

Ricerca di Sistema elettrico



Processi di testurizzazione di substrati di vetro o polimero mediante roll-embossing per moduli FV di nuova generazione (LA1.32)

Micaela Liberti, Francesca Apollonio, Alessandra Paffi, Rocco Crescenzi

DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

PROCESSI DI TESTURIZZAZIONE DI SUBSTRATI DI VETRO O POLIMERO MEDIANTE ROLL-EMBOSSING PER MODULI FV DI NUOVA GENERAZIONE (LA1.32)

Micaela Liberti, Francesca Apollonio, Alessandra Paffi, Rocco Crescenzi

Università di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e telecomunicazioni

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: 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza"

Linea di attività: LA1.32

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Università di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e telecomunicazioni

Mese inizio previsto: 01/04/2023

Mese inizio effettivo: 01/07/2024

Mese fine previsto: 31/12/2024

Mese fine effettivo: 31/12/2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione: "Processi di testurizzazione di substrati di vetro o polimero mediante roll-embossing per moduli FV di nuova generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Mario Tucci

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Micaela Liberti

Indice

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Risultati attesi | 5 |
| 2 | Risultati ottenuti..... | 6 |
| 3 | Prodotti attesi | 7 |
| 4 | Prodotti sviluppati | 8 |
| 5 | Analisi degli scostamenti su attività e risultati..... | 9 |
| 6 | Sintesi delle attività svolte | 10 |
| 7 | Dettaglio delle attività svolte..... | 11 |
| 8 | Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte..... | 27 |
| 9 | Pubblicazioni scientifiche | 28 |
| 10 | Eventi di disseminazione | 29 |

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1- Modello multistrato completo con condizioni iniziali ed al contorno. I cento raggi (zona rossa tratteggiata) partono dal dominio superiore (aria) e vengono riflessi, rifratti ed assorbiti attraverso i diversi strati ottici. | 11 |
| Figura 2: Set parametrico completo. Ogni marker corrisponde ad un singolo output simulativo (riflettanza). | 12 |
| Figura 3 Parte reale ed immaginaria dell'indice di rifrazione del polimero caricato con nanoparticelle di TiO ₂ a diverse concentrazioni. | 13 |
| Figura 4: Set completo di modelli simulativi oggetto di questo studio | 14 |
| Figura 5 Tipico output di una simulazione parametrica associata ad un singolo modello simulativo. Ogni punto rappresenta il comportamento del pacchetto di raggi ad una specifica lunghezza d'onda e inclinazione. Nel caso specifico, l'interpolazione dei punti a diverse lunghezze d'onda rappresenta l'andamento della riflettanza di un onda luminosa che incontra uno strato di silicio levigato. Nell'inset si nota l'ottimo accordo con dati sperimentali. | 15 |
| Figura 6 Riflettanza totale del modello B al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 16 |
| Figura 7 Riflettanza totale del modello C al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 16 |
| Figura 8 Riflettanza totale del modello D, con concentrazione di TiO ₂ al 0.025%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 17 |
| Figura 9: Riflettanza totale del modello D, con concentrazione di TiO ₂ al 0.05%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 17 |
| Figura 10 : Riflettanza totale del modello D, con concentrazione di TiO ₂ al 0.075%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 18 |
| Figura 11: Riflettanza totale del modello D, con concentrazione di TiO ₂ al 0.1%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 18 |
| Figura 12: Riflettanza totale del modello D, con concentrazione di TiO ₂ al 0.125%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 19 |
| Figura 13: Riflettanza totale del modello D, con concentrazione di TiO ₂ al 0.2%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 19 |
| Figura 14: Andamento comparato delle riflettanze riferite al modello C (silicio testurizzato, curva blu) e modello D, con nano-particelle di TiO ₂ a tre concentrazioni differenti (curve azzurra, verde e arancione). | 20 |
| Figura 15: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO ₂ al 0.025%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 21 |
| Figura 16: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO ₂ al 0.05%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 21 |
| Figura 17: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO ₂ al 0.075%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 22 |
| Figura 18: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO ₂ al 0.1%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. | 22 |

Figura 19: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO_2 al 0.125%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. 23

Figura 20: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO_2 al 0.2%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza. 23

Figura 21: Andamento comparato delle riflettanze riferite al modello C (silicio testurizzato, curva blu) e modello E, con nano-particelle di TiO_2 a tre concentrazioni differenti (curve azzurra, verde e arancione). 24

Figura 22: Andamento comparato delle riflettanze riferite al modello D e modello E, con nano-particelle di TiO_2 a due concentrazioni differenti. 25

1 Risultati attesi

Saranno progettati e realizzati stampi da utilizzare nel processo di hot embossing anche in relazione alla gestione dello stampo stesso (e.g. semplificazione di montaggio e smontaggio, no slip durante la fase di pressing sul substrato da stampare). Verifica funzionale dell'hot embossing dimostrando quindi: 1) Possibilità di stampare strutture micrometriche in vetro e/o polimero su aree di 20cm x 20cm e con velocità di stampa non inferiori a 5mm/s; 2) Controllo della temperatura di riscaldamento del vetro o polimero con uniformità a ± 2 °C su tutta la superficie (verifica mediante telecamera IR); Controllo della pressione del rullo di embossing. Saranno sintetizzati polimeri nano-caricati con indice di rifrazione ottimizzati per minimizzare la luce riflessa quando utilizzati per realizzare moduli FV con i vetri testurizzati. In collaborazione con ENEA, saranno realizzati e caratterizzazione moduli prototipali di area 20 x 20 cm² ottenuti con celle SJH su wafer flat e con vetri e/o polimeri testurizzati, confrontando la fotocorrente prodotta con quella di una struttura standard del tipo vetro-standard/polimero/cella-testurizzata.

2 Risultati ottenuti

La macchina di hot embossing per la realizzazione e caratterizzazione moduli prototipali di area $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ottenuti con celle SJH su wafer flat e con vetri e/o polimeri testurizzati, ha presentato problemi tecnici irreversibili, a partire dalla fase di calibrazione, che hanno reso impossibile procedere con la verifica sperimentale delle ipotesi iniziale. Al fine di dare una risposta al quesito fondamentale della LA, si è deciso quindi da un lato di migliorare ed ottimizzare la produzione di polimeri nano-caricati con indice di rifrazione ottimizzati e dall'altro di fornire una modellizzazione il più rigorosa possibile, delle ricadute pratiche della presenza di tali polimeri in multistrati ottici, in presenza ed in assenza di testurizzazione sul vetro. I dati ottenuti, oltre a mostrare un ottimo accordo con dati sperimentali associati alle riflettanze note di strati ottici standard (con e senza texture sul silicio), hanno permesso di indagare a fondo sul ruolo dei polimeri nano-caricati nel modificare le caratteristiche ottiche dei multistrati oggetto di questo studio, oltre a quantificare gli eventuali benefici dati dalla presenza di una testurizzazione sul vetro. Dato il grande know-how teorico acquisito al termine del progetto, pensiamo che i dati modellistici ottenuti possano essere ritenuti in parte rappresentativi dei risultati attesi da capitolato.

3 Prodotti attesi

Report dal titolo dal titolo "Processi di testurizzazione di substrati di vetro o polimero mediante roll-embossing per moduli FV di nuova generazione"

4 Prodotti sviluppati

Il presente Report dal titolo dal titolo "Processi di testurizzazione di substrati di vetro o polimero mediante roll-embossing per moduli FV di nuova generazione" - RdS_PTR22-24_PR1.1_LLA1.32_421

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il danneggiamento della macchina per hot-embossing e l'impossibilità di ripararla ha determinato un considerevole scostamento tecnico rispetto alle attività pianificate. Si è cercato dunque di sopperire alle carenze hardware con un grande sforzo lato software/modellistico, affiancato anche da una migliore caratterizzazione, lato sperimentale, dei polimeri nano-caricati con particelle di titania da utilizzare nei multistrati ottici in studio. Lo sforzo modellistico/simulativo può essere oggettivamente validato dalle oltre 1000 ore uomo dedicate ad ottimizzare i modelli simulativi, effettuare simulazioni parametriche, analizzare i dati e produrre sintesi significative dei risultati. Lo spazio totale occupato complessivamente su disco durante questo periodo di lavoro si è avvicinato ai 2 TeraByte.

6 Sintesi delle attività svolte

Si è proceduto ad una analisi sistematica di strati polimerici caricati con nano-particelle funzionalizzate che permettono di frapporre uno strato ottico con indice di rifrazione di valore intermedio tra quello del vetro e quello del silicio. Il modello multistrato vetro-polimero-silicio è stato analizzato, variando in un range predefinito le caratteristiche ottiche del polimero, per valutare quanto la presenza di materiali con indici ottici elevati possano ovviare alla mancanza di testurizzazione del silicio. I risultati dimostrano come, usando polimeri con particelle funzionalizzate di TiO_2 con concentrazioni superiori allo 0.1%, ci si può avvicinare alle performance ottiche ottenibili con la testurizzazione del silicio, superandole a basse lunghezze d'onda (400-500 nm) e all'aumentare dell'angolo di incidenza dei raggi. La presenza di testurizzazione sul vetro permette di migliorare ulteriormente questo comportamento solo nel caso di elevati angoli di incidenza dei raggi ($\geq 30^\circ$).

7 Dettaglio delle attività svolte

Lo scopo principale dell'analisi è stato quello di trovare alternative, economicamente vantaggiose e industrialmente applicabili, all'uso di interfacce testurizzate di silicio, le cui note capacità di light-trapping tramite texture piramidali risultano particolarmente efficaci nel massimizzare la trasmittanza dell'onda luminosa.

Nelle prossime sezioni vengono quindi mostrate, con analisi rigorose e prendendo in considerazione molteplici casi-studio:

- l'effetto di strati polimerici carichi con nano-particelle funzionalizzate con TiO_2 , a contatto con il silicio, sulla riflettanza totale di un multistrato vetro+polimero+silicio.
- L'effetto di strati polimerici carichi con nano-particelle funzionalizzate con TiO_2 , a contatto con il silicio, sulla riflettanza totale di un multistrato vetro testurizzato+polimero+silicio

Riguardo l'ultimo punto, nel report precedente era stato già introdotto l'uso della texture su vetro come possibile alternativa a quella sul silicio; nel seguito verrà dimostrato come il fattore preponderante per la diminuzione della riflettanza del multistrato è l'utilizzo di un polimero con elevato indice di rifrazione ($n \geq 1.8$) a tutte le lunghezze d'onda d'interesse.

Il modello multistrato vetro-polimero nanocaricato-silicio verrà dunque analizzato in modo sistematico, variando in un range predefinito le caratteristiche ottiche ($n-k$) dello strato polimerico, per valutare quanto la presenza di materiali con indici ottici elevati possano (o meno) ovviare alla mancanza di testurizzazione sullo strato di silicio.

Gli osservabili principali delle simulazioni numeriche sono dunque trasmittanza e riflettanza dei raggi. La valutazione avviene considerando le condizioni al contorno disponibili nel modulo geometrical-optics, indicate con "wall": i) riflessione speculare; ii) scomparsa dei raggi; iii) congelamento dei raggi.

Allo scopo di rendere il più rigorosa possibile l'analisi e limitare al contempo lo spazio occupato su disco da ogni singola simulazione, il modello completo è stato costruito come in Figura 1, risultando più compatto di quello analizzato nell'attività svolta nel precedente triennio.

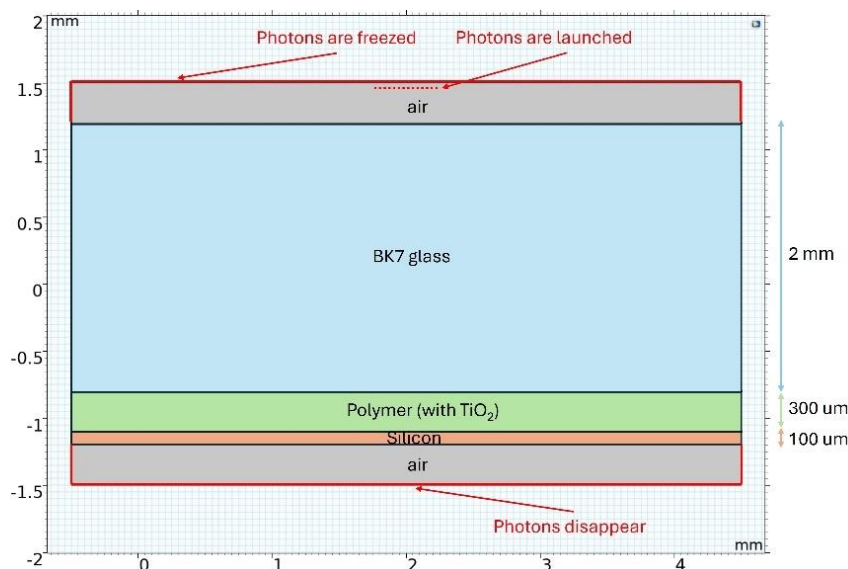


Figura 1 - Modello multistrato completo con condizioni iniziali ed al contorno. I cento raggi (zona rossa tratteggiata) partono dal dominio superiore (aria) e vengono riflessi, rifratti ed assorbiti attraverso i diversi strati ottici.

Sebbene ottimizzato, ogni singola simulazione parametrica ha occupato uno spazio su disco di circa 100GB, con tempi computazionali di circa 75 minuti su un Ryzen 7 7700 con 32 GB di RAM (versione Comsol 6.2).

In ogni simulazione 100 raggi vengono rilasciati dalla parte superiore del modello (in aria) con un angolo variabile tra i 0° ed i 45° (parametri della simulazione) e con lunghezza d'onda variabile tra 400 nm e 1000 nm (parametri della simulazione). A seconda del materiale ottico e al tipo di interfaccia incontrati (aria-vetro, vetro-polimero, etc) i raggi vengono riflessi, rifratti o assorbiti. Al termine di ogni singola simulazione parametrica solo i raggi che terminano il loro percorso sul contorno superiore (condizione di congelamento) sono collezionati e la loro intensità residua valutata.

Il rapporto tra questa intensità residua e l'intensità iniziale (1000 W/m² nell'esempio) fornisce il valore di R. Nella Figura 2 vengono presentate tutte le combinazioni parametriche che sono state utilizzate nei diversi modelli simulativi: ad ogni marker corrisponde uno specifico output simulativo (riflettanza dei raggi).

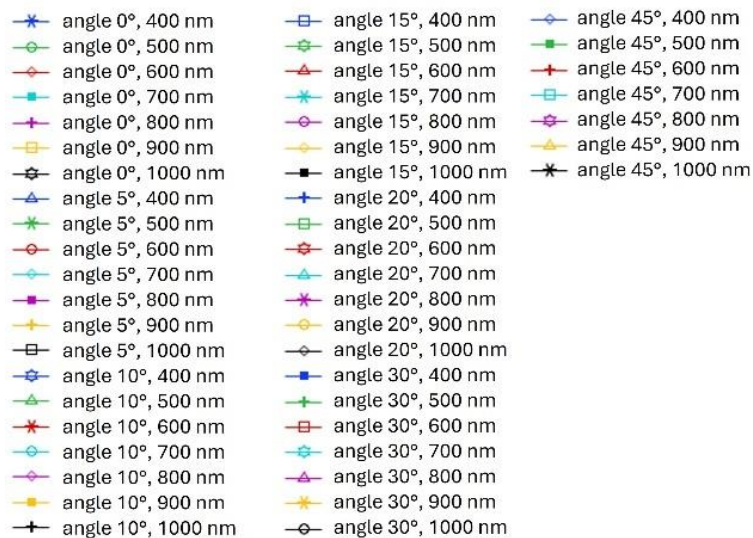


Figura 2: Set parametrico completo. Ogni marker corrisponde ad un singolo output simulativo (riflettanza).

Le caratteristiche ottiche dei diversi mezzi attraversati dai raggi sono considerate in modo completo (parte reale e immaginaria) e sono importati in Comsol tramite file esterni o presi direttamente dalle librerie interne. Ad esempio, nella Figura 3 vengono riportate parte reale e immaginaria dell'indice di rifrazione del polimero nano-caricato con particelle di TiO₂, a diverse percentuali di dispersione delle nanoparticelle stesse. Notare come alcune di queste curve erano state riportate nel precedente report - Report RdS/PTR(2021)/334 (misure condotte in ENEA), mentre altre sono state aggiunte per il presente report al fine di estendere l'analisi a casi in cui l'indice di rifrazione vari in un più ampio range di valori.

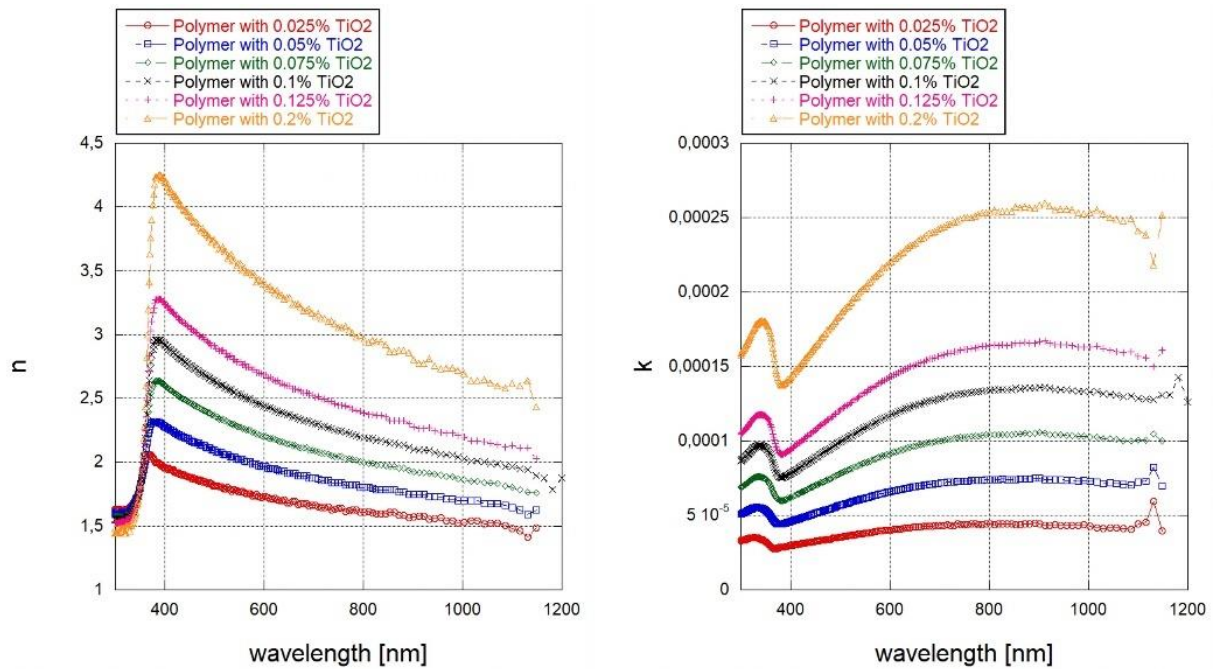


Figura 3 Parte reale ed immaginaria dell'indice di rifrazione del polimero caricato con nanoparticelle di TiO₂ a diverse concentrazioni.

Ad esempio, considerando la lunghezza d'onda di 800 nm, l'indice di rifrazione (parte reale) del polimero nel seguito simulato varia tra un minimo di 1.6 ed un massimo di 2.97.

Per quanto riguarda i differenti modelli simulati, in Figura 4 vengono riportati: A) il modello di silicio monocristallino in aria (usato come riferimento per confrontare gli output simulativi con misure note in letteratura [F.C. Marques et al./Solar Energy Materials and Solar Cells 52 (1998) 285–292]); B) il modello di silicio con vetro (BK7); C) modello di silicio texturizzato (le caratteristiche della texture sono state ampiamente discusse nel report precedente) su polimero non caricato e vetro; D) il modello di silicio non testurizzato su polimero caricato da particelle funzionalizzate di TiO₂ e vetro; E) il modello di silicio non testurizzato su polimero caricato da particelle funzionalizzate di TiO₂ e vetro testurizzato.

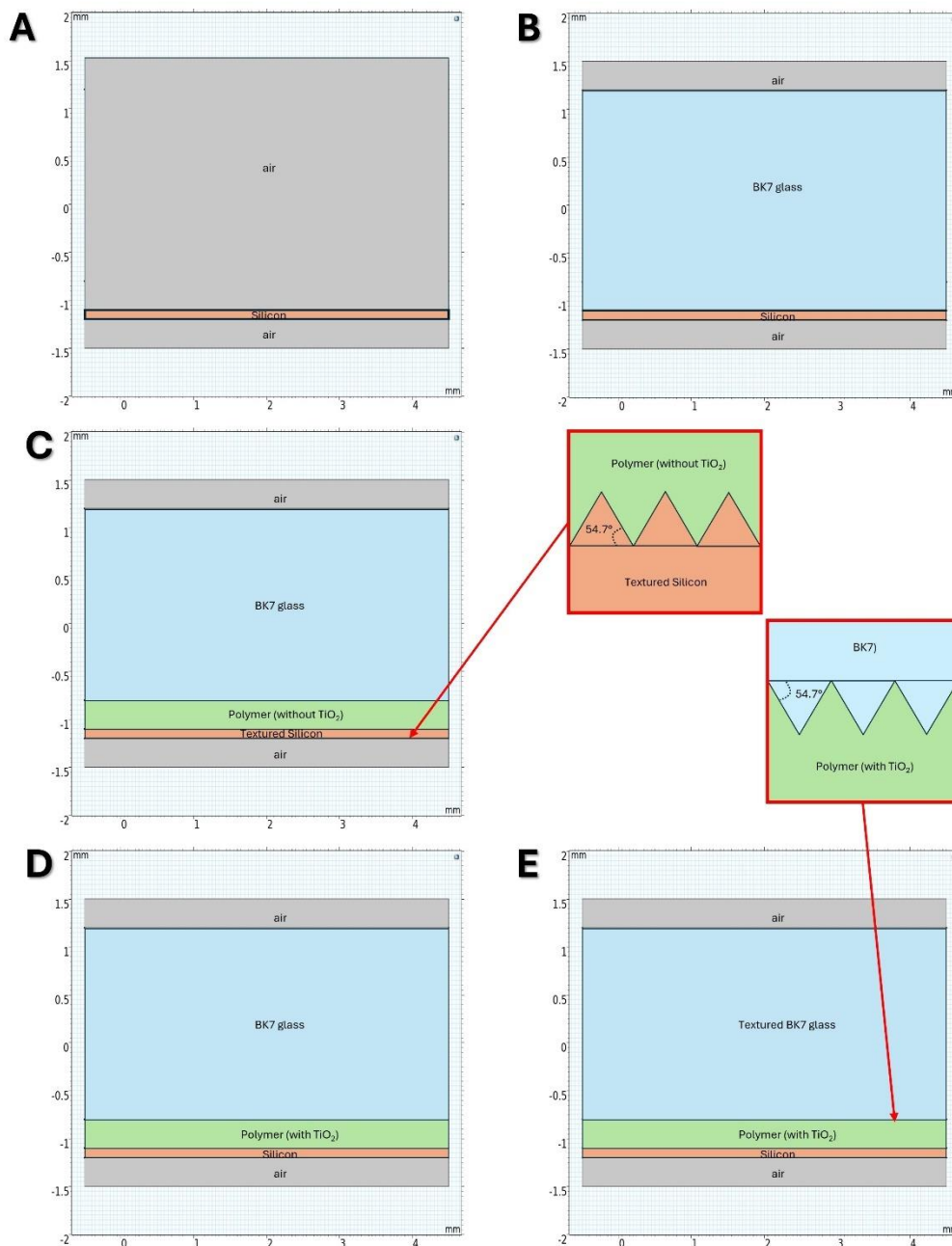


Figura 4: Set completo di modelli simulativi oggetto di questo studio

In particolare, il confronto tra le riflettanze totali dei modelli C, D ed E ci chiarirà in primo luogo se la presenza di un materiale ottico con alto indice di rifrazione può ovviare alla presenza delle texture sul silicio ed in secondo luogo se la presenza di testurizzazione sul vetro impatta in modo significativo nel diminuire ulteriormente la riflettanza totale del multistrato.

Di seguito vengono riportati i risultati delle simulazioni parametriche, in ordine di modello e seguendo la legenda precedentemente riportata in Figura 2.

Consideriamo dunque il tipico output simulativo partendo al modello di silicio in aria, mostrato in Figura 5. Qui, ad ogni valore di lunghezza d'onda in aria (set parametrico di 7 valori) sono associati 7 valori di riflettanza, ognuno riferito ad uno specifico angolo di emissione dei raggi (da perpendicolare all'interfaccia fino ad un angolo di 45°). Nell'inset presente nella figura si può notare la quasi perfetta corrispondenza tra dati simulati e misurati nel range 400 nm-1000 nm).

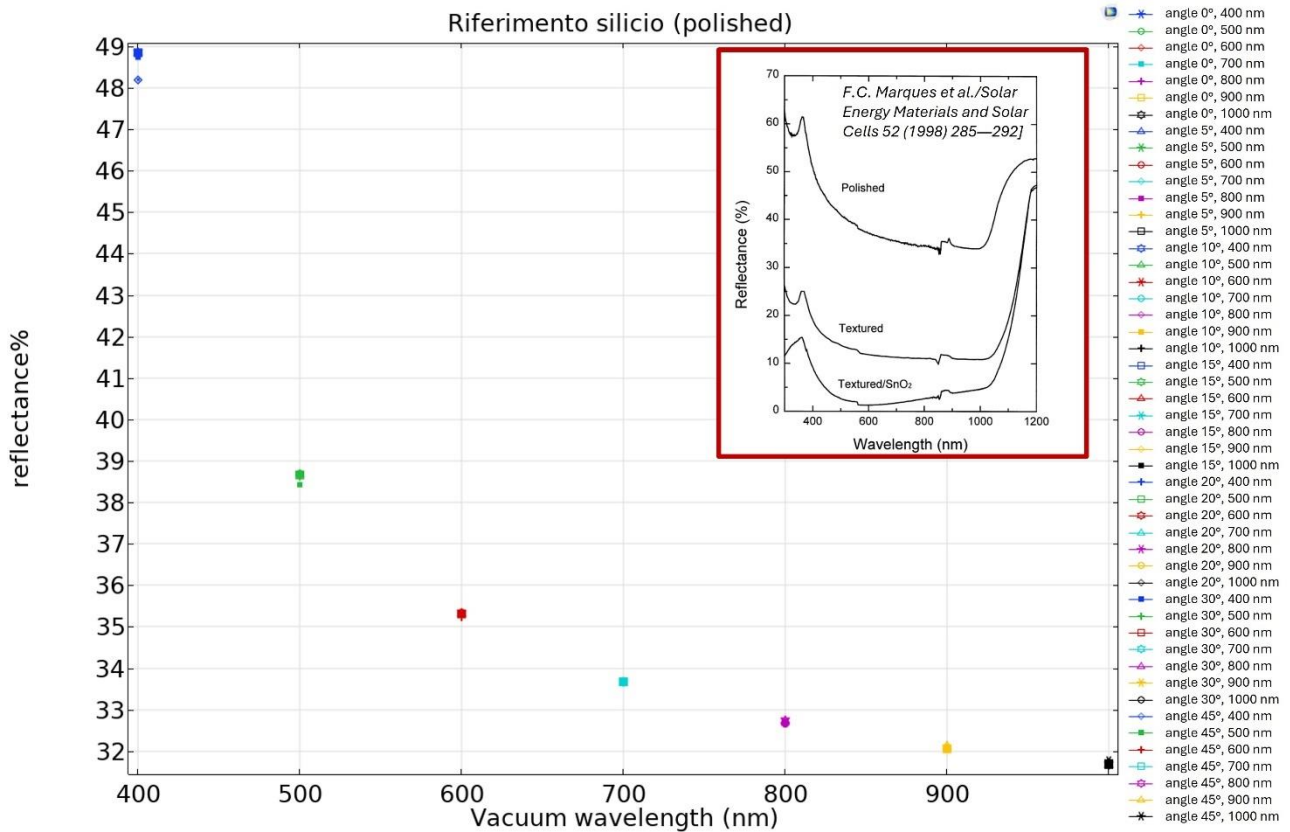


Figura 5 Tipico output di una simulazione parametrica associata ad un singolo modello simulativo. Ogni punto rappresenta il comportamento del pacchetto di raggi ad una specifica lunghezza d'onda e inclinazione. Nel caso specifico, l'interpolazione dei punti a diverse lunghezze d'onda rappresenta l'andamento della riflettanza di un'onda luminosa che incontra uno strato di silicio levigato. Nell'inset si nota l'ottimo accordo con dati sperimentali.

Nelle seguenti Figure 6 e 7 vengono riportati i dati di riflettanza dei modelli B e C. I dati di riflettanza del modello con silicio testurizzato, ancora in ottimo accordo con i dati sperimentali mostrati nell'inset di Figura 5, costituiscono il riferimento con cui confrontare i dati successivi in presenza di polimero nano-caricato. Da notare come in tutti i modelli simulati (stessa cosa per i successivi) non è stato utilizzato alcun rivestimento antiriflettente (sia sul vetro che sul silicio).

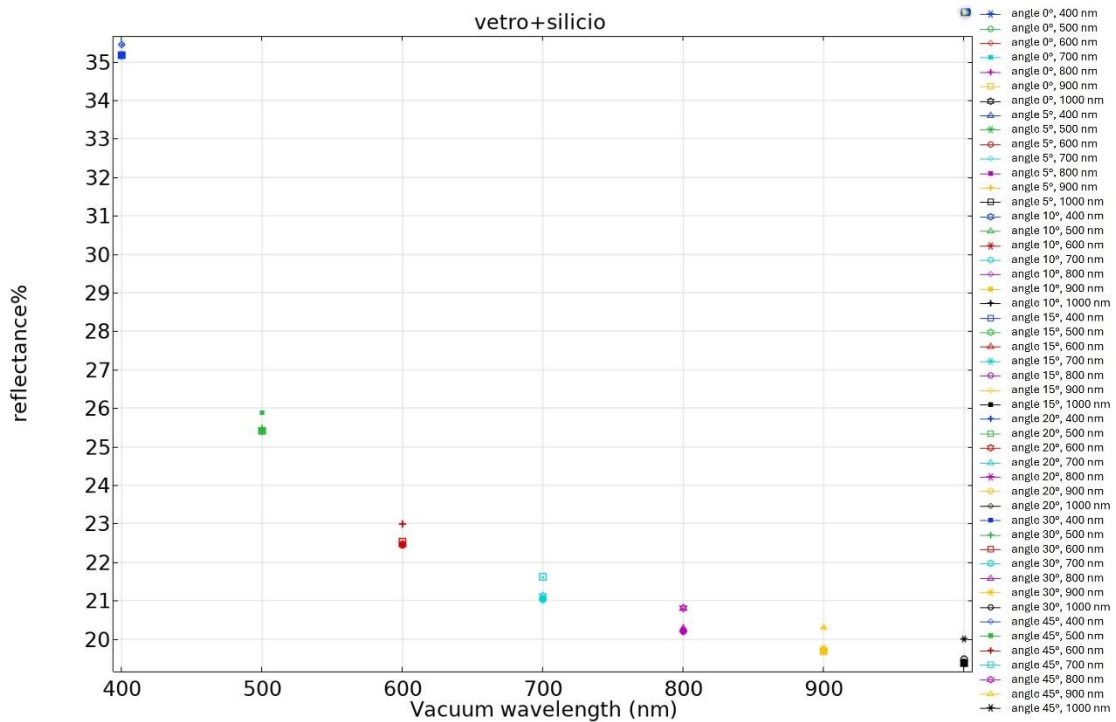


Figura 6 Riflettanza totale del modello B al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza.

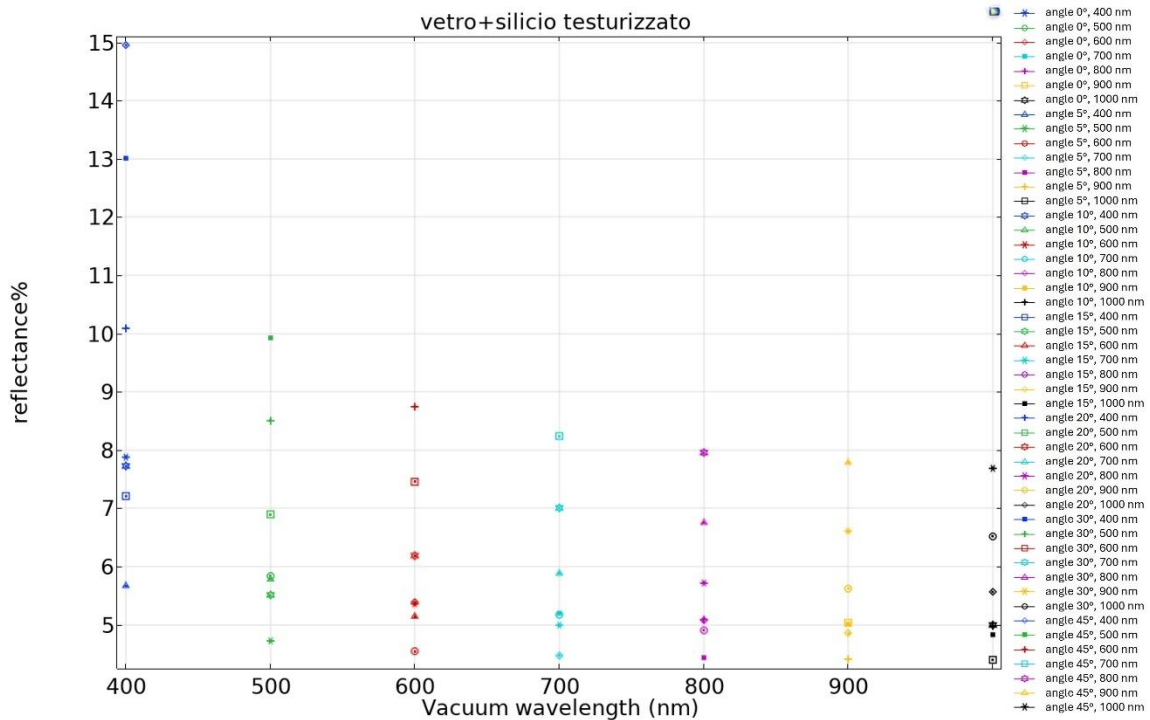


Figura 7 Riflettanza totale del modello C al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza.

Nelle figure seguenti vengono riportati tutti i dati riferiti al modello D, con polimero caricato con diverse concentrazioni di TiO_2 , partendo dalla concentrazione minima di 0.025% (indice di rifrazione 1.6 a 800 nm) fino ad arrivare a concentrazione di 0.2% (indice di rifrazione 2.97 a 800 nm, vedi Figura 3).

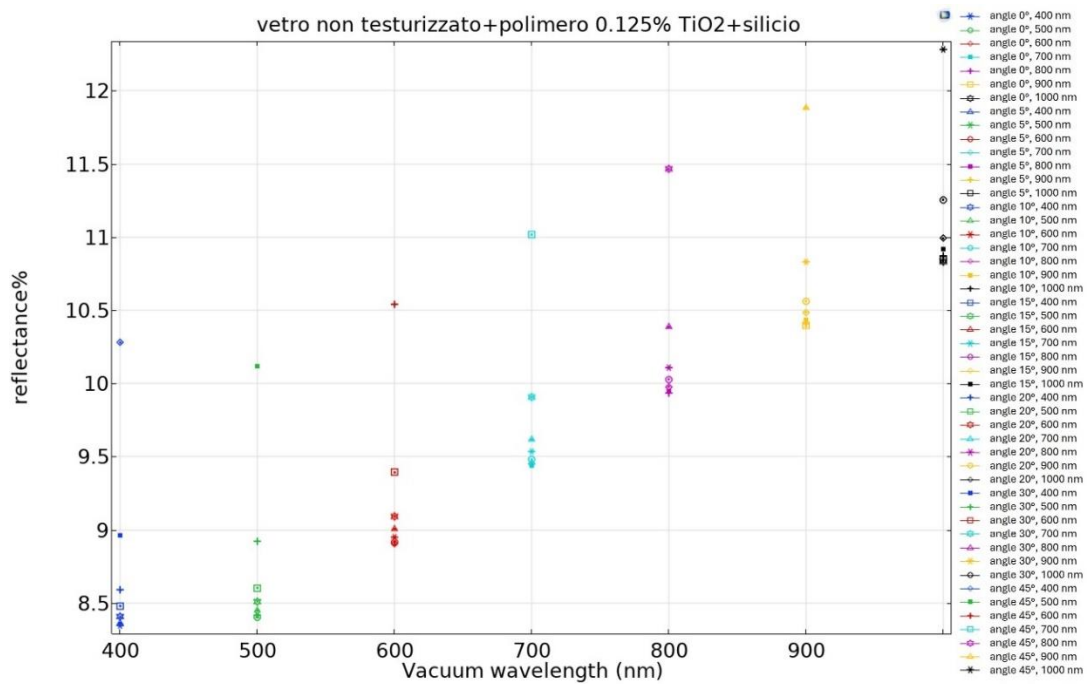


Figura 12: Riflettanza totale del modello D, con concentrazione di TiO₂ al 0.125%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza.

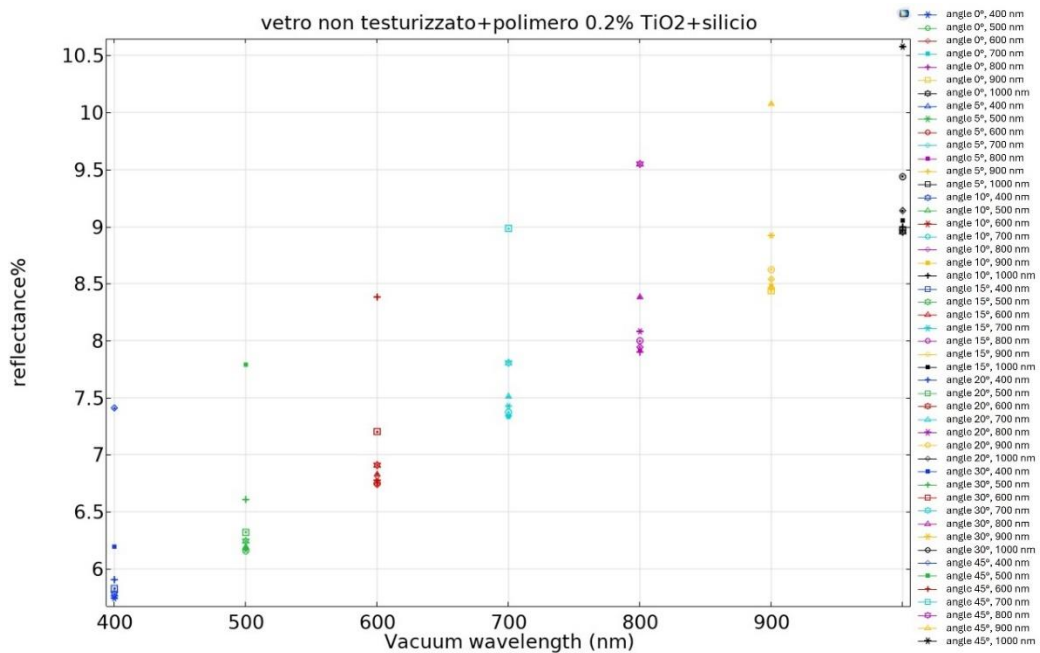


Figura 13: Riflettanza totale del modello D, con concentrazione di TiO₂ al 0.2%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza.

Confrontando gli osservabili dei modelli C e D per alcuni casi studio, specificatamente per angoli di incidenza dei raggi di 0°, 20° e 45° (vedi Figura 14), si ottiene il confronto diretto tra le curve rappresentative della riflettanza del multistrato con silicio testurizzato e quello con polimero caricato con nanoparticelle di titania.

Si nota come, percentuali di TiO₂ superiori allo 0.1% (vedi report precedente per confrontare la trasparenza dei polimeri caricati con diverse concentrazioni di nano-particelle) siano necessarie per avvicinarsi alle performance ottiche ottenibili con la testurizzazione del silicio,

uguagliandole o superandole al diminuire della lunghezza d'onda e all'aumentare dell'angolo di incidenza dei raggi.

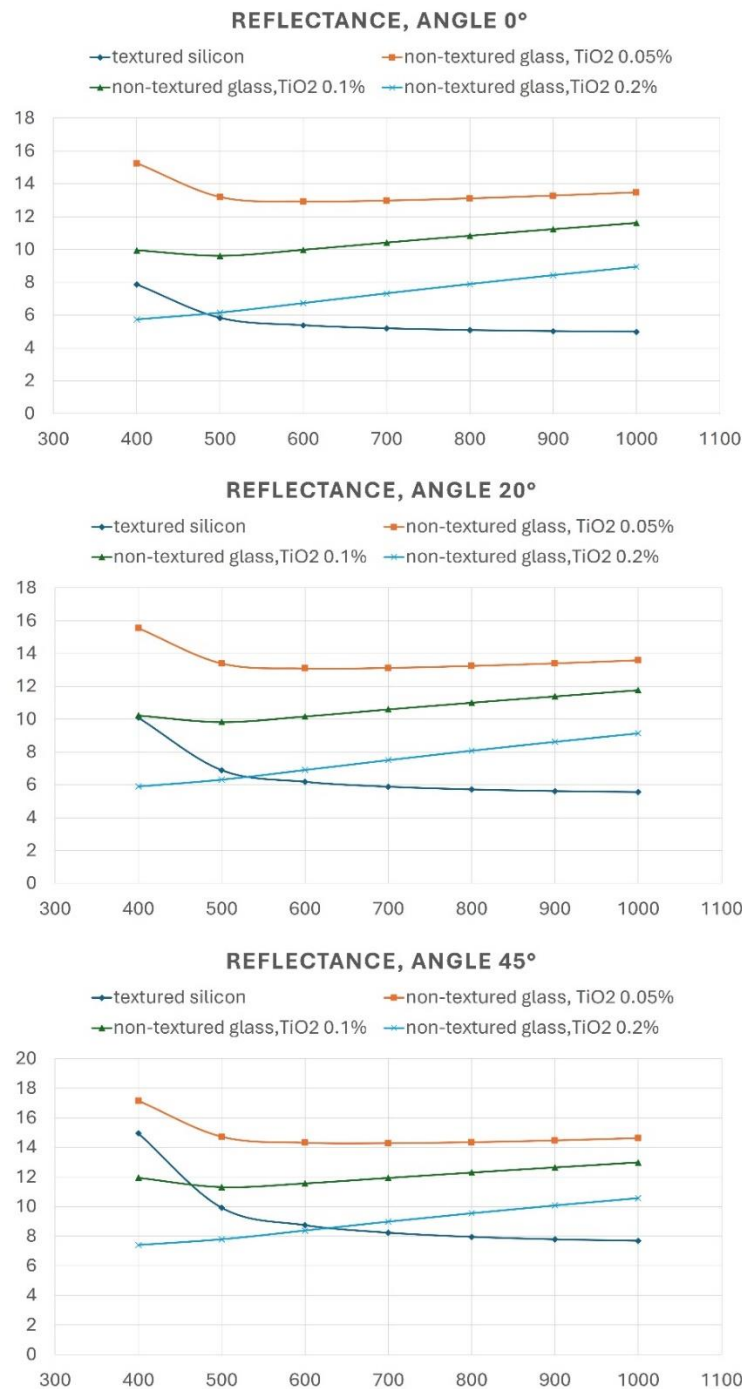


Figura 14: Andamento comparato delle riflettanze riferite al modello C (silicio testurizzato, curva blu) e modello D, con nano-particelle di TiO₂ a tre concentrazioni differenti (curve azzurra, verde e arancione).

A questo punto risulta molto interessante studiare come la combinazione di polimero caricato con nano-particelle funzionalizzate a contatto con un'interfaccia di vetro testurizzato possa o meno migliorare le prestazioni ottiche del multistrato. Come spiegato nel report precedente, ed esemplificato nel modello E di Figura 4, la texture viene ottenuta direttamente su strato di vetro, con tecniche tipo "hot-rolled embossing" [J. Micromech. Microeng. 25, 2015, 095001]. I dati simulativi sono riportati nelle figure seguenti.

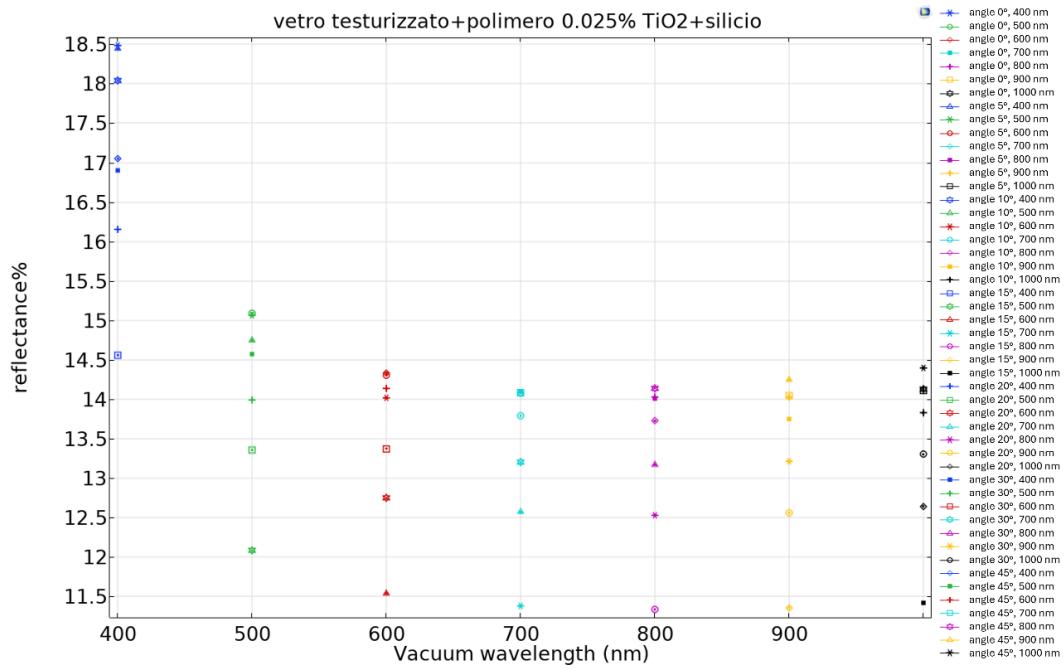


Figura 15: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO₂ al 0.025%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza.

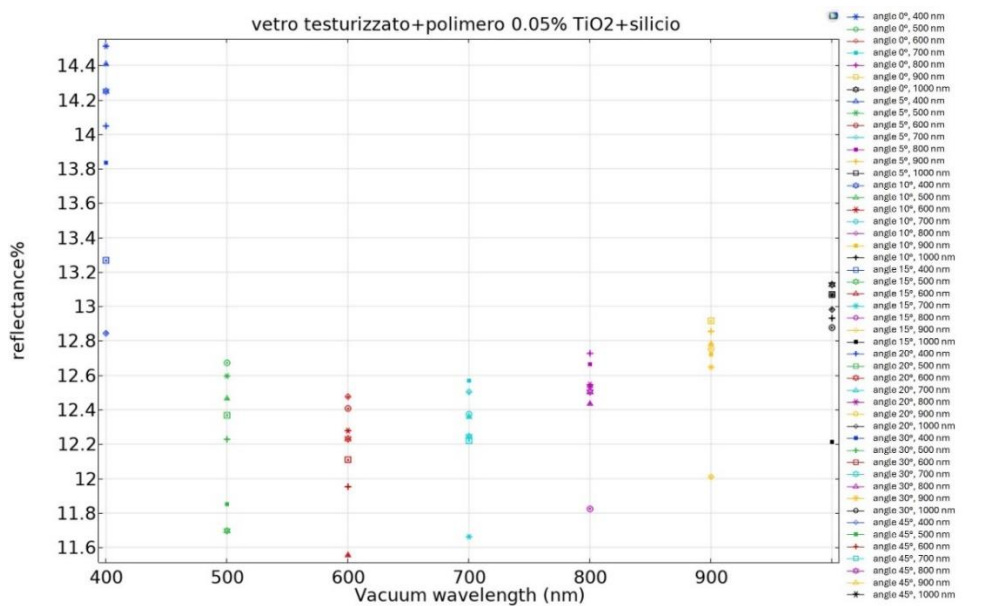


Figura 16: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO₂ al 0.05%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza.

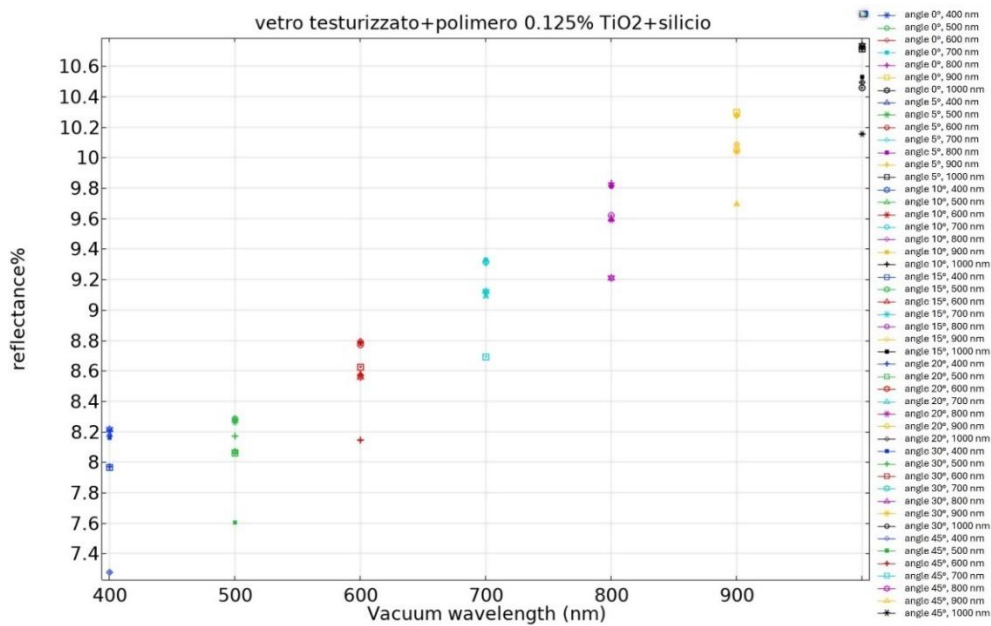


Figura 19: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO₂ al 0.125%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza.

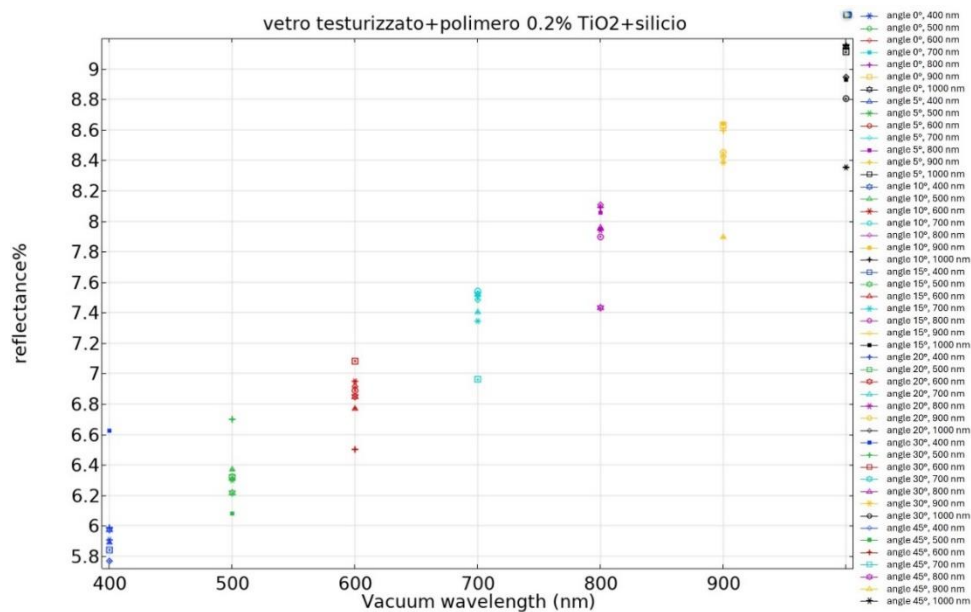


Figura 20: Riflettanza totale del modello E, con concentrazione di TiO₂ al 0.2%, al variare di lunghezza d'onda e angolo di incidenza.

Come nel caso precedente, possiamo ora confrontare i dati dei modelli C ed E per alcuni casi studio, specificatamente per angoli di incidenza dei raggi di 0°, 20° e 45°, ottenendo il confronto diretto tra le curve rappresentative del multistrato con silicio testurizzato e modello con polimero caricato con nanoparticelle di titania all'interfaccia con vetro testurizzato, riportato in Figura 21.

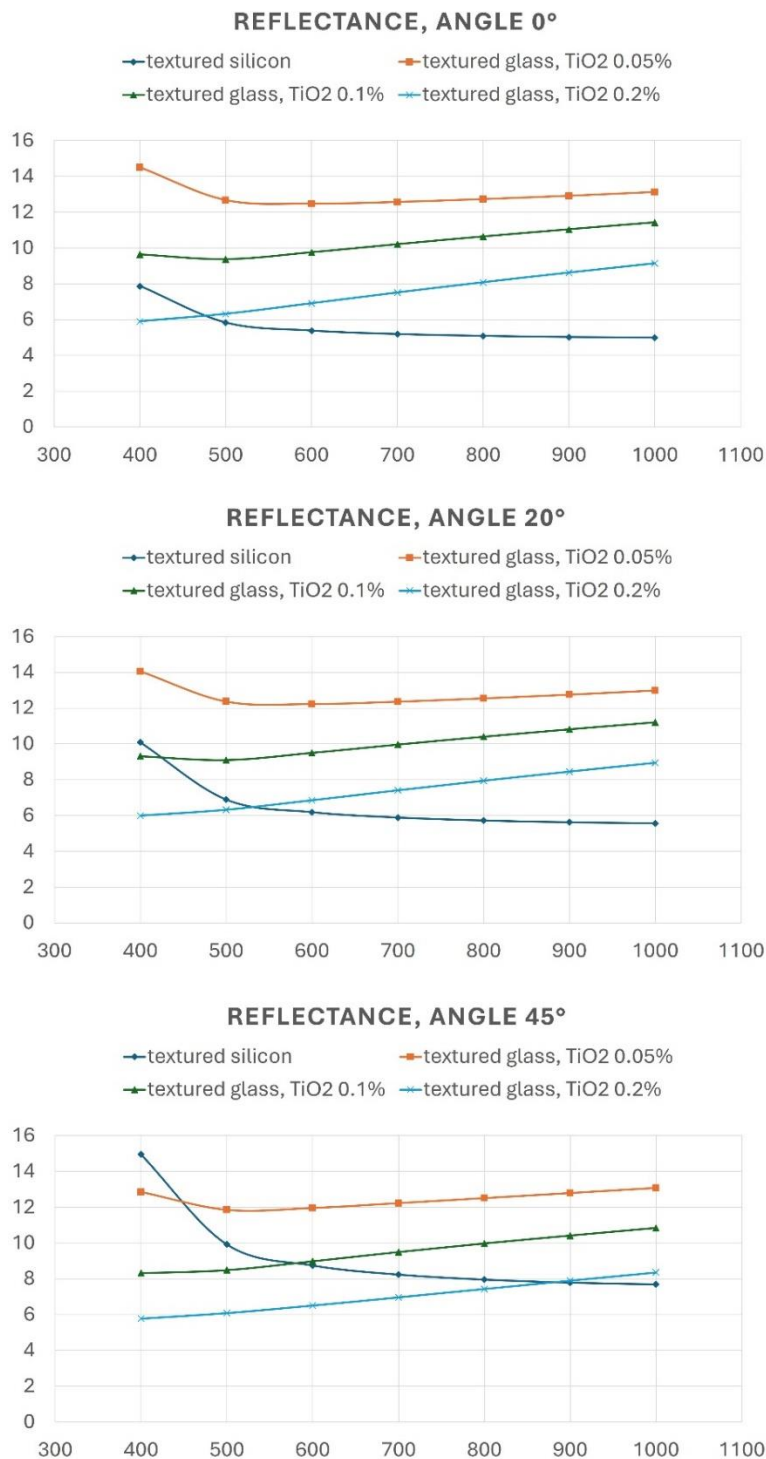


Figura 21: Andamento comparato delle riflettanze riferite al modello C (silicio testurizzato, curva blu) e modello E, con nanoparticelle di TiO₂ a tre concentrazioni differenti (curve azzurra, verde e arancione).

I risultati dimostrano come la presenza della texture sul vetro riesca a migliorare ulteriormente le performance del multistrato ottico. Come nel caso precedente, percentuali di TiO₂ superiori allo 0.1% possono uguagliare o superare le performance ottiche del multistrato con silicio testurizzato. Rispetto al caso precedente questo miglioramento è ancora più marcato al diminuire della lunghezza d'onda e all'aumentare dell'angolo di incidenza dei raggi.

Tuttavia, se si confrontano direttamente le curve di dati relative ai modelli D ed E, come mostrato in Figura 22, si nota come questo miglioramento risulta tangibile solo per elevati angoli di incidenza dei raggi. Per bassi angoli di incidenza, inferiori ai 30°, le prestazioni dei modelli D ed E sono essenzialmente equiparabili.

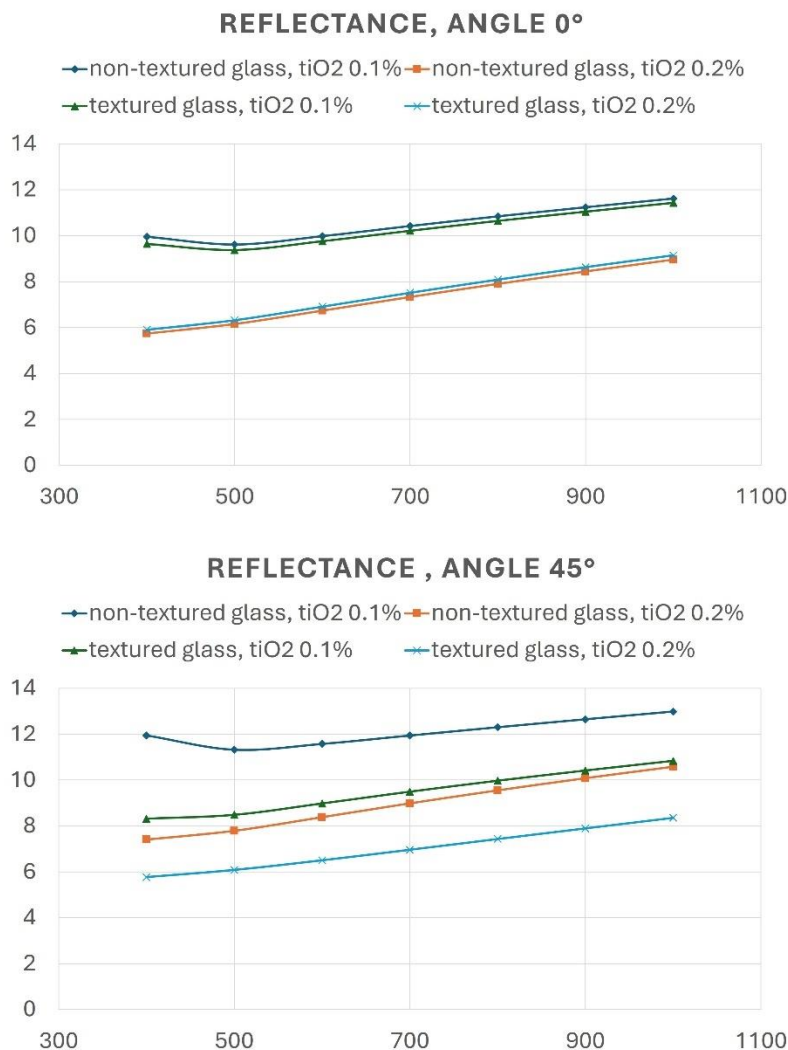


Figura 22: Andamento comparato delle riflettanze riferite al modello D e modello E, con nano-particelle di TiO₂ a due concentrazioni differenti.

In conclusione, questo studio ha permesso di individuare delle alternative, economicamente vantaggiose e industrialmente applicabili, all'uso di interfacce testurizzate di silicio. L'uso di polimeri caricati con nano-particelle funzionalizzate (titania e zirconia le più comuni), permette di frapporre uno strato ottico con indice di rifrazione di valore intermedio (in un ampio range di lunghezze d'onda) tra quello del vetro e quello del silicio, assumendo essenzialmente le caratteristiche di uno strato antiriflettente applicato sul silicio stesso. In questo modo, usando percentuali di TiO₂ superiori allo 0.1% ci si può avvicinare alle performance ottiche ottenibili con la testurizzazione del silicio, uguagliandole o superandole a basse lunghezze d'onda (400-500 nm) e all'aumentare dell'angolo di incidenza dei raggi.

L'eventuale presenza di testurizzazione sul vetro permette di migliorare ulteriormente questo comportamento solo nel caso di elevati angoli di incidenza dei raggi ($\geq 30^\circ$).

Bibliografia:

- F.C. Marques et al./Solar Energy Materials and Solar Cells 52 (1998) 285–292
- J. Micromech. Microeng. 25, 2015, 095001

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nessuna consulenza è stata utilizzata.

9 Pubblicazioni scientifiche

Nessuna pubblicazione scientifica

10 Eventi di disseminazione