°C (%)</b>
92	16.5	19.3

Il risultato ottenuto conferma quanto detto in precedenza sulla qualità dei film di molibdeno realizzati con la tecnica dello sputtering, infatti, anche se l'argento realizzato con la tecnica dello sputtering ha delle proprietà eccellenti anche rispetto all'argento bulk [1], il comportamento nella regione dell'infrarosso del filtro solare interferometrico dipende essenzialmente dalle proprietà ottiche del primo strato metallico incontrato dalla radiazione solare. Pertanto, l'argento può migliorare l'emissività emisferica del filtro solare

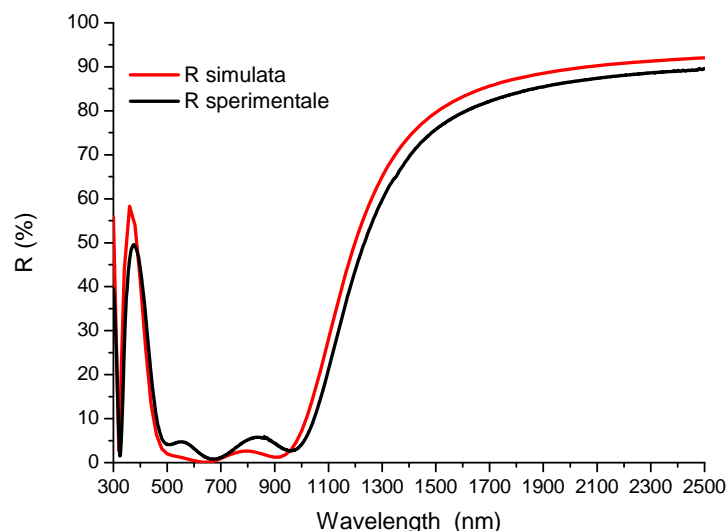
interferometrico ma in maniera non così significativa da renderla confrontabili con quelle dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet.

Infine, è stato progettato e realizzato un terzo filtro interferenziale utilizzando gli stessi materiali del secondo filtro con la differenza che questa volta il primo strato metallico incontrato dalla radiazione solare è stato l'argento. Nonostante più volte è stato sottolineato che non è opportuno utilizzare l'argento come primo strato metallico se si vogliono avere assorbanze solari apprezzabili, questa struttura è stata progettata e realizzata lo stesso per valutare quale fosse il miglioramento dell'emissività emisferica e allo stesso tempo valutare quale fosse l'ordine di grandezza dell'assorbanza solare di una struttura di questo tipo. Il progetto ottico è stato condotto tentando solo di massimizzare l'assorbanza solare visto che la riflettanza sarebbe stata in ogni caso molto alta a causa della presenza dell'argento come primo strato metallico del filtro interferometrico.

In tabella 5 è riportato il progetto ottico di questo filtro interferenziale multistrato che è stato identificato dalla sigla ENEA #5L. Il progetto ottico è stato trasformato in una ricetta che una volta implementata sull'impianto di sputtering ha consentito di realizzare il filtro solare interferometrico. In figura 6 è mostrata la riflettanza spettrofotometrica sperimentale del filtro interferenziale a confronto con quella del progetto ottico nell'intervallo spettrale 300-2500 nm.

**Tabella 5. Progetto del filtro solare interferenziale ENEA #5L**

Design: ENEA #5L		
Layer	Material	Thickness (nm)
1	AlN	54.00
2	Ag	9.00
3	AlN	126.00
5	Mo	7.00
5	AlN	54.00
Substrate	steel	

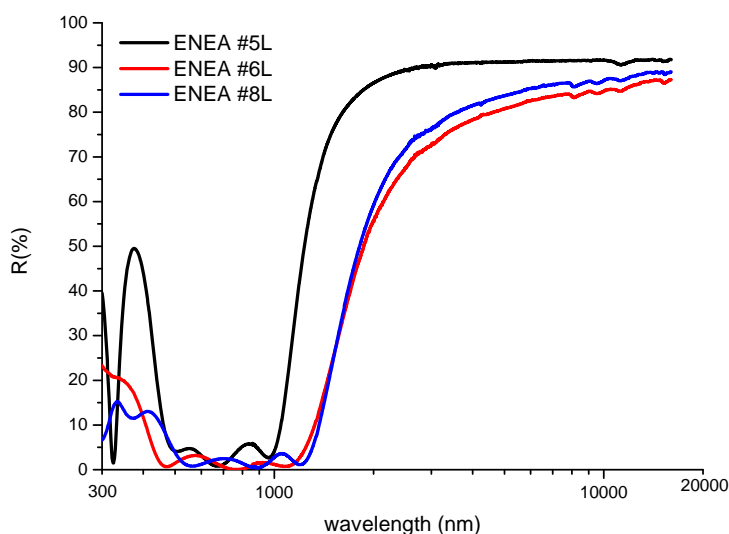


**Figura 6. Riflettanza simulata e sperimentale del filtro solare interferenziale ENEA #5L**

Come si può vedere dalla figura 6, anche in questo caso vi è un buon accordo tra le curve delle riflettanze ma non eccellente come nel caso del filtro solare a ENEA #6L. La causa di questa differenza è con molta

probabilità la stessa che ha causato il non perfetto accordo tra la riflettanza simulata e quella sperimentale del filtro solare ENEA #8L.

In figura 7 è riportata la curva di riflettanza del filtro solare ENEA #5L nell'intervallo spettrale 300-16000 nm a confronto con quella dei filtri realizzati in precedenza. Come si può vedere dalla figura, la riflettanza del filtro solare ENEA #5L è maggiore di quella dei filtri realizzati in precedenza e superiore al 90% in tutta la regione dell'infrarosso. Lo svantaggio è che non si riesce ad abbassare sufficientemente la curva della riflettanza nella regione del visibile, per cui l'assorbanza solare risulta troppo alta per considerare il filtro utilizzabile come rivestimento dei tubi ricevitori di impianti solari termodinamici. A conferma di quanto detto, in tabella 6 è riportata l'assorbanza solare e l'emissività emisferica a 400°C e a 580°C della struttura ENEA #5L. L'emissività emisferica di questo filtro potrebbe essere ancora migliorata se si utilizzassero solo strati metallici sottili d'argento questo a svantaggio dell'assorbanza che si ridurrebbe ulteriormente.



**Figura 7. Riflettanza sperimentale del filtro solare interferenziale ENEA #5L, del filtro ENEA #6L e del filtro ENEA #8L in tutta la regione spettrale d'interesse**

**Tabella 6. Parametri foto-termici del filtro solare interferenziale ENEA #5L**

<b>Design: ENEA #5L</b>		
Assorbanza solare (%)	Emissività emisferica a 400°C (%)	Emissività emisferica a 580°C (%)
80	8.9	9.4

### 3 Conclusioni

L'attività di ricerca e sviluppo descritta in questo documento aveva come obiettivo quello di realizzare filtri solari interferometrici multistrato ceramico-metallico utilizzando i film metallici sottili di argento e molibdeno messi a punto in una precedente fase sperimentale dettagliatamente descritta nel documento dal titolo: "Ottimizzazione di strati sottili metallici adatti alla realizzazione di filtri solari del tipo interferenziale".

Il primo filtro solare interferenziale è stato progettato e realizzato utilizzando come metallo in forma di film sottile il molibdeno e come strati ceramici il nitruro di alluminio e il biossido di silicio. La progettazione ottica di questo filtro è stata effettuata imponendo che la curva di riflettanza generata soddisfacesse simultaneamente il requisito di massima assorbanza solare e riflettanza maggiore del 65% a 2500 nm. Il filtro solare realizzato in base al progetto ottico presentava un'assorbanza solare pari al 93% ed emissività emisferiche del 19.3% a 400°C e del 22.3% a 580°C. Nonostante i film sottili di molibdeno avessero proprietà metalliche eccellenti se confrontate con quelle di strati di molibdeno spessi realizzati con processi di sputtering convenzionali, non erano sufficientemente buone per assicurare valori di emissività emisferiche confrontabili con quelle dei rivestimenti solari realizzati con tecnologia cermet. Allo stesso tempo, l'impossibilità di realizzare film sottili di molibdeno con spessori minori di 7 nm con buone proprietà metalliche, non consentiva di realizzare filtri solari interferometrici con assorbanze solari confrontabili con quelle dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet.

Il secondo filtro interferenziale multistrato è stato progettato e realizzato utilizzando come metalli in forma di film sottile il molibdeno e l'argento, e come strati ceramici il nitruro di alluminio e il biossido di silicio. L'argento è stato inserito nel progetto ottico del filtro solare interferometrico nel tentativo di migliorare la riflettanza del filtro nella regione dell'infrarosso. In questo caso la progettazione ottica è stata effettuata imponendo che la curva di riflettanza generata soddisfacesse simultaneamente il requisito di massima assorbanza solare e riflettanza maggiore del 70% a 2500 nm. Il filtro solare realizzato in base al progetto ottico presentava un'assorbanza solare pari al 92% ed emissività emisferiche del 16.5% a 400°C e del 19.3% a 580°C. Il risultato ottenuto conferma quanto detto in precedenza sulla qualità dei film di molibdeno realizzati con la tecnica dello sputtering. Infatti, anche se l'argento realizzato con la tecnica dello sputtering ha delle proprietà eccellenti anche rispetto all'argento bulk [1], il comportamento nella regione dell'infrarosso del filtro solare interferometrico dipende essenzialmente dalle proprietà ottiche del primo strato metallico incontrato dalla radiazione solare. Pertanto, l'argento può migliorare l'emissività emisferica del filtro solare interferometrico ma non in maniera così significativa da renderla paragonabile con quella dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet.

Infine, è stato progettato e realizzato un terzo filtro interferenziale utilizzando gli stessi materiali del secondo filtro con la differenza che questa volta il primo strato metallico incontrato dalla radiazione solare è stato l'argento. Nonostante più volte sia stato sottolineato che non è opportuno utilizzare l'argento come primo strato metallico se si vogliono avere assorbanze solari apprezzabili, questa struttura è stata comunque progettata e realizzata con l'obiettivo di valutare quale fosse il miglioramento dell'emissività emisferica e allo stesso tempo valutare quale fosse l'ordine di grandezza dell'assorbanza solare di una struttura di questo tipo. Il progetto ottico è stato condotto tentando solo di massimizzare l'assorbanza solare visto che la riflettanza sarebbe stata in ogni caso molto alta a causa della presenza dell'argento come primo strato metallico. Il filtro solare realizzato in base al progetto ottico presentava un'assorbanza solare pari all'80% ed emissività emisferiche del 8.9% a 400°C e del 9.4% a 580°C. Il risultato conferma che l'emissività solare di questo filtro incomincia ad essere interessante per applicazioni solari. Questo risultato dimostra tutta la grande potenzialità dei filtri interferometrici rispetto ai filtri a base di strati CERMET, laddove la riflettanza spettrale evidenzia la possibilità di un comportamento ottico molto più di tipo "a step" con cut-off a risalita veloce e con l'interessante beneficio di emissività emisferiche basse e poco variabili al variare della temperatura di lavoro. Tuttavia, il valore troppo basso dell'assorbanza solare impedisce, allo stato attuale, di annoverare questo filtro tra i rivestimenti solari idonei a ricoprire i tubi ricevitori di impianti solari termodinamici.

In conclusione, attraverso una notevole mole di lavoro sperimentale e l'utilizzo di particolari accorgimenti tecnologici, sono state stressate al massimo tutte le potenzialità della tecnica di sputtering per l'ottenimento di film metallici molto sottili di molibdeno ed argento con proprietà ottiche molto prossime a quelle dei corrispettivi film spessi. I risultati ottenuti sui singoli strati metallici in forma molto sottile possono essere considerati di assoluto rilievo scientifico per un utile impiego nella fabbricazione di filtri ottici interferometrici. Tuttavia, efficaci filtri solari spettralmente selettivi per tubi ricevitori operanti ad alta temperatura prevedono caratteristiche ottiche troppo stringenti, dove assorbimenti solari molto spinti (> 94%) devono essere accoppiati ad emissività emisferiche estremamente basse (< 10 % a 580 °C). In base a queste considerazioni, essere riusciti a produrre una tipologia di filtro interferometrico con assorbanza solare pari al 93 % ed un'altra tipologia con emissività emisferica pari al 9.4 % a 580 °C è da considerarsi un buon successo. Pertanto, questo lavoro sperimentale può essere ben considerato come punto consolidato di partenza sia per l'ottenimento di efficaci filtri solari interferometrici sia per la realizzazione di altre tipologie di filtri interferometrici (ad esempio, vetri basso-emissivi per finestratura) di grande interesse commerciale.

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] Edward D. Palik, "Handbook of the Optical Constants of Solids I", Academic Press, 1985.