



Ricerca di Sistema elettrico

Definizione del design di multistrati a film sottile e di sistemi BIPV con prestazioni ottimizzate per involucri semitrasparenti

L. V. Mercaldo, A. Scognamiglio, A. Citarella, M. Della Noce,
M. Ferrara, C. Toledo, P. Delli Veneri

DEFINIZIONE DEL DESIGN DI MULTISTRATI A FILM SOTTILE E DI SISTEMI BIPV CON PRESTAZIONI OTTIMIZZATE
PER INVOLUCRI SEMITRASPARENTI

L. V. Mercaldo, A. Scognamiglio, A. Citarella, M. Della Noce, M. Ferrara, C. Toledo*, P. Delli Veneri
ENEA, TERIN FSD DIN

*Postdoctoral Fellowship. Fundación Séneca. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (Spain)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.1 Fotovoltaico ad alta efficienza

Work package 2: Fotovoltaico Piano

Linea di attività: LA2.17 BIPV: Definizione del design di multistrati a film sottile e di sistemi BIPV con prestazioni ottimizzate per involucri semitrasparenti

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri ENEA

Responsabile del Work package: Paola Delli Veneri ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 SPERIMENTAZIONE SU PICCOLA SCALA	5
2.1.1 <i>Celle solari spettralmente selettive in silicio e adattamento dello spettro di trasmittanza</i>	5
2.1.2 <i>Indagine della dipendenza angolare e realizzazione di box di sostegno per esperimenti</i>	10
2.1.3 <i>Stime delle prestazioni fotovoltaiche</i>	15
2.2 SPERIMENTAZIONE SU LARGA SCALA	18
3 CONCLUSIONI.....	25
4 BIBLIOGRAFIA.....	25

Sommario

In questo report sono descritte le attività rivolte allo studio del funzionamento sinergico del sistema fotovoltaico-pianta, condotte nel corso della terza annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (linea LA2.17) in interazione con le linee LA2.18 e LA2.19 svolte dal Centro Museale “Musei delle Scienze Agrarie – MUSA” dell’Università “Federico II” di Napoli.

Il lavoro è stato portato avanti sia su piccola scala che su larga scala. Su piccola scala, o scala di laboratorio, l’attività è stata rivolta ad ottimizzare e generalizzare le soluzioni prese in esame nella linea LA2.16 relativamente all’uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi. Si è lavorato sul design di rivestimenti semitrasparenti spettralmente selettivi a film sottile, investigando la possibilità di adattare le finestre spettrali trasmesse a seconda dei diversi tipi di coltura ospitati sotto i vetri rivestiti. Per valutare le potenzialità dell’applicazione in ambiente reale, dove in corso d’opera la radiazione solare incide sui multistrati ad angolo variabile, è stata studiata la sensibilità delle strutture multistrato rispetto all’angolo di incidenza della luce. Infine sono state effettuate delle valutazioni delle prestazioni fotovoltaiche ottenibili. Su larga scala sono stati messi a punto dei vetri fotovoltaici in grado di assicurare un’adeguata trasmissione luminosa all’interno di una serra storica, in cui 110 m² sono stati destinati all’impiego del fotovoltaico, e di garantire un armonioso inserimento nel contesto esistente. A tal fine sono stati disegnati e fatti realizzare moduli in silicio cristallino con l’impiego di un vetro esterno stampato a getto di inchiostro con un pattern decorativo opportunamente studiato. Si è poi seguita la sperimentazione della ditta fornitrice dei moduli (SunAge, tecnologia Suncol) fino alla fase di realizzazione dell’opera.

1 Introduzione

In questa ricerca, prosiegua delle attività della linea LA2.16, è indagato l'impiego del fotovoltaico in serra, cioè involucri trasparenti adibiti alla coltivazione di specie vegetali. L'attività ha visto il coinvolgimento del Centro Museale "Musei delle Scienze Agrarie – MUSA" dell'Università "Federico II" di Napoli. Sono state esplorate soluzioni innovative su diverse scale, dal laboratorio, con lo studio di pseudo-moduli semitrasparenti di $10 \times 10 \text{ cm}^2$, alla larga scala con la progettazione di una copertura FV di 110 m^2 per una serra storica presso i giardini della Reggia borbonica di Portici (NA), sede del dipartimento di Agraria e di MUSA.

L'impiego di moduli fotovoltaici in sostituzione dei tradizionali materiali di copertura delle serre richiede di indagare la capacità dell'involucro di trasmettere la radiazione solare in modalità adeguate a favorire il processo fotosintetico delle piante che vi sono coltivate [1, 2]. L'approccio più consolidato fa ricorso all'uso di moduli basati su celle opache a base di silicio cristallino, con la necessità di lasciare degli spazi scoperti in modo che nell'arco della giornata ci sia ombreggiamento solo temporaneo sulle coltivazioni sottostanti. Pur basandosi su celle solari di tipo tradizionale, c'è ampio margine di innovazione a livello di prodotti e di progettazione di impianti integrati [3]. Parallelamente vengono studiati approcci alternativi basati su tecnologie fotovoltaiche a film sottili che consentano un uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi, fornendo quindi la possibilità di sfruttare l'intera superficie della copertura della serra, senza dover necessariamente lasciare degli spazi scoperti. Si mira a mettere a punto moduli fotovoltaici semitrasparenti spettralmente selettivi con trasmittanza adattata allo spettro di assorbimento delle piante. Tra le possibili realizzazioni tecnologiche figurano le celle solari organiche, grazie alla possibilità di adattare lo spettro di assorbimento del materiale attivo [4, 5], e celle ultrasottili in germanio amorfo munite di riflettore posteriore semitrasparente nella forma di multistrato opportunamente ingegnerizzato per ottenere selettività spettrale [6, 7]. In questo filone di ricerca, nei laboratori ENEA è stata avviata un'attività esplorativa basata sull'uso del silicio amorfo (a-Si:H), già studiato nei laboratori per applicazioni sia nel fotovoltaico a film sottile di Si [8, 9] che per celle solari ad eterogiunzione di silicio [10].

Nell'annualità precedente, sono stati progettati, fabbricati e caratterizzati degli pseudo-moduli di test a base di a-Si:H, che possono essere visti essenzialmente come filtri ottici che mimano i corrispettivi moduli fotovoltaici funzionali. I prototipi sono poi stati forniti al MUSA per poter effettuare studi di crescita di piante e indagare la fattibilità dell'applicazione. In questa annualità, proseguendo gli studi, si è lavorato sul design dei "filtri" per un adattamento più generale a diverse colture, considerando anche la possibile applicazione di uno strato antiriflesso sul vetro per ottimizzare l'utilizzo della radiazione solare incidente. È stata poi studiata la sensibilità delle strutture multistrato rispetto all'angolo di incidenza della luce, parallelamente progettando e realizzando opportuni box di sostegno dei campioni per le sperimentazioni presso MUSA, anche con possibilità di variare l'angolo di tilt. Infine sono state effettuate delle prime valutazioni dei parametri fotovoltaici ottenibili, combinando test sperimentali e simulazioni dell'efficienza quantica.

Parallelamente, sono stati condotti studi relativi alla larga scala che, a partire da una data percentuale di opacità ritenuta adeguata all'impiego dei moduli in serra (pari a circa il 30%), considerano delle tecnologie di stampa dello strato vetrato esterno del componente vetrato che consentono di migliorare l'aspetto dei componenti senza perdere troppo in efficienza. In tal modo viene favorito l'armonioso inserimento dei vetri fotovoltaici in un contesto naturale e di pregio, migliorando l'accettabilità della soluzione e quindi la sua replicabilità in contesti anche sensibili.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Sperimentazione su piccola scala

2.1.1 Celle solari spettralmente selettive in silicio e adattamento dello spettro di trasmittanza

L'attività è la prosecuzione delle indagini avviate nell'annualità precedente sul possibile uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi grazie a moduli fotovoltaici semitrasparenti

spetttralmente selettivi a base di silicio amorfo. Il concetto prende spunto dallo spettro di assorbimento dei pigmenti delle piante nel processo di fotosintesi. Questi assorbono per lo più luce nel range del blu e del rosso, come mostrato in figura 2.1.1 per la clorofilla, mentre la regione spettrale intermedia tra i picchi di assorbimento (circa 500-650 nm, il cosiddetto green-gap) e l'IR in linea di principio possono essere riservate ad usi complementari, come la generazione di elettricità mediante fotovoltaico.

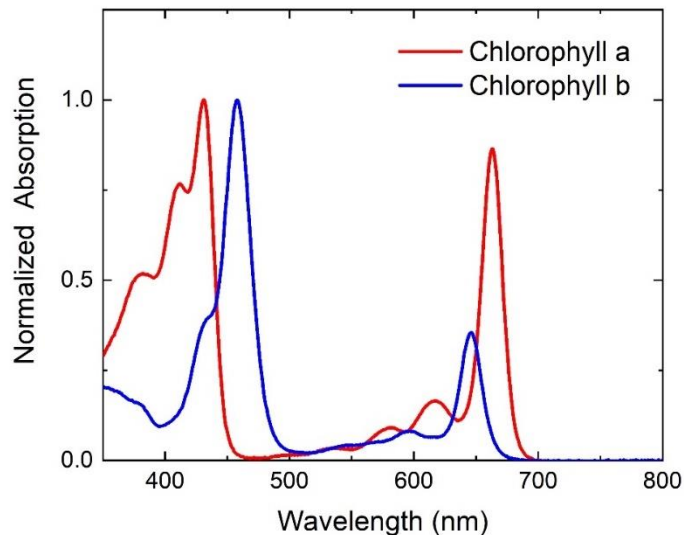


Figura 2.1.1. Spettro di assorbimento normalizzato della clorofilla tipo a e tipo b [11].

Abbiamo indagato la possibilità di sviluppare delle celle solari semitrasparenti basate sulla tecnologia a film sottile di silicio, con spettro di trasmittanza adattato agli spettri di assorbimento dei pigmenti, grazie all'uso di un riflettore posteriore del tipo Fabry-Perot a multistrato metallo/ossido/metallo/ossido (MOMO), secondo lo schema in figura 2.1.2. In un multistrato di tipo MOMO, lo strato intermedio di ossido tra i due sottili strati metallici altamente riflettenti è una cavità ottica in cui l'interferenza costruttiva dà luogo a trasmissione e la distruttiva a riflessione. Modificando lo spessore di questo strato è possibile selezionare le lunghezze d'onda trasmesse adattandole agli spettri di assorbimento delle piante. Piccole variazioni dello spettro di trasmittanza si hanno anche variando lo spessore dello strato esterno di ossido, che essenzialmente ricopre un ruolo di protezione del film ultrasottile di metallo che potrebbe altrimenti facilmente ossidarsi.

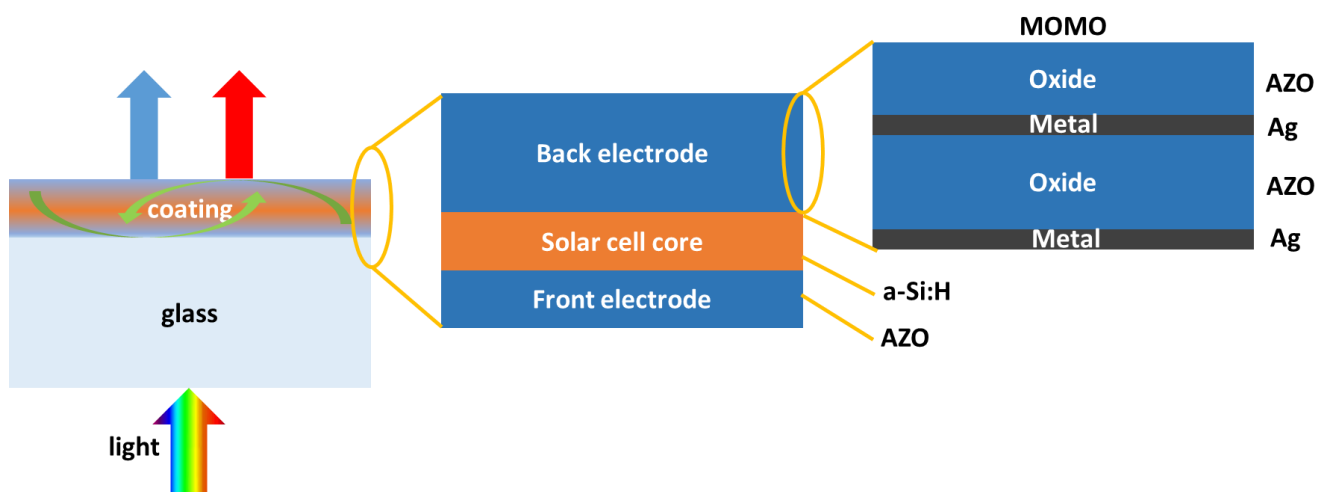


Figura 2.1.2. Schema del concetto di cella solare spettralmente selettiva e sua implementazione con tecnologia a film sottile di silicio con riflettore posteriore tipo MOMO.

La figura 2.1.2 mostra lo schema della struttura in esame e una rappresentazione grafica del funzionamento. I dispositivi si presentano in forma di sottili pellicole, depositate su supporto di vetro, costituite da un cuore in silicio amorfo (a-Si:H) interposto tra due elettrodi trasparenti, dove il primo elettrodo su vetro è un singolo strato di ossido trasparente e conduttivo, o TCO (nel nostro caso AZO, ossia ossido di zinco drogato con alluminio), e l'elettrodo posteriore è un multistrato tipo MOMO (nel nostro caso Ag/AZO/Ag/AZO), dove i film di metallo devono essere molto sottili per garantire sufficiente trasparenza. Per realizzare celle solari semitrasparenti, l'elettrodo posteriore opaco standard di tipo metallico va infatti sostituito da un film di TCO simile a quello frontale o da multistrati con alternanza di ossido e metallo in strato ultrasottile [6, 12, 13], in modo da ottenere, in entrambe le realizzazioni, parziale trasparenza e buona raccolta di carica elettrica e nel secondo caso anche una selettività in lunghezza d'onda. Inoltre, rispetto a celle di silicio amorfo ottimizzate per la sola applicazione fotovoltaica, in cui si ricorre a superfici rugose per intrappolare la radiazione ad alta lunghezza d'onda per aumentare la corrente fotogenerata e quindi l'efficienza, in questo caso per l'applicazione complementare fotovoltaico/fotosintesi bisogna lavorare con interfacce perfettamente lisce. Nell'annualità precedente è stata investigata la possibilità di sfruttare il componente ottico MOMO sul retro della cella solare per alterare opportunamente gli spettri di assorbimento e trasmissione di quest'ultima in modo che le lunghezze d'onda intorno al verde siano ben sfruttate dalla cella stessa per produrre elettricità (con un MOMO che riflette internamente il verde nello strato di silicio), mentre nel rosso e nel blu ci sia solo assorbimento da singolo passaggio della luce attraverso il silicio (MOMO che trasmette nel rosso e nel blu). Va evidenziato che, relativamente alla componente blu della radiazione, dove il silicio è fortemente assorbente, l'assorbimento da singolo passaggio nel silicio stesso riduce notevolmente la luce in arrivo sul riflettore posteriore, per cui la trasmittanza finale è certamente limitata. È però possibile ottenere un contributo non nullo, non praticabile con altra tipologia di contatto semitrasparente posteriore.

Utilizzando le costanti ottiche sperimentali dei vari materiali (spettri di indice di rifrazione, n , e coefficiente di estinzione, k), si è effettuata inizialmente una progettazione ottica utilizzando come target lo spettro di assorbimento dell'*Arabidopsis* fornito dal partner MUSA, arrivando a definire i valori ottimali dei vari strati della struttura: glass/AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/Ag(12 nm)/AZO(330 nm)/Ag(12 nm)/AZO(100 nm). Con i dati ottici già noti dallo studio precedente, in questa annualità si è proseguito con ulteriori simulazioni, utilizzando sempre il software IMD per modellazione di multistrati [14]. Si è lavorato sul design dello stack, investigando la possibilità di adattare le finestre spettrali trasmesse a diversi tipi di coltura ospitati sotto i vetri rivestiti, avendo come riferimento i range di assorbimento della clorofilla di tipo a e tipo b, tra i pigmenti più comuni.

La tipologia di dispositivo in esame consente di traslare le finestre spettrali agevolmente agendo sullo spessore dello strato intermedio di AZO nel riflettore. In figura 2.1.3 sono riportati gli spettri simulati per la struttura glass/AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/Ag(12 nm)/AZO(variabile)/Ag(12 nm)/AZO(100 nm), con gli spessori già ottimizzati in precedenza per i vari strati e con spessore variabile del film di AZO intermedio nel MOMO, utilizzando il vetro come mezzo di ingresso e l'aria come mezzo di uscita. La figura mostra per riferimento anche gli spettri di assorbimento normalizzati della clorofilla e sull'asse di destra l'irradianza dello spettro solare standard AM 1.5g.

Come già illustrato nel Report della LA2.16 [15], la trasmittanza presenta tre massimi, approssimativamente nel blu, nel rosso e nell'infrarosso, che si spostano a lunghezze d'onda crescenti al crescere dello spessore di AZO intermedio nel riflettore, come indicato dalle frecce in figura. Il picco più intenso è quello intermedio, nel rosso, che è stato selezionato come picco principale da investigare. L'inset in figura riporta quantitativamente lo shift del massimo del picco. La posizione varia di ~ 40 nm per "middle AZO" che varia da 305 nm a 335 nm, seguendo un andamento lineare con intercetta di (247 ± 3) nm e pendenza di 1.30 ± 3 . La legge ottenuta può essere utilizzata come curva di taratura, consentendo quindi di fissare facilmente lo spessore di middle AZO sul retro della cella, senza necessità di ulteriori simulazioni, una volta note le richieste in termini di picco di assorbimento delle piante.

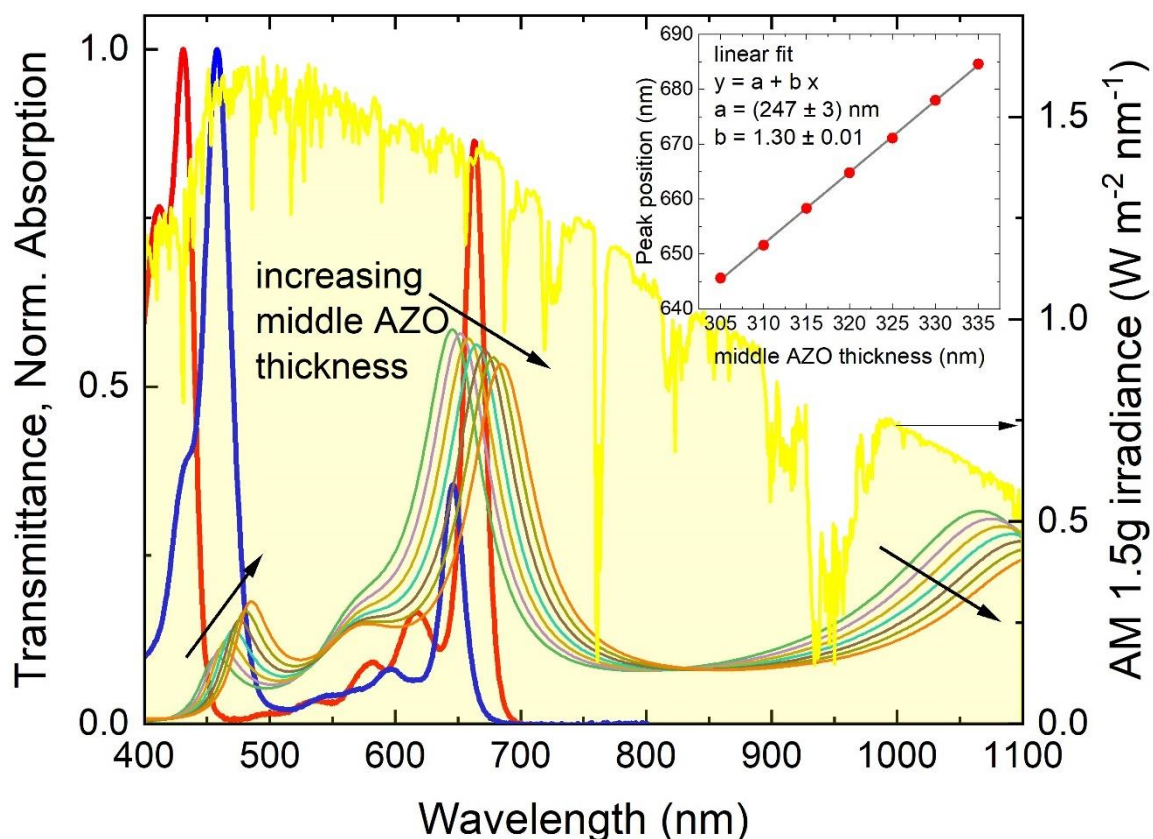


Figura 2.1.3. Spettri simulati di trasmittanza della struttura glass/AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/Ag(12 nm)/AZO(variable)/Ag(12 nm)/AZO(100 nm), con gli spessori già ottimizzati per i vari strati e con spessore variabile del film di AZO intermedio nel MOMO. Per riferimento sono inclusi gli spettri di assorbimento normalizzati della clorofilla e sull'asse di destra l'irradianza dello spettro solare standard AM 1.5g. Inset: shift del massimo del picco intermedio al variare dello spessore di AZO intermedio.

Si osservi, inoltre, che al crescere dello spessore del “middle AZO” l'intensità del picco nel rosso si riduce di un 5% assoluto nel range considerato, ma questa perdita è compensata da un aumento dell'intensità del picco nel blu di un 8% assoluto. Oltre ai picchi utili alle piante nel rosso e nel blu, lo spettro di trasmittanza presenta anche un picco nell'IR verso 1100 nm con intensità di circa 25%. A parte la presenza di questo picco, la trasmittanza in questo range spettrale è comunque notevolmente ridotta, con possibili benefici in termini di stabilizzazione termica nelle applicazioni in serra soprattutto in regioni e stagioni con climi molto caldi.

Oltre alla possibilità di spostare le bande trasmesse, c'è anche un certo margine di regolazione del rapporto tra luce riflessa e trasmessa variando lo spessore degli strati di Ag nel MOMO. Il range di variabilità ammessa per questo strato è comunque molto limitato. I film di metallo nella struttura devono infatti essere sufficientemente sottili per garantire adeguata trasparenza, ma non è raccomandabile scendere sotto la decina di nm per garantire un film continuo. Inoltre, spessori non troppo bassi sono utili per lo scopo fotovoltaico dell'applicazione, per garantire una sufficiente riflessione internamente allo strato attivo della cella solare nella regione spettrale intermedia tra i picchi di trasmittanza e quindi incrementare la corrente fotogenerata. In base alle simulazioni, si suggerisce di variare lo spessore tra 10 nm e 15 nm a seconda che si voglia favorire il fotovoltaico rispetto alla fotosintesi (aumentando lo spessore) o viceversa (abbassando lo spessore). Come mostrato in figura 2.1.4, infatti al crescere dello spessore dei film di Ag la trasmittanza scende mentre sale l'assorbanza nel range spettrale 500 - 600 nm.

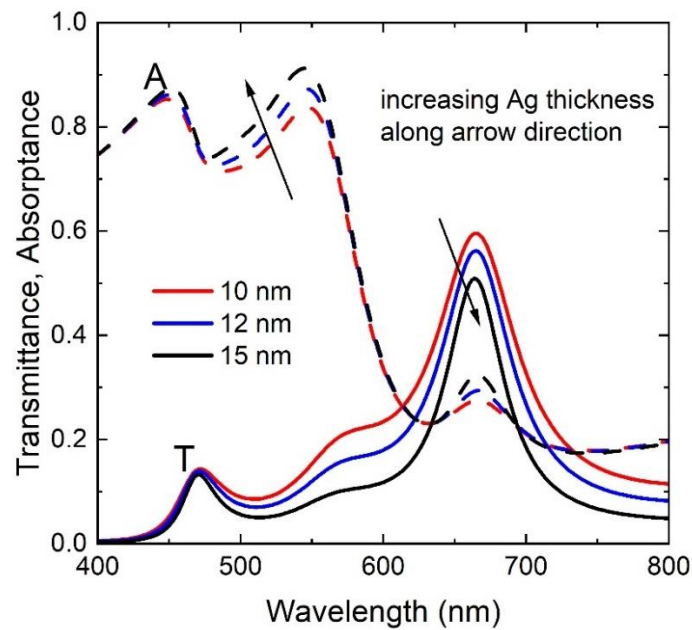


Figura 2.1.4. Spettri simulati di trasmittanza T e assorbanza $A = 1 - R - T$ della struttura glass/AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/Ag(10-15 nm)/AZO(320 nm)/Ag(10-15 nm)/AZO(100 nm).

È stato poi preso in esame l'effetto di un eventuale strato antiriflesso sulla faccia frontale dei vetri. La trasmittanza simulata finora in questo studio non tiene conto della prima riflessione sulla superficie frontale del vetro in quanto il vetro è stato considerato come mezzo semi-infinito di ingresso, non essendo incluso nel software IMD il modeling non-coerente di strati spessi (il vetro utilizzato nelle prove sperimentali ha spessore di 1.1 mm). Ciò ha effetto sull'intensità ma non sulla posizione dei picchi. Il contributo di riflettanza della faccia frontale del vetro può essere facilmente ottenuto modellando una struttura costituita semplicemente da vetro come substrato o mezzo di uscita e aria come mezzo di ingresso. Il risultato della simulazione è mostrato in figura 2.1.5.

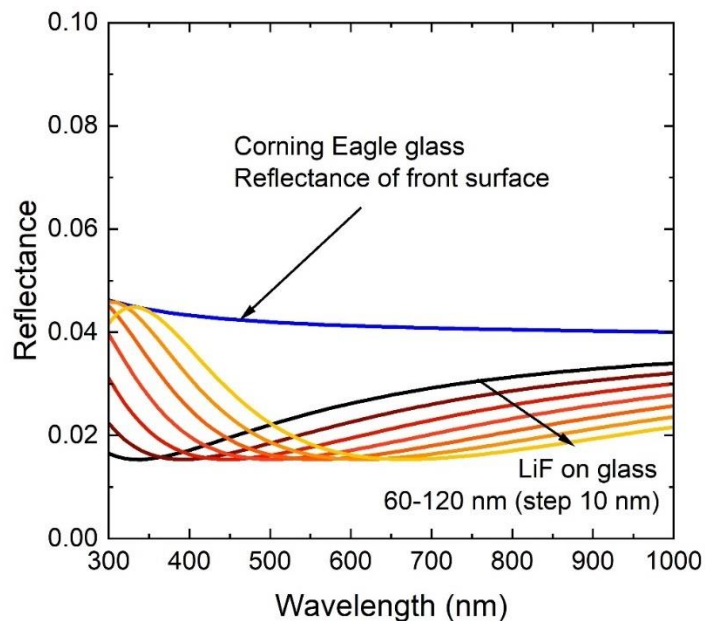


Figura 2.1.5. Spettri simulati di riflettanza della faccia frontale del vetro Corning Eagle in caso di superficie nuda (curva blu) e ricoperta da un film antiriflesso di LiF con spessore variato da 60 nm a 120 nm con passo 10 nm da una curva alla successiva nel grafico (dai colori scuri ai chiari).

Come è noto il contributo ammonta a circa 4%. Si può parzialmente recuperare la perdita dovuta a questa prima riflessione con l'applicazione sulla faccia anteriore del vetro di un film con proprietà antiriflettenti, come MgF_2 o LiF . La simulazione della struttura costituita da un film di LiF su vetro (quest'ultimo modellato sempre come substrato o mezzo di uscita) mostra che scegliendo opportunamente lo spessore del film tra 60 nm e 120 nm è possibile privilegiare una regione o l'altra dello spettro in cui minimizzare la riflessione frontale e far passare più luce nel multistrato fabbricato sulla faccia posteriore: a spessori minori si privilegiano le basse lunghezze d'onda e a spessori maggiori viceversa le lunghezze d'onda più alte. Volendo privilegiare il fotovoltaico, lo spessore ottimale è 100 nm. Con valori più bassi si può incrementare leggermente la luce trasmessa nel blu.

2.1.2 Indagine della dipendenza angolare e realizzazione di box di sostegno per esperimenti

Per l'applicazione di moduli fotovoltaici spettralmente selettivi in serre e facciate, data la variazione dell'inclinazione dei raggi solari nell'arco della giornata e nel corso dell'anno, è importante che la dipendenza angolare della selettività spettrale non sia elevata. Idealmente, la posizione spettrale dei picchi di trasmittanza e l'intensità trasmessa dovrebbero restare costanti per tutti gli angoli di incidenza della luce. Nella realtà c'è sicuramente una dipendenza, che abbiamo valutato sperimentalmente.

Sono stati fabbricati pseudo-moduli su substrati di vetro Corning Eagle di area $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Gli strati di AZO sono stati depositati mediante processo di sputtering RF in un sistema multitarget MRC a frequenza standard di 13.56 MHz con gas Argon a partire da un target di AZO ($\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ al 2% in peso) ad una pressione di 6 mTorr e potenza di 1 kW (densità di potenza di circa 2.2 W/cm^2). Gli strati ultrasottili in Argento sono stati realizzati per sputtering DC nello stesso sistema di deposizione, con potenza di 300 W e pressione di Argon di 10 mTorr. I film di a-Si:H sono stati fabbricati per PECVD (Plasmalab800+, Oxford Instrument) utilizzando gas silano (SiH_4) con pressione di 300 mTorr, a temperatura di 150°C e con potenza del segnale RF di 60 W (densità di potenza pari a circa 36 mW/cm^2). Dettagli e accorgimenti da adottare durante la fabbricazione sono stati riportati in [15].

Sono state effettuate misure di trasmittanza ad angolo di incidenza variabile utilizzando un ellissometro ad angolo variabile (VASE, J.A. Woollam Co.) in modalità trasmissione con luce incidente polarizzata s e p con step angolari di 10° . In figura 2.1.6 sono riportate le mappe di trasmittanza a due variabili indipendenti, con la lunghezza d'onda sull'asse x e l'angolo di incidenza sull'asse y per uno dei campioni fabbricati. L'angolo è definito rispetto alla normale alla superficie del campione e quindi è zero per incidenza normale. Le tre fasce in figura corrispondono all'evoluzione in angolo dei tre picchi di trasmittanza. La posizione dei picchi nel rosso e nel blu presenta un lieve shift, poco pronunciato soprattutto per il primo picco nel blu, verso valori di lunghezza d'onda più bassi, che si manifesta essenzialmente a partire da circa 30° . Oltre allo shift, si osserva una riduzione di intensità dei picchi. Globalmente la performance angolare mostra comunque una buona resilienza per angoli fino a circa 40° . Di queste informazioni va tenuto conto per la definizione del posizionamento ottimale dei moduli in serra per i diversi siti di installazione.

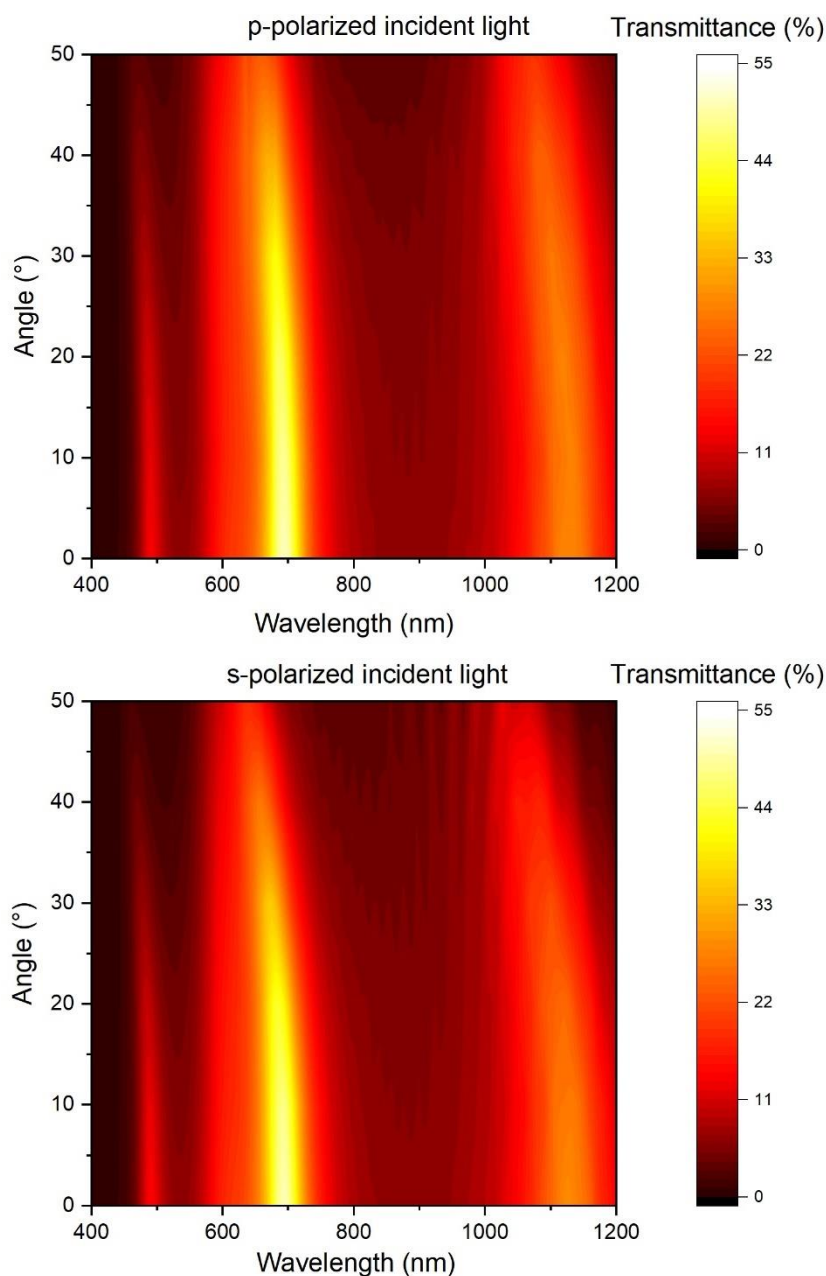


Figura 2.1.6. Mappe di trasmittanza misurata con ellissometro ad angolo variabile per un prototipo di pseudo-modulo spettralmente selettivo al variare dell'angolo di incidenza (angolo definito rispetto alla normale alla superficie del campione) con luce polarizzata p e s.

Alla caratterizzazione dei film prodotti si è affiancato un lavoro di progettazione e realizzazione di opportuni box di sostegno per i prototipi fabbricati, da utilizzare per esperimenti con piante presso MUSA anche con angolo variabile. Sono stati prodotti box di diverse tipologie. Si è partiti con box in acido polilattico (PLA) prodotti tramite l'utilizzo di una stampante 3d, di dimensioni $11 \times 11 \times 11 \text{ cm}^3$ con uno spessore delle pareti laterali di 4 mm per lato. Il PLA utilizzato è di tipo opaco che non permette il passaggio di luce laterale. I box consistono in sostegni di forma cubica con lato superiore ed inferiore liberi da pareti. Internamente, in corrispondenza del bordo superiore, è stata realizzata una cornice sporgente di larghezza 4 mm e spessore 4 mm per l'appoggio del vetro su cui è depositato il film selettivo. È stato anche realizzato un incavo di forma semicilindrica per permettere di estrarre il vetro facilmente senza correre il rischio di romperlo. La faccia inferiore del box è stata lasciata aperta per permettere il sovra-posizionamento dell'oggetto sulle piante durante la sperimentazione. Nella Figura 2.1.7 sono riportati il progetto del box, in particolare la vista dall'alto

(immagine a sinistra) e una vista prospettica (immagine al centro), e la foto di un prototipo realizzato e fornito a MUSA per le sperimentazioni (foto a destra).

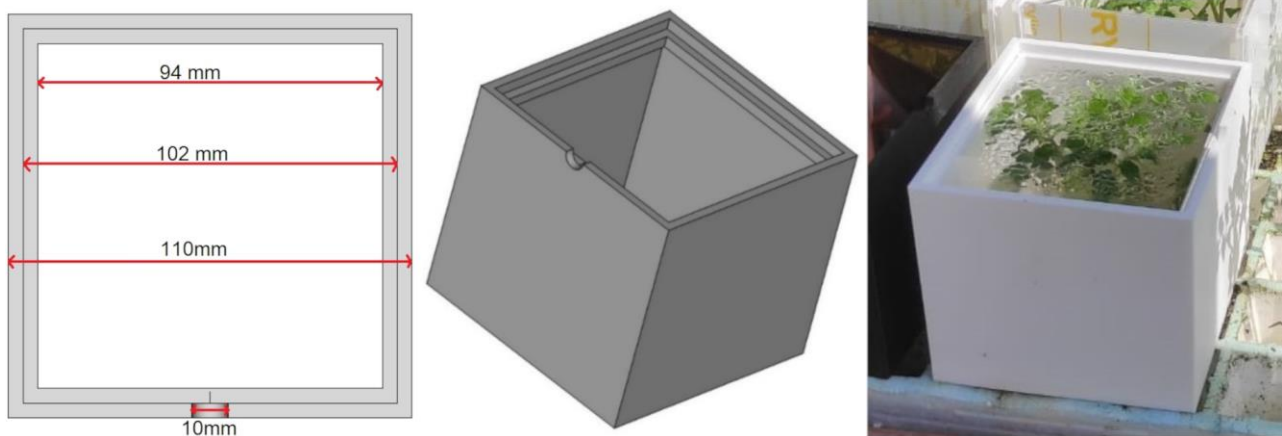


Figura 2.1.7. Box in PLA da stampante 3d: vista della parte superiore del progetto (immagine di sinistra), vista prospettica del progetto (centro) e prototipo realizzato in uso per la sperimentazione presso MUSA (destra).

Per ulteriori sperimentazioni, sono stati realizzati dei nuovi box in plexiglass, utilizzando la macchina LaserCut. Le dimensioni dei box sono le stesse delle precedenti, però in questo caso sono stati realizzati quattro pezzi che sono stati successivamente montati ad incastro con l'aggiunta di opportune stecche, sempre in plexiglass, per sostenere i vetri. In questo caso le pareti sono state ricoperte da una pellicola plastica semi-trasparente per consentire un passaggio parziale della luce attraverso le pareti, per test selezionati. Per eliminare invece del tutto l'effetto della radiazione luminosa laterale gli stessi box sono stati foderati internamente con del cartoncino nero sagomato. Inoltre sono stati praticati dei fori sulle pareti laterali per consentire la circolazione dell'aria all'interno dei box. Nella Figura 2.1.8 sono riportati i disegni in CAD delle pareti. Nella Figura 2.1.9 sono poi riportate una vista prospettica dei box ed una foto di alcuni prototipi in uso negli esperimenti di MUSA.

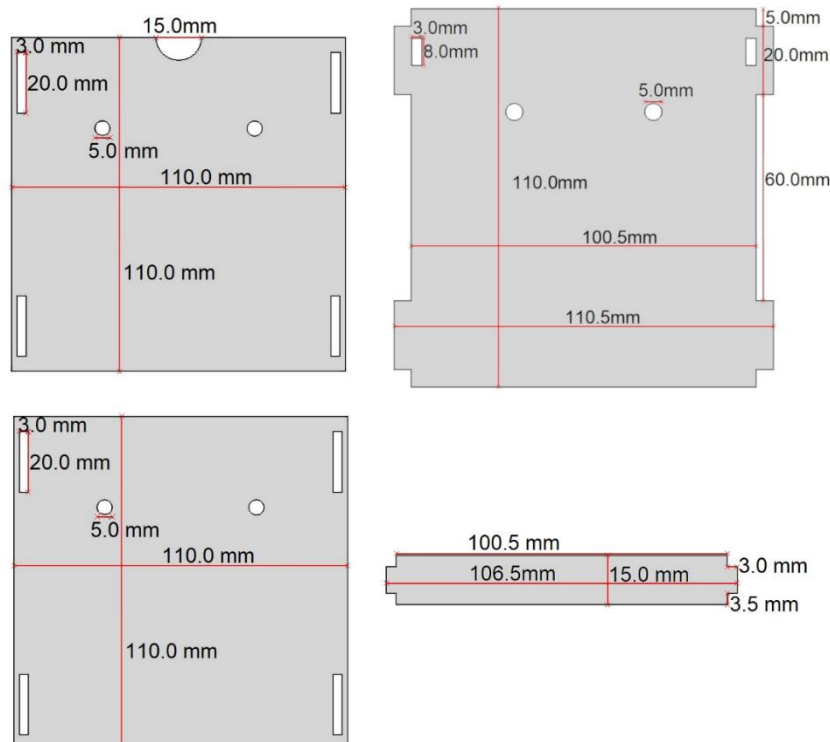


Figura 2.1.8. Progetto CAD delle pareti laterali dei box in plexiglass al taglio laser e del supporto per il vetro.

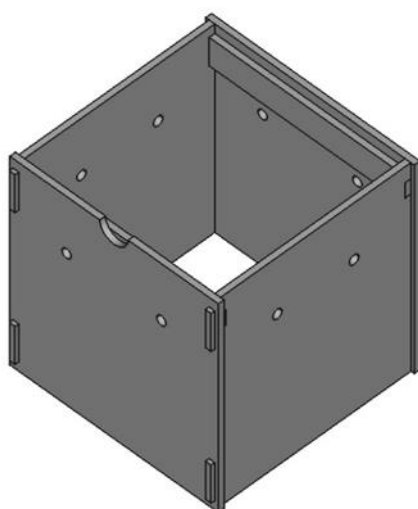


Figura 2.1.9. Vista prospettica del progetto di box in plexiglass al taglio laser (sinistra) e prototipi reali utilizzati nella sperimentazione (destra).

Sono stati inoltre prodotti dei box in plexiglass di dimensioni maggiori in grado di poter alloggiare matrici 3 x 3 di vetri per la sperimentazione effettuata presso MUSA in serra, sotto luce naturale ma comunque in condizioni protette (figure 2.1.10 e 11). Le dimensioni di questi box sono 34 x 34 x 60 cm³.

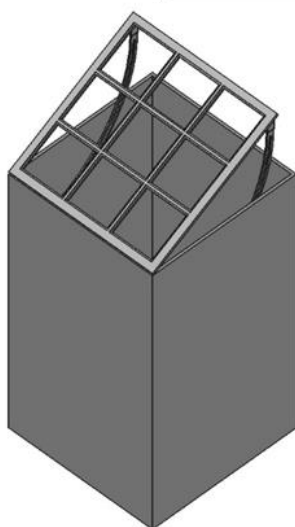
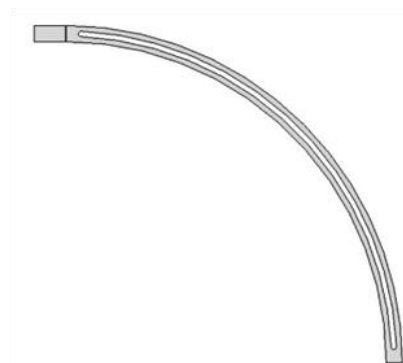
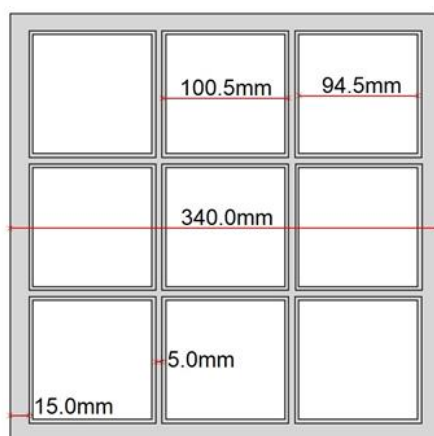


Figura 2.1.10. Box per matrici 3x3 di vetri: progetto della griglia di alloggiamento dei vetri (in alto a sinistra), progetto del goniometro (in alto a destra) e viste prospettiche del box progettato e di un prototipo realizzato in plexiglass (in basso).

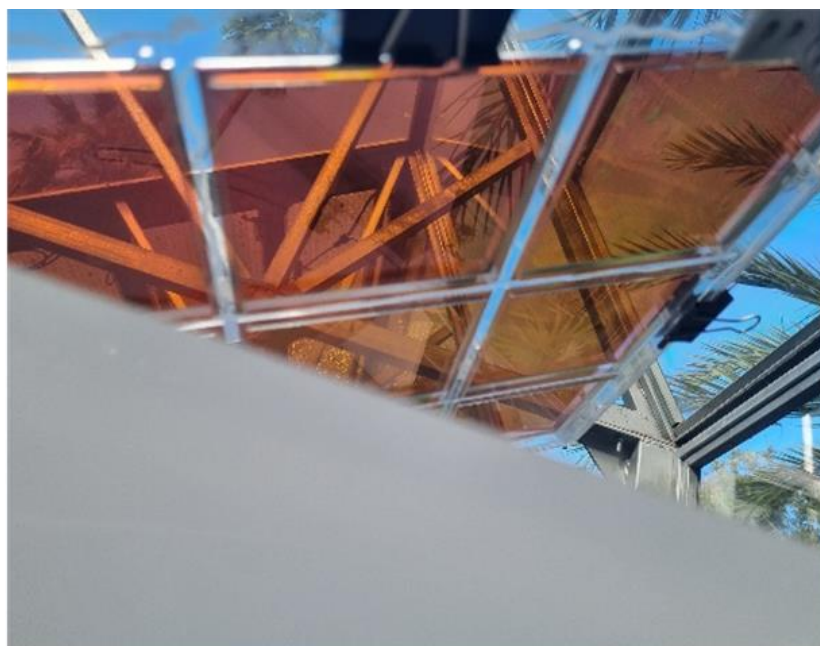


Figura 2.1.11. Foto di prototipi di box grandi durante la sperimentazione presso MUSA. Sono montati 9 campioni da 10 x 10 cm² per box e l'angolo di tilt è fissato a circa 30°, tipico per tetti di serre.

Sono stati realizzati 4 pannelli, in questo caso di dimensioni di 34 x 60 cm² con uno spessore di 6mm. I pannelli sono stati incollati per una maggiore tenuta, essendo il box grande e pesante, e all'interno sono stati incollati degli angolari di alluminio per rendere la struttura più stabile. Per la faccia superiore è stata creata una griglia per alloggiare 9 vetri contemporaneamente. Questa è stata realizzata incollando due griglie di dimensioni diverse in modo tale da ottenere uno scalino interno per ogni riquadro su cui posizionare i vetri. Nella Figura 2.1.10 è riportato il progetto della griglia di alloggiamento dei vetri e del goniometro inserito per poter regolare l'angolo di tilt della matrice di vetri, insieme a viste prospettiche del progetto completo e di un prototipo realizzato in plexiglass. Nella Figura 2.1.11 sono inoltre riportate delle foto di prototipi realizzati e forniti a MUSA. Nelle immagini, realizzate durante la sperimentazione, sono montati 9 campioni da 10 x 10 cm² per box e l'angolo di tilt è fissato a circa 30°, tipico per tetti di serre.

2.1.3 Stime delle prestazioni fotovoltaiche

Lo studio delle potenzialità in termini di trasmittanza selettiva delle strutture selezionate, riportato nelle sezioni precedenti, è stato affiancato da indagini rivolte ad ottenere delle prime stime delle prestazioni fotovoltaiche ottenibili dalle celle solari spettralmente selettive in esame, grazie ad ulteriori simulazioni e misure su celle di test.

In particolare, sono state realizzate simulazioni dei multistrati utilizzando il software Genpro4, basato su MATLAB, sviluppato dall'Università di Delft [16]. Il programma consente di trattare i layer della struttura come coerenti o incoerenti a seconda dello spessore e di calcolare gli spettri di assorbimento di luce in ciascun layer, che è un assorbimento parassita per quanto riguarda gli elettrodi e assorbimento utile per il fotovoltaico relativamente al layer di silicio amorfo. Per un confronto pratico, i vari contributi possono poi essere quantificati come densità di corrente equivalente calcolata mediante l'integrale della convoluzione del profilo di assorbimento e dello spettro solare AM1.5g. Questo studio simulativo consente quindi di ottenere una stima delle correnti massime ottenibili da questa tipologia di celle solari oltre che ad informazioni sulla tipologia di perdite ottiche parassite, possibilmente da mitigare adottando opportuni accorgimenti laddove possibile.

In Figura 2.1.12 sono graficati i risultati della simulazione dell'assorbimento degli strati del prototipo con spessori ottimizzati utilizzando l'Arabidopsis come target, e quindi glass/AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/Ag(12 nm)/AZO(330 nm)/Ag(12 nm)/AZO(100 nm).

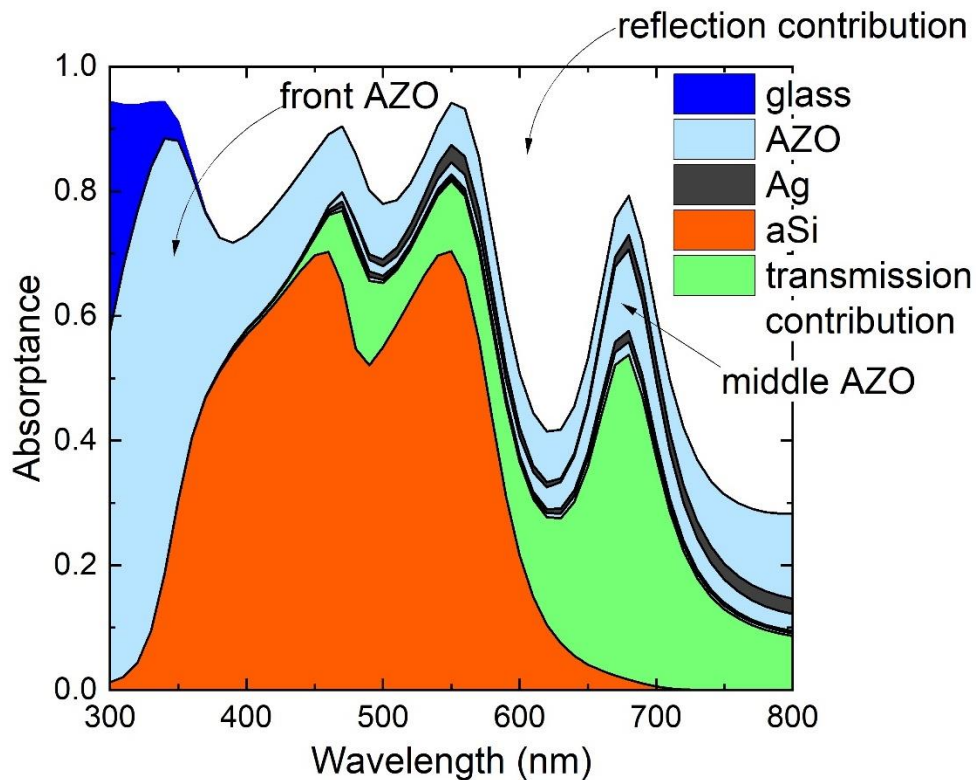


Figura 2.1.12. Assorbimento calcolato nel range 300 – 800 nm per gli strati del prototipo con spessori ottimizzati per Arabidopsis: glass/AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/Ag(12 nm)/AZO(330 nm)/Ag(12 nm)/AZO(100 nm). Le aree nei colori blu, azzurro, arancio e grigio consentono di visualizzare il contributo di luce assorbita dai vari strati in legenda, mentre le aree in bianco e in verde corrispondono rispettivamente ai contributi di luce riflessa e di luce trasmessa.

I profili di assorbimento calcolati sono qui riportati in forma di “stacked area chart”, o grafico ad area in pila, dove le aree nei vari colori consentono una visualizzazione immediata del contributo di luce assorbita dai vari strati nel range 300 – 800 nm, nonché di luce riflessa e di luce trasmessa. In particolare il profilo spettrale di assorbimento del film di silicio amorfo in figura coincide con lo spettro di efficienza quantica esterna (EQE) atteso per la cella solare in assenza di perdite di tipo elettrico (per il momento, inoltre, stiamo trascurando i

contributi da parte dei film drogati di silicio necessari nella cella solare per raccogliere selettivamente elettroni e lacune sulle due facce).

I contributi sono quantificati nel grafico a istogrammi in figura 2.1.13 come densità di corrente equivalente, calcolata nel range 300 – 800 nm. Sono riportati i valori relativi allo stack glass/AZO/a-Si:H/Ag/AZO/Ag/AZO di figura 2.1.13 (box senza tratteggi) e quelli della stessa struttura con l'aggiunta sul vetro di uno strato antiriflesso di 100 nm (box con pattern tratteggiati). Il valore ottenuto per il silicio amorfo è la densità di corrente di corto circuito massima ottenibile dalla cella solare, mentre tutti gli altri contributi sono perdite parassite rispetto all'applicazione fotovoltaica. Ovviamente, per l'applicazione integrata complementare fotovoltaico/fotosintesi in studio, un contributo rilevante di luce trasmessa (nel range spettrale selezionato) è invece desiderato.

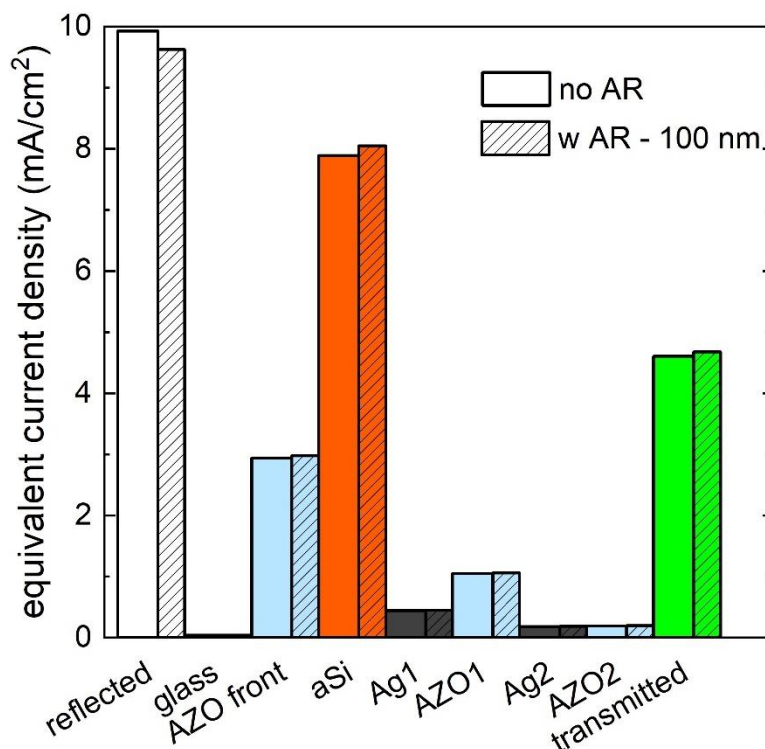


Figura 2.1.13. Contributi calcolati di luce assorbita, riflessa e trasmessa nel range 300 – 800 nm, quantificati come densità di corrente equivalente, relativi alla figura 2.1.12 (box larghi senza pattern) e alla stessa struttura con l'aggiunta sul vetro di uno strato antiriflesso di 100 nm (box stretti con pattern tratteggiati).

Si osserva che è presente una notevole frazione di luce riflessa, in buona parte dovuta alla necessità di lavorare con superfici flat, quindi in assenza di intrappolamento della radiazione, per sfruttare il concetto di riflettore tipo Fabry-Perot. E' inoltre necessario utilizzare un film di silicio molto sottile ed elettrodi entrambi trasparenti per consentire una sufficiente trasmissione. Entrambi questi aspetti comportano necessariamente delle correnti J_{SC} ridotte rispetto a celle solari opache convenzionali in silicio amorfo [17]. Tra gli strati di supporto che mostrano maggiore perdita per assorbimento parassita c'è sicuramente lo strato frontale di AZO. La sostituzione di questo materiale con ITO consentirebbe una notevole riduzione di tali perdite, a vantaggio di un incremento dell'assorbimento da parte del silicio e quindi del valore atteso di J_{SC} . Ciò è illustrato in figura 2.1.14, dove sono riportati gli spettri simulati di grandezze misurabili sperimentalmente, e cioè riflettanza (mostrata come $1-R$), trasmittanza e assorbimento da parte del silicio (corrispondente ad EQE in caso di assenza di perdite di tipo elettrico) per glass/AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/Ag(12 nm)/AZO(330 nm)/Ag(12 nm)/AZO(100 nm) e per la stessa struttura con ITO(180 nm) in luogo del film di AZO frontale dello stesso spessore. È evidente che la sostituzione di AZO con ITO comporta una forte riduzione delle perdite parassite sul front del dispositivo con un potenziale incremento della EQE della cella, corrispondente ad un aumento atteso della densità di corrente J_{SC} massima da 7.9 a 8.6 mA/cm². Allo stesso

tempo la sostituzione non ha effetti rilevanti sulla trasmittanza e può essere quindi adottata senza ripercussioni e senza necessità di dover riottimizzare gli spessori degli strati.

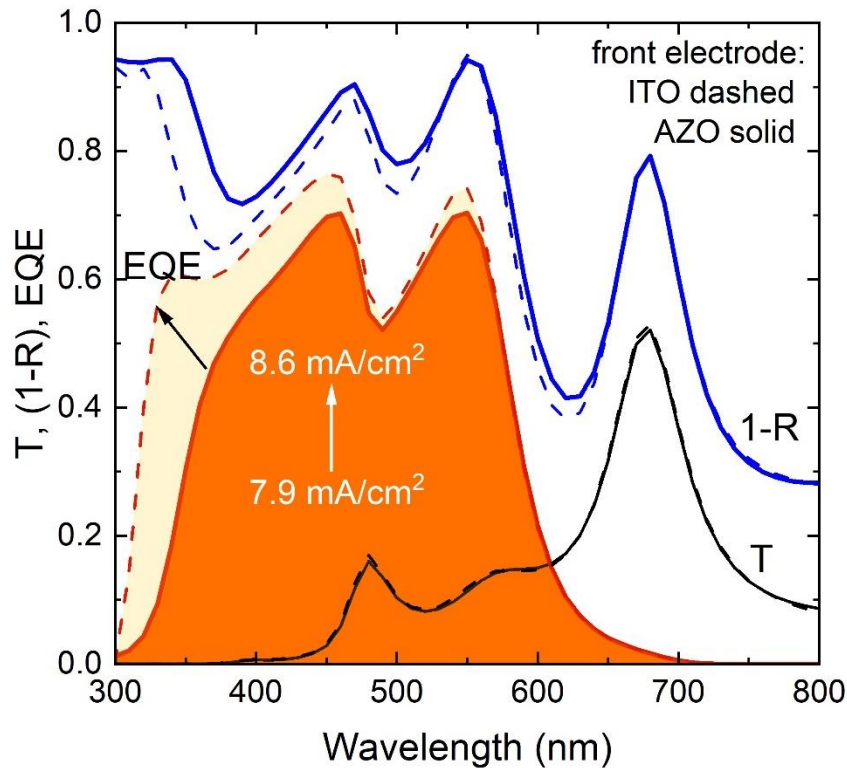


Figura 2.1.14. Spettri simulati di riflettanza (mostrata come 1-R), trasmittanza e assorbimento da parte del silicio (corrispondente ad EQE in caso di assenza di perdite di tipo elettrico) per glass/AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/Ag(12 nm)/AZO(330 nm)/Ag(12 nm)/AZO(100 nm) (curve continue) e per la stessa struttura con ITO(180 nm) in luogo del film di AZO frontale dello stesso spessore.

Fin qui sono stati considerati aspetti puramente ottici e quindi si è assunto uno schema semplificato di cella solare con un unico strato di silicio amorfo (l'assorbitore di fotoni da trasformare in cariche elettriche) interposto tra due elettrodi. Non sono stati invece considerati gli strati di supporto necessari alla separazione delle cariche fotogenerate nell'assorbitore, posizionati alle due interfacce silicio/elettrodo. Questi sono costituiti da film a base di silicio drogati tipo p e tipo n (rispettivamente per la raccolta di lacune e di elettroni) che tipicamente differiscono poco dal materiale assorbitore intrinseco da un punto di vista ottico, con spessori di circa 7 nm nel primo caso e fino a circa 20 nm nell'altro. Lo spessore del film di a-Si:H fin qui menzionato va quindi considerato come uno spessore efficace che include anche i contributi degli strati drogati in quella che in celle elettricamente funzionanti è una struttura p-i-n (o n-i-p) in silicio. Nel funzionamento della cella solare va però tenuto conto che solo lo strato di silicio intrinseco è attivo nella generazione di corrente in quanto gli strati drogati sono ricchi di difetti e le cariche fotogenerate in tali strati vanno incontro a ricombinazione e intrappolamento. Ciò comporta che le correnti valutate da simulazione rappresentano delle stime per eccesso delle correnti effettive.

Si può comunque proporre per il futuro l'esplorazione di un approccio innovativo con l'introduzione di contatti selettivi alternativi per la cella a film sottile, analogamente a quanto si sta sperimentando per le celle ad eterogiunzione di silicio a livello internazionale ed anche nell'ambito del presente progetto, o anche per celle polimeriche, utilizzando ad esempio ossidi di metalli di transizione e/o fluoruri. Con strati di materiali altamente trasparenti quali MoO_x , per la raccolta di lacune, e LiF, per la raccolta di elettroni, da utilizzare con spessori di qualche nanometro, sarebbe in linea di principio possibile sfruttare totalmente la luce assorbita dallo strato di silicio amorfo e i valori calcolati di J_{sc} sarebbero realizzabili.

Si è partiti con la fabbricazione di celle solari da testare anche elettricamente e quindi complete dei trasportatori di carica. La messa a punto di dispositivi efficienti con la configurazione innovativa qui proposta richiede ovviamente numerose prove sperimentali che saranno portate avanti in futuro. In questa fase sono state realizzate le prime celle di test opache (con elettrodo posteriore in argento) di area attiva pari a 1 cm^2 con silicio amorfo sottile e collettori di carica p-aSi:H di 7 nm e n-SiO_x di 20 nm. Oltre ad essere propedeutica alla realizzazione di prototipi completi di celle selettive, funzionanti anche elettricamente, questa fase preliminare consente di ottenere delle stime delle performance fotovoltaiche da confrontare con altre tecnologie in studio in letteratura, come le celle spettralmente selettive in germanio amorfo ultrasottile, anche per una validazione dell'approccio.

I parametri elettrici V_{oc} e FF, ossia tensione di circuito aperto e fill factor, ottenuti in prove ripetute su celle opache con diversi elettrodi frontali sono riassunti sinteticamente in Tabella 2.1.1. Le correnti misurate non sono invece rilevanti per la presente valutazione date le strutture di cella differenti che consentono una maggiore raccolta e quindi correnti più elevate. Per effettuare stime ragionevoli, per il parametro J_{sc} si è quindi utilizzato il valore ottenuto da simulazione. In particolare, per una valutazione delle potenzialità dell'approccio, si è utilizzato il valore più alto ottenuto da simulazione. I parametri fotovoltaici sono riportati in Tabella 2.1.1, insieme a valori pubblicati recentemente per celle spettralmente selettive con assorbitori in germanio amorfo [7].

Tabella 2.1.1. Stima della potenza per unità di area (punto di massima potenza, MPP) ottenibile da celle solari spettralmente selettive in silicio amorfo (prima riga) in base al presente studio e in germanio amorfo (seconda riga) da recenti studi pubblicati [7]. Per il silicio, sono stati utilizzati i valori misurati sperimentalmente per V_{oc} e FF per celle sottili opache e il valore di corrente calcolato da simulazione ottica.

Cell type	J_{sc} simulated (mA/cm ²)	J_{sc} measured (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	Output Power density (MPP) (W/m ²)
a-Si:H	8.6	-	817 - 848	~68	~48 - 50
a-Ge:H	-	10.5	458 - 467	~50	~24

In principio, le celle solari in germanio amorfo hanno il vantaggio di una risposta spettrale che si estende fino a oltre 1000 nm rispetto al silicio amorfo che risponde invece fino a 800 nm. Le celle in germanio consentono quindi di sfruttare meglio la luce solare per fotovoltaico e fotosintesi, utilizzandone un range più ampio. Ciò comporta anche delle correnti massime (in assenza di problemi di raccolta elettrica) più elevate di quelle possibili con le celle in silicio. Di contro, a gap più alta (silicio amorfo) corrisponde V_{oc} maggiore e, come si può osservare dalla tabella, globalmente con la tecnologia al silicio sono attese potenze di output più elevate a parità di area. Gli studi sulle celle selettive in germanio hanno mostrato tra l'altro un'assenza di influenza della tipologia di elettrodo posteriore sulla V_{oc} e solo lievi effetti sul FF che, in quel caso, si mostra piuttosto basso anche per le celle di riferimento opache (~50%), data la tecnologia ancora in fase di sviluppo. Ci si può attendere quindi che con la tecnologia al silicio, già matura, siano raggiungibili i valori di V_{oc} e FF delle celle solari record in silicio amorfo (896 mV e ~70%) [17], per una potenza massima quantificabile in ~54 W/m². A ciò si aggiunge che la soluzione proposta a base di silicio può contare su una tecnologia di produzione ben consolidata anche a livello industriale e quindi su un percorso già in parte tracciato verso l'applicazione a larga scala.

2.2 Sperimentazione su larga scala

Su larga area le attività riguardano la messa a punto del design per una copertura FV di circa 110 m² di una serra storica. Si è previsto di utilizzare le più innovative tecnologie dei vetri fotovoltaici, che consentono di utilizzare textures personalizzate sul lato esterno dei moduli fotovoltaici in modo da ottenere pattern decorativi desiderati. L'attività include anche la valutazione delle soluzioni più opportune ai fini di un eventuale ed ulteriore scale-up del sistema.

La serra alla quale si fa riferimento è collocata in un contesto di particolare pregio paesaggistico e storico, e cioè il giardino della Reggia di Portici, che ospita il Museo delle Scienze Agrarie (MUSA). All'inizio del progetto la serra era in stato di obsolescenza (figura 2.2.1), e in accordo con il MUSA si è deciso di sviluppare un progetto di restauro che prevedesse il consolidamento della struttura esistente e la sostituzione dei vetri esistenti in corrispondenza della falda sud con dei vetri fotovoltaici.



Figura 2.2.1. La serra oggetto dell'intervento prima dei lavori: dettaglio della falda sud.

Sono quindi stati sviluppati dei componenti vetrati fotovoltaici per l'inserimento nella copertura, con lo scopo di sostituire in fase di ristrutturazione i vetri esistenti con dei vetri fotovoltaici.

La premessa per il disegno di tali componenti è stata da una parte la necessità di conseguire un risultato visivo che si inserisse armoniosamente nel contesto di pregio in cui il manufatto architettonico si inserisce [18], dall'altra la necessità di garantire un grado di trasparenza minimo al componente vetrato in maniera da essere adatto alla crescita delle piante all'interno dell'involucro vetrato [3].

Considerazioni in merito alle possibilità offerte dalla tecnologia dei vetri fotovoltaici in termini di flessibilità del design sono state raccolte nel Report [15], e queste hanno costituito il punto di partenza per la messa a punto dei requisiti e delle prestazioni che i componenti vetrati della serra dovevano soddisfare.

Più nello specifico il disegno dei moduli fotovoltaici si è attenuto a due principi: il primo era non superare un'opacità del componente di circa il 30%, per consentire comunque un buon funzionamento della serra (dati di letteratura), e l'altro riuscire nella messa a punto di un design che potesse essere lo strumento di accettazione dell'innovazione introdotta dal fotovoltaico in un contesto tradizionale. Dunque, conseguire un'immagine "familiare" per gli utenti che dovranno "accettare" l'immagine innovativa dell'involucro vetrato che consegue all'uso di questa tecnologia (passaggio da una superficie vetrata trasparente ad una superficie fortemente connotata da un pattern geometrico modulare).

Considerato che l'interno della serra è caratterizzato dalla presenza di vegetazione arborea, si è pensato che all'esterno il pattern della copertura dovesse integrarsi nell'esistente presentando una varietà della superficie che consentisse di armonizzare l'aspetto artificiale del vetro fotovoltaico (caratterizzato in genere da una griglia ortogonale composta da celle quadrate di colore blu) con l'aspetto organico della vegetazione. Inoltre, essendo la serra vissuta dall'interno, si è pensato che il pattern dovesse anche "mediare" il passaggio della radiazione luminosa attraverso la copertura, riuscendo in un controllo appropriato della radiazione solare.

Sulla base di esperienze precedenti maturate in ENEA (brevetto Boogie-Woogie) [19, 20], nel disegno del vetro fotovoltaico si è fatto ricorso alla cosiddetta "pixellation", e cioè il processo grafico di generazione di una superficie architettonica che passa attraverso la scansione di una certa immagine, la sua lettura in termini di pixel e la trasformazione della mappa ottenuta in trama della superficie architettonica. Nelle immagini seguenti (fig. 2.2.2, sinistra e destra) si mostrano alcuni grafici relativi ad un processo di questo tipo. Il riferimento è ad un progetto di Herzog e de Meuron per il New De Young Museum di Golden Gate Park (San Francisco); un dettaglio relativo ad una fotografia di chiome di alberi viene ingrandito e scomposto in pixel, successivamente viene invertita la scala di grigi per ottenere zone più o meno dense. L'immagine di fig. 2.2.2 a destra mostra la trasposizione dell'immagine grafica in superficie architettonica.

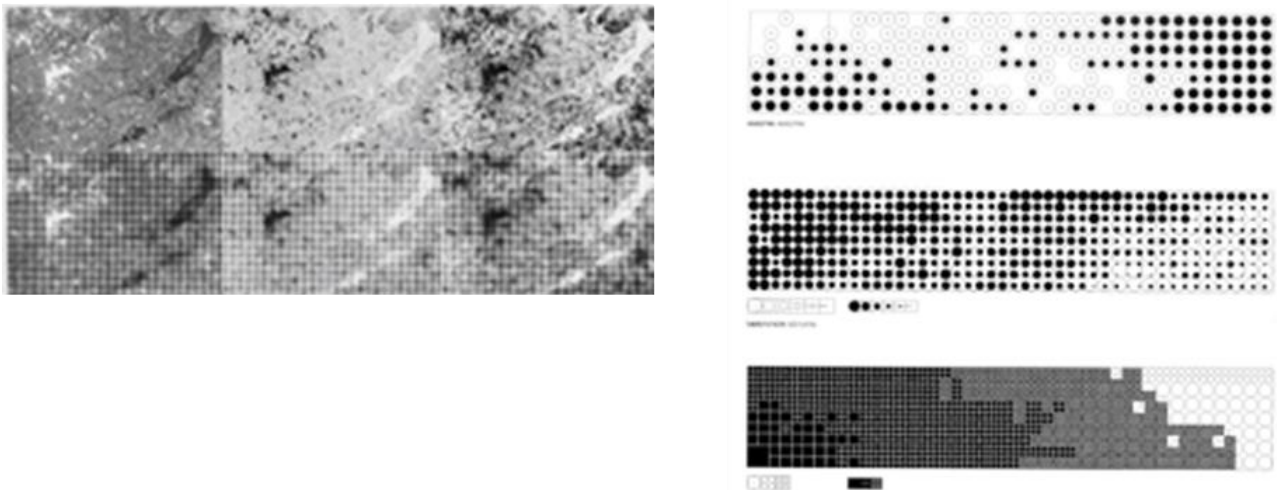


Figura 2.2.2. New De Young Museum di Golden Gate Park (San Francisco, US, Design Herzog e de Meuron, 2005): il processo di pixellation adottato per la facciata, che traduce il pattern dato dalla chioma di alberi in una superficie decorativa per la facciata.

Si è dunque pensato di concepire il lato esterno del vetro fotovoltaico in maniera che mostrasse un pattern decorativo, che si inserisse nella trama di luci ed ombre generata dalle chiome degli alberi. La stratificazione del vetro fotovoltaico è mostrata in figura 2.2.3, mentre l'immagine di riferimento è mostrata in figura 2.2.4. Successivamente all'individuazione dell'immagine di partenza è stato necessario procedere ad un trattamento grafico che consentisse di trasporre l'immagine in un pattern decorativo astratto, come mostrato in figura 2.2.5.

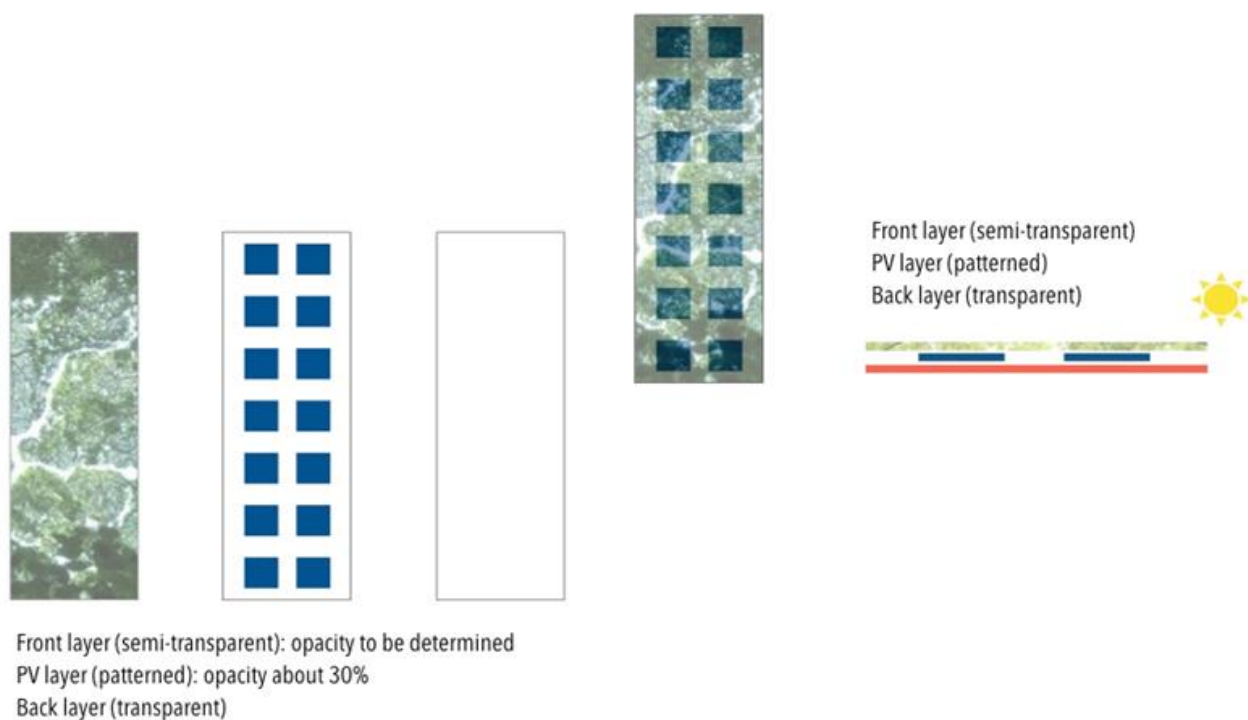


Figura 2.2.3. Il vetro fotovoltaico (delle dimensioni e forma del modulo fotovoltaico della falda sud esistente) è stato concepito in maniera da assicurare il 30% di opacità e da mostrare verso l'esterno un layer decorato.

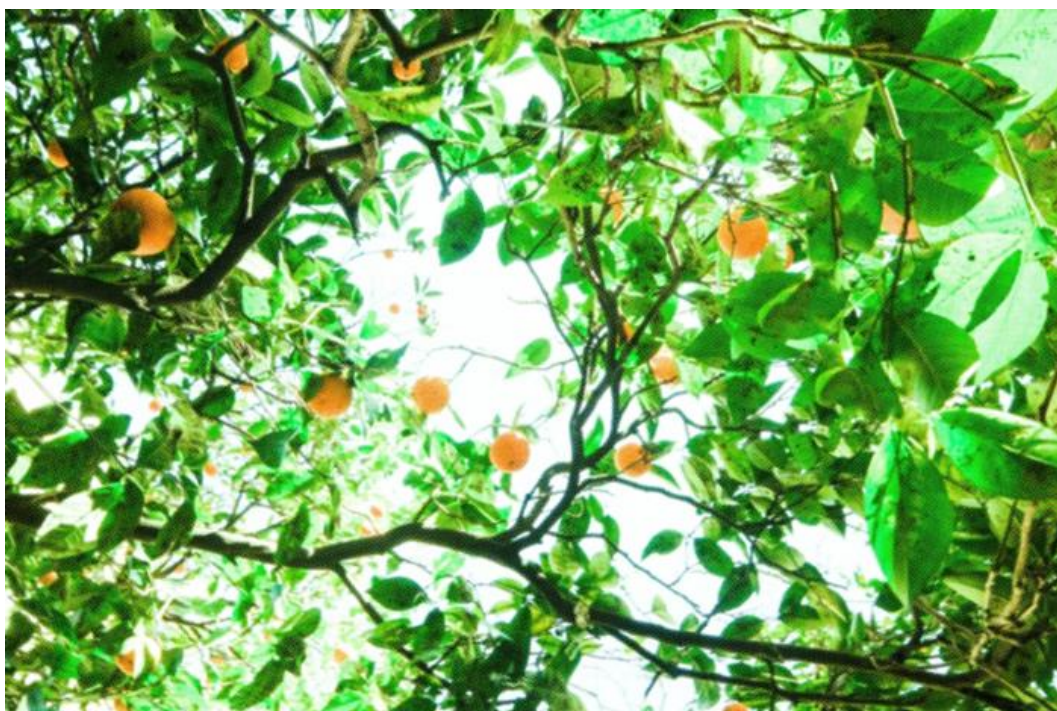


Figura 2.2.4. L'immagine di riferimento per la messa a punto dello strato decorativo esterno del vetro fotovoltaico (foto: Mario Laporta, courtesy).



Figura 2.2.5. L'immagine di riferimento trasformata in una superficie pixellata, input per la stampa su vetro esterno del modulo fotovoltaico (elaborazione Giovanna Grauso, courtesy).

L'immagine è stata dimensionata tenendo conto delle dimensioni degli elementi da realizzare, ed è stata scomposta in 5 moduli rettangolari delle dimensioni dei moduli vetrati da sostituire: nello specifico la copertura della falda sud è costituita da 6 moduli scomponibili ciascuno in 5 sottomoduli delle dimensioni di circa 0.6 m x 1.5 m (figura 2.2.6). In tal modo, la realizzazione di soli 5 componenti diversi offre la possibilità di conseguire una buona variabilità dell'immagine della copertura (scale up).



Portici
40°49' N; 14°20' E

Dimensioni della copertura: 538*1932 (circa 103m²)

Azimuth: -46°

Tilt: 20°

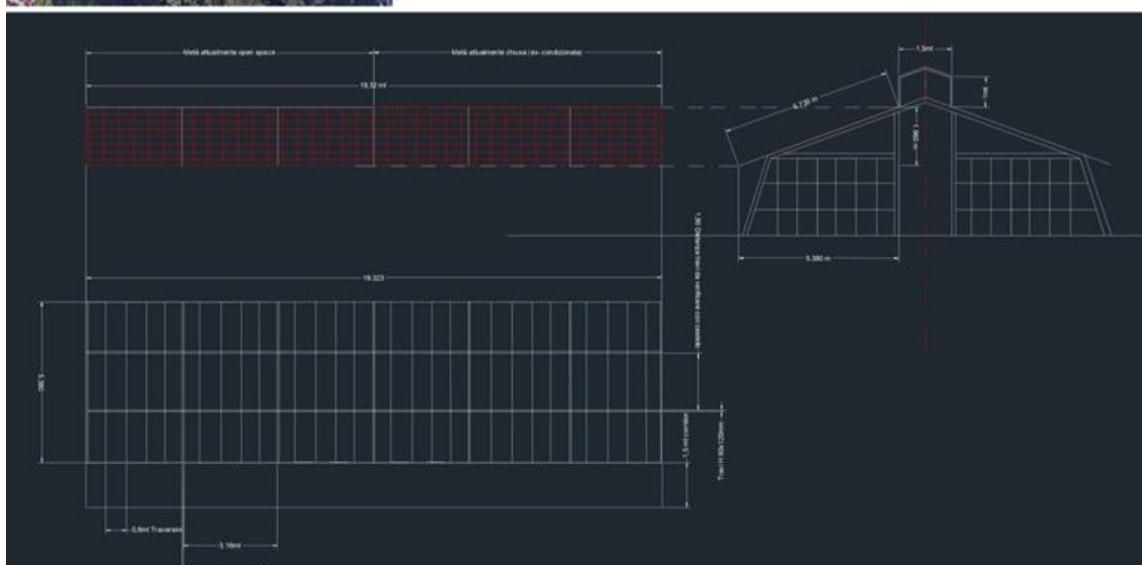


Figura 2.2.6. Rappresentazione schematica della falda oggetto dell'intervento (rettangolo arancione) e sua localizzazione nel contesto. La falda è caratterizzata da azimuth di -46° e tilt di 20° e si compone di 6 moduli, ciascuno scomponibile in 5 sottomoduli da 0.6 m x 1.5 m.

A partire da queste prime indicazioni progettuali è stata condotta una ricerca sulle ditte che potessero produrre vetri fotovoltaici disegnati su misura, e per i quali fosse possibile definire sia il fattore di trasparenza che l'aspetto del vetro esterno. Tra le varie ditte è stata selezionata SunAge, la quale possiede un processo di produzione (Suncol) che consente di stampare lo strato esterno del vetro a getto di inchiostro a partire da un dato disegno [21].

Sulla base delle indicazioni e del disegno rivenuti, SunAge ha sperimentato diversi pattern, in maniera che l'efficienza del vetro fotovoltaico (con celle in silicio cristallino) non fosse penalizzata oltre un valore ritenuto accettabile dal produttore, e ne ha poi scelto uno, realizzato con inchiostro blu (figura 2.2.7).



Figura 2.2.7. Il vetro fotovoltaico definitivo con il pattern realizzato da SunAge.

Sono quindi stati fatti realizzare i moduli necessari, seguendo la sperimentazione della ditta fornitrice fino alla fase di completamento dell'opera. Le immagini a seguire mostrano l'intervento realizzato, in particolare con una vista dall'esterno (figura 2.2.8) ed una vista dall'interno (figura 2.2.9).



Figura 2.2.8. L'esterno della falda fotovoltaica.



Figura 2.2.9. La falda realizzata vista dall'interno.

3 Conclusioni

Nella presente annualità è stata condotta un'attività di ricerca sull'utilizzo del fotovoltaico nelle serre a diverse scale realizzative. Su scala di laboratorio, è stato approfondito lo studio avviato nell'annualità precedente di un approccio tecnologico innovativo che mira all'uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi, grazie a celle semitrasparenti in silicio amorfo con riflettore posteriore spettralmente selettivo a multistrato metallo/ossido/metallo/ossido. Le strutture complete studiate sono costituite dalla sequenza di strati AZO/aSi:H/Ag/AZO/Ag/AZO su vetro con spessori fissati opportunamente per trasmettere le finestre spettrali stabilite. Tramite simulazioni ottiche, è stata studiata la possibilità di adattare il design per un uso con diverse tipologie di piante, utilizzando come riferimento la clorofilla tipo a e tipo b, tra i pigmenti più comuni. Lo studio ha consentito di fornire informazioni pratiche immediate per la realizzazione dei prototipi, tra cui una curva di taratura per la posizione del picco di trasmittanza principale in funzione dello spessore di uno dei layer del multistrato e indicazioni sullo spessore di un eventuale antiriflesso sulla faccia frontale del vetro. Sperimentalmente, si è studiata la performance angolare delle strutture, da cui è risultata una buona resilienza per angoli di incidenza della luce fino a circa 40° rispetto alla normale alla superficie dei film. Infine sono state fatte delle prime valutazioni di performance fotovoltaica, stimando una densità di potenza massima di 54 W/m², ben più alta di recenti stime pubblicate per implementazioni in germanio amorfo. L'approccio è dunque promettente, anche in considerazione del fatto che, in una prospettiva di applicazione a larga scala, può contare su una tecnologia di produzione industriale già ben consolidata.

Su scala grande l'attività ha avuto ad oggetto la progettazione di una copertura vetrata per una serra storica, in sostituzione di una esistente, in cui 110 m² sono stati destinati all'impiego del fotovoltaico. Nello specifico sono stati progettati dei moduli fotovoltaici in silicio cristallino delle dimensioni di 60 cm x 150 cm, da impiegare come unità base della copertura. Questi sono stati raggruppati in 6 famiglie da 5 moduli e disegnati in modo che i moduli messi insieme potessero proporre un motivo decorativo ad una scala adeguata a quella dell'intervento. Dato il contesto, il motivo decorativo è stato messo a punto a partire dall'immagine delle chiome degli alberi, ed è stato perfezionato tramite processi grafici ed interazioni con la ditta fornitrice (SunAge). Si è poi seguita la sperimentazione della ditta fino alla fase di realizzazione dell'opera. L'approccio modulare adottato consente anche di scalare il progetto ad una scala più ampia.

4 Bibliografia

- [1] A. Yano and M. Cossu, "Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, pp. 116-137, 2019.
- [2] A. Scognamiglio, L. V. Mercaldo, M. Della Noce, M. Ferrara, P. Delli Veneri, C. Toledo Arias, F. Carteni, F. Giannino, M. Zotti, N. Salvatori and S. Mazzoleni, "Re-Uniting Photosynthesis and Photovoltaics: Design for Architectural Greenhouses," *Proceedings 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 1972 - 1974, 2020.
- [3] C. Toledo Arias and A. Scognamiglio, "Agrivoltaic systems design and assessment: a critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (tridimensional agrivoltaic patterns)," *Sustainability*, vol. 13, p. 6871, 2021.
- [4] E. Ravishankar, M. Charles, Y. Xiong, R. Henry, J. Swift, J. Rech, J. Calero, S. Cho, R. E. Booth, T. Kim, A. H. Balzer, Y. Qin, C. H. Y. Ho, F. So, N. Stingelin, A. Amassian, C. Saravitz, W. You, H. Ade, H. Sederoff and B. T. O'Connor, "Balancing crop production and energy harvesting in organic solar-powered greenhouses," *Cell Reports Physical Science*, vol. 2, pp. 100381 (1-32), 2021.
- [5] D. Wang et al, "High-performance and eco-friendly semitransparent organic solar cells for greenhouse applications," *Joule*, vol. 5, pp. 945-957, 2021.

- [6] M. Götz, N. Osterthun, K. Gehrke, M. Vehse and C. Agert, "Ultrathin Nano-Absorbers in Photovoltaics: Prospects and Innovative Applications," *Coatings*, vol. 10, pp. 218 (1-16), 2020.
- [7] N. Osterthun, N. Neugebohrn, K. Gehrke, M. Vehse and C. Agert, "Spectral engineering of ultrathin germanium solar cells for combined photovoltaic and photosynthesis," *Optics Express*, vol. 29, p. 938, 2021.
- [8] L. Mercaldo, I. Usatii, E. Esposito, P. Delli Veneri, J.-W. Schütttauf, E. Moulin, F.-J. Haug, C. Zhang and M. Meier, "Metal versus dielectric back reflector for thin-film Si solar cells with impact of front electrode surface texture," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 24, p. 968–977, 2016.
- [9] C. Mennucci, C. Martella, L. Mercaldo, I. Usatii, P. Delli Veneri and F. B. d. Mongeot, "Self-Organized Nanoscale Roughness Engineering for Broadband Light Trapping in Thin Film Solar Cells," *Applied Sciences*, vol. 7, p. 355, 2017.
- [10] L. Mercaldo, E. Bobeico, I. Usatii, M. Della Noce, L. Lancellotti, L. Serenelli, M. Izzi, M. Tucci and P. Delli Veneri, "Potentials of mixed-phase doped layers in p-type Si heterojunction solar cells with ZnO:Al," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 169, pp. 113-121, 2017.
- [11] L. Clementson and B. Wojtasiewicz, "Dataset on the absorption characteristics of extracted phytoplankton pigments," *Data in brief*, vol. 24, pp. 103875 (1-7), 2019.
- [12] G. Torrisi, I. Crupi, S. Mirabella and A. Terrasi, "Robustness and electrical reliability of AZO/Ag/AZO thin film after bending stress," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 165, p. 88–93, 2017.
- [13] J. W. Lim, G. Kim, M. Shin and S. J. Yun, "Colored a-Si:H transparent solar cells employing ultrathin transparent multi-layered electrodes," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 163, p. 164–169, 2017.
- [14] <https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/support-and-infrastructure/software/data-analysis/OurSoftware/xop2.4/extensions.html>.
- [15] L. Mercaldo, A. Scognamiglio, A. Citarella, M. Della Noce, M. Ferrara, C. Toledo and P. Delli Veneri, "Sviluppo di multistrati a film sottile e progettazione di sistemi fotovoltaici (vetri e coperture) per involucri semitrasparenti," *Report RdS_PTR_2020_236*.
- [16] R. Santbergen, T. Meguro, T. Suezaki, G. Koizumi, K. Yamamoto and M. Zeman, "GenPro4 Optical Model for Solar Cell Simulation and Its Application to Multijunction Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, pp. 919-926, 2017.
- [17] M. Green et al, "Solar cell efficiency tables (version 59)," *Progress in Photovoltaics*, vol. 30, p. 3–12, 2022.
- [18] A. Scognamiglio, "A Trans-Disciplinary Vocabulary for Assessing the Visual Performance of BIPV," *Sustainability*, vol. 13, no. 10, p. 5500, 2021.
- [19] "Boogie-Woogie (innovative photovoltaic glass module with graphic effects)". Patent RM2005A000060, 2005.
- [20] A. Scognamiglio, G. Graditi, F. Pascarella and C. Privato, "Boogie-Woogie, a photovoltaic glass-glass module "dancing" with the building," *Proc. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden (Germany)*, pp. 2853-2856, 2006.
- [21] <http://www.suncoldesign.com>.