



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di multistrati a film sottile e progettazione di sistemi fotovoltaici (vetri e coperture) per involucri semitrasparenti

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

SVILUPPO DI MULTISTRATI A FILM SOTTILE E PROGETTAZIONE DI SISTEMI FOTOVOLTAICI (VETRI E COPERTURE)
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)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.1 Fotovoltaico ad alta efficienza

Work package: Fotovoltaico Piano

Linea di attività: LA2.16 BIPV: Sviluppo di multistrati a film sottile e progettazione di sistemi fotovoltaici (vetri e coperture) 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.....	6
2.1 ATTIVITÀ DI RICERCA SU MEDIA SCALA.....	6
2.1.1 <i>Fotovoltaico e serre</i>	6
2.1.2 <i>Ricerca dei componenti fotovoltaici per sperimentazione in serra</i>	10
2.1.3 <i>Progetto della serra di media scala</i>	11
2.2 SPERIMENTAZIONE SU PICCOLA SCALA	15
2.2.1 <i>Descrizione del concetto e caratterizzazione ottica dei materiali selezionati</i>	15
2.2.2 <i>Progettazione di celle solari spettralmente selettive a film sottile di silicio</i>	18
2.2.3 <i>Fabbricazione e caratterizzazione di campioni</i>	21
3 CONCLUSIONI.....	25
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	26

Sommario

In questo report sono descritte le attività rivolte allo studio del funzionamento sinergico del sistema fotovoltaico-pianta, condotte nel corso della seconda annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (linea LA2.16) in stretta interazione con la linea LA2.18 svolta dal Centro Museale “Musei delle Scienze Agrarie – MUSA” dell’Università “Federico II” di Napoli.

Il lavoro è stato portato avanti su scala media e su scala piccola. Su media scala è stato compiuto uno studio sulle caratteristiche funzionali, tecnologiche e morfologiche delle serre, e sui possibili impieghi del fotovoltaico in combinazione con le principali soluzioni di involucro esistenti. A valle di una ricerca di mercato sui principali moduli fotovoltaici adatti all’impiego in combinazione con la crescita di specie vegetali, si è scelto un componente innovativo a micro-inseguimento specificamente sviluppato per finalità cosiddette “agrivoltaiche”. Si è stipulato un accordo di collaborazione e ricerca con la ditta che lo produce (Insolight, prototipi ancora non commerciali) e si è proceduto al progetto di una serra di medie dimensioni (dimensioni in pianta di 6m x 3m), il cui disegno è stato poi fornito a MUSA che ne cura la realizzazione e il funzionamento. In parallelo, su piccola scala (scala di laboratorio, con area massima di 10x10 cm²), è stato esplorato un approccio che mira all’uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi, facendo ricorso alla tecnologia fotovoltaica a film sottile. Nei laboratori ENEA sono stati progettati, fabbricati e caratterizzati dei precursori di moduli fotovoltaici semitrasparenti in grado di trasmettere opportuni intervalli dello spettro solare. Un set di campioni è stato fornito al MUSA per le sperimentazioni della linea LA2.18.

1 Introduzione

In questa ricerca è indagato l'impiego del fotovoltaico negli involucri trasparenti in relazione alle serre, 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 sia su scala di laboratorio, con realizzazione e studio di pseudo-moduli semitrasparenti di $10 \times 10 \text{ cm}^2$, che su scala media, con la progettazione di una serra fotovoltaica prototipale di dimensioni totali in pianta di $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$. È poi previsto nell'annualità seguente di estendere l'attività anche su larga scala con la progettazione di una copertura di circa 100 m^2 per una serra storica presso i giardini della Reggia borbonica di Portici (NA), sede del dipartimento di Agraria e di MUSA.

La definizione di "serra" copre una vasta gamma di possibilità tecnologiche e funzionali, che vanno dalle serre di pregio realizzate con involucri in vetro, fino alle più modeste realizzazioni in plastica, talvolta adibite anche ad usi temporanei. Il filo comune di queste tipologie è costituito dal fatto che l'involucro della serra sia trasparente e sia cioè in grado di captare e trattenere all'interno dell'involucro la radiazione solare. Il possibile impiego di moduli fotovoltaici in sostituzione dei tradizionali materiali di copertura delle serre comporta una verifica in merito alla capacità dell'involucro di trasmettere la radiazione solare in modalità adeguate a favorire il processo fotosintetico delle piante che vi sono coltivate [1].

Dal punto di vista delle tecnologie fotovoltaiche, l'approccio più consolidato fa ricorso all'uso di moduli basati su celle solari in silicio cristallino. Trattandosi di celle opache, le implementazioni comportano la necessità di lasciare degli "spazi scoperti", nel senso di non occupati da celle in silicio, 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 sviluppo a livello di prodotti innovativi e di progettazione di impianti integrati dove si vada ad ottimizzare la produzione di energia elettrica e/o la resa colturale.

Oltre a queste modalità, sono in corso studi di fattibilità di approcci alternativi basati su tecnologie fotovoltaiche che consentano un uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi grazie a moduli fotovoltaici semitrasparenti spettralmente selettivi con trasmittanza adattata allo spettro di assorbimento delle piante. In questo caso, almeno in linea di principio, è possibile sfruttare l'intera superficie della copertura della serra, senza dover necessariamente lasciare degli spazi scoperti per il passaggio della luce. Il concetto di base è che le piante assorbono essenzialmente piccole porzioni dello spettro solare (tipicamente nel blu e nel rosso) per la fotosintesi, per cui la parte restante dello spettro (verde e infrarosso) può essere dedicata all'applicazione fotovoltaica.

Tra le possibili realizzazioni tecnologiche troviamo i concentratori solari luminescenti, con celle solari ancora di tipo opaco poste sui bordi di lastre semitrasparenti contenenti coloranti luminescenti [2]. Inoltre, le celle solari organiche sono di particolare interesse per la caratteristica intrinseca di poter adattare entro certi limiti lo spettro di assorbimento del materiale attivo rispetto alle necessità delle piante per un uso complementare della radiazione solare, come mostrato in un recente studio dell'Università della North Carolina in USA [3]. Alternativamente, sempre nell'ambito della tecnologia fotovoltaica a film sottile, si sta valutando la possibilità di procedere con materiali assorbitori a film sottile che non abbiano essi stessi un coefficiente di assorbimento adattato alle piante (anche materiali inorganici quindi) ottenendo invece la selettività spettrale grazie all'applicazione di un contatto/riflettore posteriore semitrasparente nella forma di multistrato opportunamente ingegnerizzato. In questo caso la selettività spettrale può essere adattata variando semplicemente lo spessore di alcuni film sottili senza impatto sulle proprietà optoelettroniche del materiale attivo. In questo ambito è da segnalare l'approccio del gruppo tedesco del DLR Institute of Networked Energy Systems a Oldenburg, che ha proposto l'uso di celle solari spettralmente selettive a base di germanio amorfo (a-Ge) ultrasottile [4].

In questa annualità nei laboratori ENEA è stata esplorata similmente un'implementazione che utilizza il silicio amorfo (a-Si:H), già in uso nei laboratori per applicazioni sia nel fotovoltaico a film sottile di Si [5] [6] che per celle solari ad eterogiunzione di silicio [7]. Rispetto all'a-Ge, l'a-Si:H consente di puntare a valori più elevati di tensione di circuito aperto (V_{oc}) e soprattutto può contare su una tecnologia di produzione ben consolidata anche a livello industriale. Con il supporto di simulazioni ottiche è stato progettato e studiato da un punto di vista ottico il multistrato costituente il precursore di un modulo fotovoltaico spettralmente selettivo a base di silicio amorfo. Sono stati quindi realizzati e caratterizzati vari prototipi su scala di laboratorio, con area

massima di 10x10 cm², poi forniti al MUSA per poter valutare mediante studi di crescita di piante la fattibilità dell'applicazione combinata integrata fotovoltaico/fotosintesi.

Parallelamente, sono stati condotti studi relativi alla media scala, rivolti alla realizzazione di una serra fotovoltaica prototipale. È stato compiuto uno studio sulle caratteristiche funzionali, tecnologiche e morfologiche delle serre, e sui possibili impieghi del fotovoltaico in combinazione con le principali soluzioni di involucro esistenti. Lo studio si è poi concentrato sui vetri fotovoltaici che, grazie alla flessibilità in termini di personalizzazione, si prestano bene all'impiego negli involucri trasparenti, e nelle serre in particolare. Successivamente, a valle di una ricerca di mercato sui principali moduli fotovoltaici adatti all'impiego in combinazione con la crescita di specie vegetali, si è scelto un componente innovativo specificamente sviluppato per finalità cosiddette "agrivoltaiche", che utilizza celle solari in silicio cristallino e che si differenzia dai vetri fotovoltaici in quanto è un modulo a micro-inseguimento, con un sistema di inseguimento disegnato alla scala della singola cella. Si è stipulato un accordo di collaborazione e ricerca con la ditta produttrice (Insolight, prototipi ancora non commerciali) e si è proceduto al progetto di una serra di medie dimensioni, in cui sono distinte due zone: nella prima sono integrati moduli fotovoltaici innovativi per un totale di circa 6m²; nella seconda sono previsti vetri delle stesse dimensioni, in modo da avere una reference zone. Il disegno è stato poi fornito a MUSA che ne cura la realizzazione e il funzionamento.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Attività di ricerca su media scala

2.1.1 Fotovoltaico e serre

La definizione di "serra" copre una vasta gamma di possibilità tecnologiche e funzionali. Essa è fornita dallo Standard Europeo EN 13031-1 (2001) "Greenhouses: Design and construction", recepito dalla norma italiana UNI 13031-1-2004 "Serre: progettazione e costruzione - Parte I: Serre per produzione commerciale" che recita come segue: "Serra: una struttura utilizzata per la coltivazione e/o la protezione delle piante e colture che sfrutta la trasmissione della radiazione solare sotto condizioni controllate per migliorare l'ambiente di crescita, con dimensioni tali da consentire alle persone di lavorare al suo interno."

Nella serra, l'involucro è deputato a svolgere la funzione di captatore solare consentendo il massimo ingresso di energia, ed impedendo sia la dispersione dell'energia solare captata, che quella associata alla riemissione nell'infrarosso lontano da parte dei corpi presenti all'interno della serra.

La quantità di energia solare che penetra nella serra dipende, innanzitutto, dalla quantità di energia solare disponibile (numero di ore equivalenti), e cioè dalla latitudine, dal giorno e dal mese dell'anno, nonché dalle condizioni meteorologiche del sito. Ciò significa che al variare della latitudine del sito ove si realizza la serra, e delle caratteristiche climatiche locali, si disporrà di una diversa quantità di energia. In tal senso, quindi, la progettazione dell'involucro della serra dovrebbe seguire alla scelta della migliore localizzazione e dell'orientamento della serra in funzione della captazione solare e della minimizzazione delle perdite di energia attraverso l'involucro.

Spostando l'attenzione verso l'involucro, questo, indipendentemente dalla localizzazione, dovrà massimizzare la raccolta di energia e minimizzare le perdite. Le perdite possono essere legate a dispersioni di energia, influenzate da fattori ambientali quali la velocità e direzione del vento e le temperature minime dell'aria all'esterno della serra, o alla necessità di arieggiare le serre anche in periodo invernale, al fine di mantenere condizioni ottimali per la coltura.

La copertura è l'elemento che maggiormente influenza il comportamento energetico dell'involucro. Essa condiziona non solo la quantità di energia in ingresso, ma anche la quantità di energia che resta intrappolata all'interno della serra sotto forma di calore, in funzione della sua opacità all'infrarosso lontano (FIR). Inoltre, essa costituisce la superficie di scambio con il cielo, e, quindi, regola le perdite per irraggiamento che si verificano nel corso della notte (quando la temperatura esterna si abbassa). In definitiva, la copertura di una serra assolve, sostanzialmente, due funzioni: confina lo spazio interno proteggendo le colture (resistenza

meccanica) e massimizza la captazione solare. In particolare, rispetto a questa seconda prestazione, i requisiti che la copertura deve possedere sono:

- garantire il passaggio della radiazione solare visibile in termini quantitativi (minima riflessione, minimo assorbimento, massima trasmittanza) e qualitativi, cioè non deve modificare lo spettro della radiazione solare che lo attraversa (selettività spettrale);
- generare l'effetto serra, e cioè essere trasparente all'infrarosso corto della radiazione solare, ma opaca all'infrarosso lungo delle radiazioni emesse dai corpi presenti all'interno della serra;
- minimizzare le perdite che si verificano di notte per irraggiamento (sky temperature).

L'energia solare che giunge sulla copertura la attraversa in funzione della trasmittanza del materiale alla radiazione solare (visibile diretta, visibile diffusa, infrarosso lontano), dell'assorbimento del materiale (proporzionale allo spessore dello strato da attraversare), e della riflessione da parte del materiale. Il passaggio della radiazione solare attraverso la copertura, quindi, si associa a delle perdite. Queste, sommate, ammontano a circa il 20% della radiazione solare incidente, ma, nei casi peggiori (superficie della copertura non perfettamente trasparente, o deteriorata con accumulo di polvere) possono arrivare al 40%.

La serra per come definita sopra è un involucro passivo, tuttavia la necessità di poter controllare in maniera precisa le condizioni interne alla serra, e cioè i flussi di energia e di materia dentro l'ambiente confinato, ha richiesto che il modello originario costituito dalla serra come edificio che affida il suo funzionamento alle sole strategie passive si arricchisse dell'impiego di alcuni sistemi tecnologici, che hanno bisogno di energia per il loro funzionamento. Questi sistemi sono attrezzature ed impianti per la regolazione ed il controllo della temperatura (impianti per il riscaldamento ed impianti per il raffrescamento), dell'umidità relativa, dell'illuminazione, della concentrazione di anidride carbonica nell'aria, dell'acqua e dei fertilizzanti somministrati alle colture.

Dunque la serra diventa un "sistema serra". Dal punto di vista energetico, la diversità dello schema concettuale energetico adottato per la serra e per il sistema serra, definisce di fatto una differenza tra la serra intesa come edificio passivo (che non consuma energia per il suo funzionamento), in grado di regolare in maniera naturale i flussi energetici e di materia al suo interno; e la serra come edificio che consuma energia per il suo funzionamento, in cui i flussi energetici di materia sono regolati mediante il ricorso a sistemi tecnologici che necessitano di energia per il loro funzionamento.

Il fotovoltaico, e segnatamente quei componenti adatti agli involucri trasparenti, si candida come una tecnologia utile a coprire il fabbisogno energetico del sistema serra. In tal senso, l'energia elettrica generata da fotovoltaico è idonea a fornire l'energia necessaria ad ogni processo che avvenga all'interno della serra, e, inoltre, i componenti fotovoltaici sono idonei ad essere impiegati in sostituzione dei tradizionali materiali edili che configurano l'involucro. Naturalmente, l'impiego dei moduli fotovoltaici in sostituzione dei tradizionali materiali di copertura delle serre comporta una verifica in merito alla capacità dell'involucro di trasmettere la radiazione solare in modalità adeguate a favorire il processo fotosintetico delle piante che vi sono coltivate.

L'impiego del fotovoltaico nelle serre ha subito un forte impulso in Italia in seguito al Decreto 5 maggio 2011, Incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti solari fotovoltaici, che prevedeva una speciale tariffa incentivante (media tra applicazioni a terra e applicazioni innovative BIPV) per le serre che integrassero nell'involucro soluzioni fotovoltaiche, con la condizione che "le serre a seguito dell'intervento devono presentare un rapporto tra la proiezione al suolo della superficie totale dei moduli fotovoltaici installati sulla serra e della superficie totale della copertura della serra stessa non superiore al 50%" [8].

Questa indicazione unicamente quantitativa in realtà non tiene in adeguata considerazione le sinergie tra fotovoltaico e colture che devono orientare la scelta degli appropriati componenti fotovoltaici, nonché della loro disposizione spaziale (pattern) all'interno del sistema tecnologico di involucro costituito dalla copertura. La ricerca internazionale nel campo dell'agrivoltaico si concentra proprio sul rapporto ottimale tra superficie opaca e superficie trasparente, e sulle caratteristiche che la radiazione solare deve presentare ai fini del bilancio effetto fotovoltaico-fotosintesi [9].

Il tema non è stato ancora esplorato in maniera esaustiva, sia perché complesso per la sua intrinseca natura multidisciplinare, sia perché l'interesse verso questo uso multifunzionale del fotovoltaico è piuttosto recente, ed esistono poche realizzazioni che forniscano dati sperimentali attendibili.

In Tabella 1 sono riportati alcuni risultati di un'analisi dello stato dell'arte condotta nel corso di questa ricerca relativamente ai principali temi progettuali relativi all'ottimizzazione del design delle serre fotovoltaiche, alle principali soluzioni progettuali e tecnologiche adottate [10].

Tabella 1: Problemi tecnici e soluzioni per l'impiego di sistemi fotovoltaici nelle serre.

Topic	Design related solution	Technology related solution
Minimizing shadows on crops (biomass yield)	Different layouts to homogenize the distribution of the light inside the greenhouse Increase the gutter height of the greenhouse	Dynamic systems Semitransparent PV modules (by spacing PV cells or using semitransparent PV layers)
Minimizing the loss of PAR (Photosynthetically active radiation)	Use of colored layers	Spectral selective PV devices by selective focus different wavelengths of the solar spectrum on plants and modules Luminescent solar concentrator technology (LSC)
Maximizing electric energy generation	Optimal design for energy generation: Maximum energy intensity (dense pattern of the PV modules) with no shading effects on the modules Optimal positioning of the modules (tilt and azimuth angles of the roof)	Use of high efficiency PV systems, or high efficiency PV modules, (such as bifacial modules)
Microclimatic issues (temperature and humidity conditions inside the greenhouse)	Ventilation (natural through vents) Orientation (Sun direction along the year) Location (climate)	Highly efficient HVAC systems Artificial light
Social acceptance	Designing the greenhouse for an optimal visual performance (e.g., high level of integration of the greenhouse in the landscape, and of the modules in the greenhouse envelope)	Appropriate choice of the PV technologies allowing for an increased visual performance (size, shape, color and texture)

La figura 2.1.1 mostra come l'impiego del fotovoltaico nelle serre non sia limitato all'uso dei moduli fotovoltaici integrati nell'involucro, ma includa una varietà di altre soluzioni [2] [11] [12]. La ricerca sullo stato dell'arte relativa all'impiego del fotovoltaico nelle serre mostra anche che esistono diversi approcci per migliorare la prestazione complessiva del sistema serra-fotovoltaico attraverso la variazione del pattern spaziale della superficie opaca costituita dai moduli fotovoltaici (geometria e densità), oltre che la tecnologia del modulo o della cella stesse, come illustrato in figura 2.1.2.

In base a quanto studiato in letteratura, è possibile proporre una descrizione delle serre che tenga in considerazione le possibilità di impiego della tecnologia fotovoltaica secondo diversi approcci e morfologie. In particolare, l'approccio descrittivo elaborato include le caratteristiche morfologiche della serra (sezione trasversale), il materiale adoperato per l'involucro; il fotovoltaico (in quanto sistema, e in quanto modulo), le caratteristiche dello spazio interno (pore space-crop).



Figura 2.1.1: Soluzioni per l'impiego del fotovoltaico nelle serre basate sullo stato dell'arte: (a) fisse con diversi pattern, (b) dinamiche, (c) fotovoltaico innovativo.

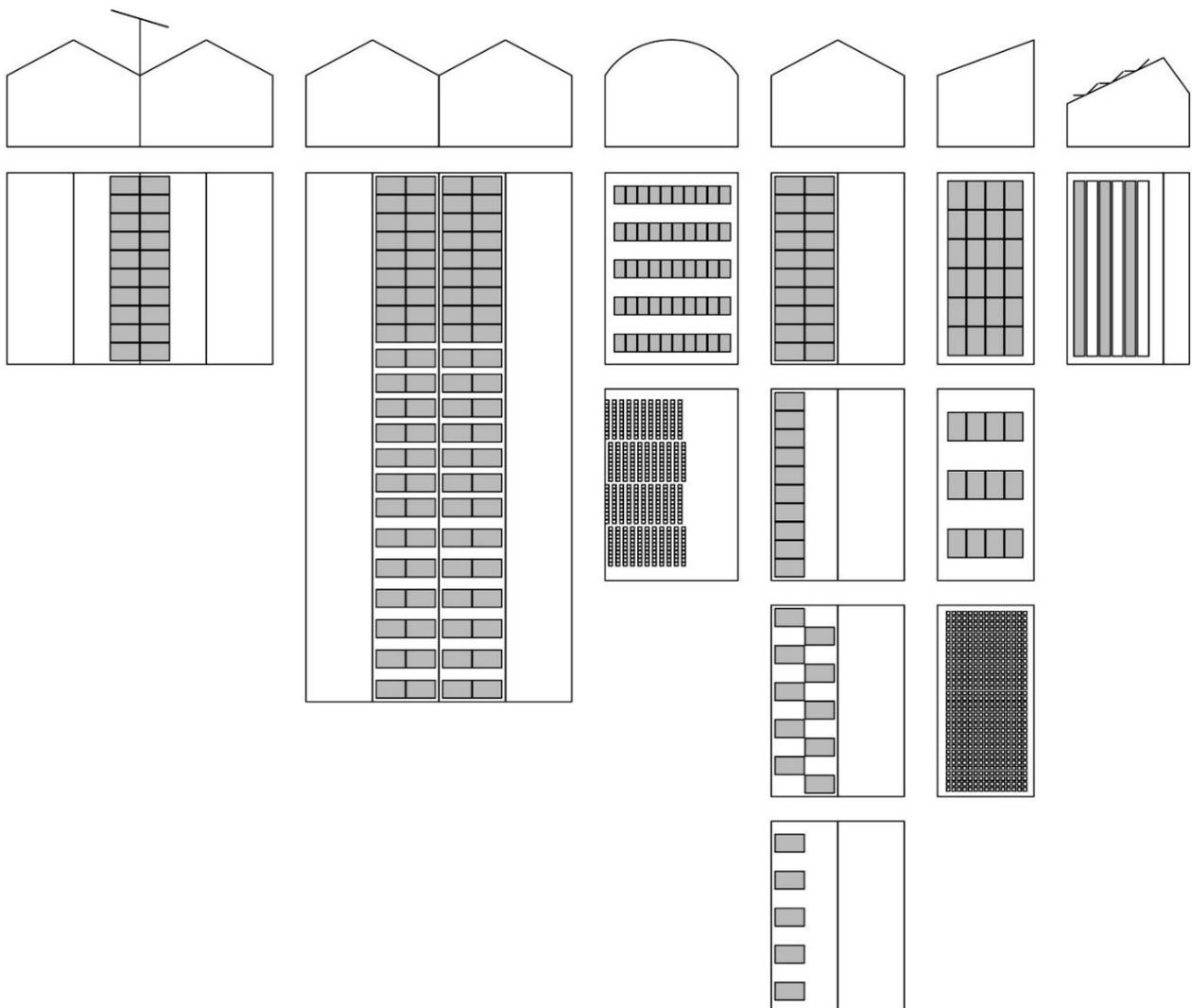


Figura 2.1.2. Pattern del fotovoltaico per le serre, e grado di trasparenza. Da sinistra a destra: (a) Sistema dinamico su falda inclinata (b) Sistema fisso su falda inclinata con grado di trasparenza variabile 15%, 25% e 50% (c) tunnel, fino al 37% di densità; in basso: pattern a scacchiera; (d) Doppia falda inclinata, una sola falda completamente opaca 100%, 25% pattern a scacchiera e 20% di opacità; (e) singola falda con 100% e 32% di opacità e moduli fotovoltaici semitrasparenti (distanziamento delle celle) con 50% di trasmittanza (f) fare asimmetriche, approccio dinamico.

2.1.2 Ricerca dei componenti fotovoltaici per sperimentazione in serra

Tra i prodotti fotovoltaici sviluppati per l'impiego negli edifici, i "vetri fotovoltaici" sono quelli che consentono il maggiore grado di integrazione e funzionalità nell'involucro, e per questa ragione sono adatti all'impiego in serre. I vetri fotovoltaici sono quei componenti in cui il modulo è costituito da una stratificazione in cui le celle o il laminato fotovoltaico, sono incapsulate tra due vetri. Tali vetri possono essere trasparenti oppure opachi, secondo il tipo di impiego del modulo. In termini di prestazioni rispetto al sistema dell'involucro edilizio, si prestano all'impiego in ogni categoria BIPV individuata dallo standard IEC 63092-1, ed in particolare in corrispondenza delle coperture, in maniera verticale (tra 75° e 90°), o in corrispondenza di elementi accessori esterni all'edificio [13]; e nelle classi tecnologiche individuate dalla Norma UNI 8290 [14] come chiusure (in funzione di separazione dello spazio esterno da quello interno), partizioni esterne (in funzione di semplice separazione di uno spazio esterno), o anche attrezzature esterne.

Dal punto di vista dell'"integrabilità" dei componenti fotovoltaici nell'involucro edilizio, è possibile distinguere tra: integrabilità tecnologica (tiene conto della compatibilità tecnico-costruttiva tra i nuovi componenti e gli assetti esistenti), integrabilità morfologica (attiene alla modificazione delle qualità materico-percettive indotte nei sub-sistemi coinvolti dall'applicazione degli elementi fotovoltaici) ed integrabilità bioclimatica (si riferisce alle possibili ricadute in termini di miglioramento delle capacità di controllo bioclimatica dell'involucro) [15].

Le potenzialità di personalizzazione dei moduli fotovoltaici, sono state descritte in molte pubblicazioni. Per lo scopo di questa ricerca si fa riferimento a due tra le più recenti che prendono in esame, rispettivamente, le variabili tecnologiche che concorrono ad uno specifico disegno del modulo fotovoltaico [16], e gli esiti di tali scelte in funzione delle prestazioni visive [17].

Il punto di vista, considerato lo scopo della ricerca, è la comprensione delle possibilità di variare la semitrasparenza del modulo in funzione di determinate fissate prestazioni che fanno riferimento in prima istanza al compromesso ideale tra generazione fotovoltaica e fotosintesi, ma anche ai requisiti di integrabilità nell'involucro precedentemente descritti.

In sintesi, l'approccio più utilizzato per regolare il grado di trasparenza di un vetro fotovoltaico è quello di impiegare celle in silicio cristallino e ricorrere ad un pattern (distribuzione spaziale delle celle nell'unità di modulo) che sia poroso, e cioè lasci passare una certa quantità di radiazione solare (diretta) tra le celle.

A partire da questo approccio diverse combinazioni sono possibili, orientando la scelta degli altri strati del componente (e segnatamente il vetro o il film esterno) in maniera da avvicinare la prestazione del vetro fotovoltaico a quelle desiderate per gli specifici scopi del progetto. Nello specifico caso delle serre, un primo approccio consiste nel selezionare un vetro interno (back layer) in maniera che diffonda la radiazione solare che passa tra le celle, garantendo una migliore omogeneità alle condizioni di illuminazione interne alla serra. Inoltre, se l'aspetto della serra è rilevante (nel caso del progetto in esame, il contesto è di pregio, trattandosi del giardino storico della Reggia borbonica di Portici), è possibile disegnare lo strato esterno (front layer) in maniera che l'aspetto visivo venga opportunamente preso in considerazione. Queste possibilità sono schematicamente mostrate in figura 2.1.3.

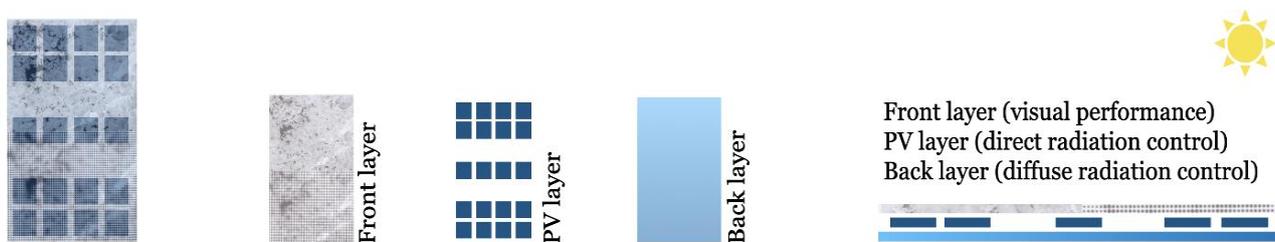


Figura 2.1.3: Possibilità di personalizzazione di un vetro fotovoltaico in funzione dell'ottimizzazione della trasmissione della radiazione solare all'interno della serra.

Relativamente a moduli fotovoltaici specifici per applicazioni agrivoltaiche in serra (BIPV), la ricerca si è concentrata sulla ricerca di prodotti che siano in una fase di sperimentazione avanzata, che li renda disponibili sul mercato anche se ancora in una fase di ricerca e sviluppo (prototipi).

L'attenzione si è focalizzata su un modulo sviluppato dalla ditta svizzera Insolight (THEIA pre-series module, figura 2.1.4), che è un modulo trasducente, basato su una tecnologia di micro-tracking brevettata, che concentra la luce solare sulle celle, mentre trasmette la diffusa e la rende disponibile per la fotosintesi. Le caratteristiche principali del modulo sono un'efficienza alle STC del 20.1% e la possibilità di trasmettere (algoritmo di ottimizzazione disponibile) fino al 70% della luce solare.

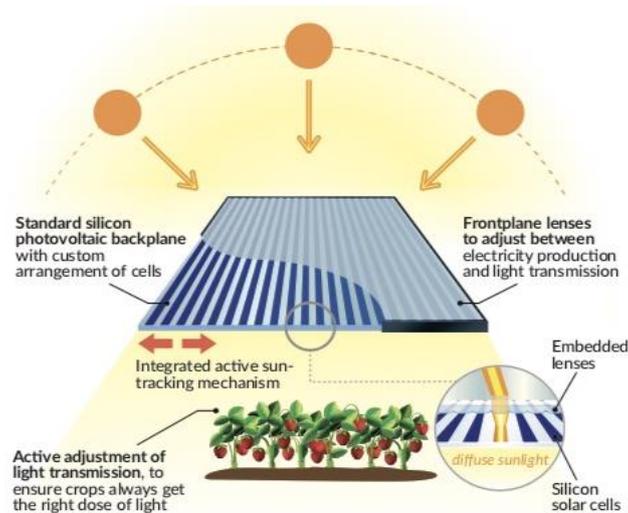


Figura 2.1.4: Il modulo agrivoltaico THEIA Insolight.

Questo modulo si presta ad essere integrato in un involucro, ed è quindi da considerare una soluzione BIPV. La tecnologia si basa su celle fotovoltaiche in silicio, con delle lenti ad inseguimento integrate. Il sistema di controllo permette di orientare la prestazione del componente verso la massima generazione elettrica o verso la massima trasmissione, come mostrato in figura 2.1.5. Il sistema di controllo è integrato nel componente, ed un'interfaccia consente di controllare da remoto il funzionamento del sistema.

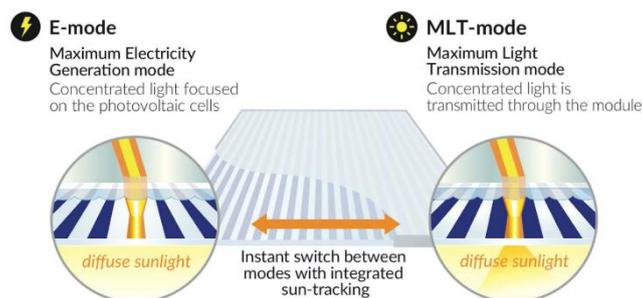


Figura 2.1.5: Il principio di funzionamento del modulo agrivoltaico THEIA Insolight.

2.1.3 Progetto della serra di media scala

In base alle analisi condotte, si è scelto di riservare l'uso dei vetri fotovoltaici alla sperimentazione di larga scala che sarà portata avanti nella linea LA2.17, e di utilizzare quelli specifici per agrivoltaico sviluppati da Insolight per l'applicazione di media scala. Tale approccio consentirà di acquisire conoscenza su due tipologie di fotovoltaico diverse, la prima (i vetri) caratterizzata da un alto grado di flessibilità in termini di design, e da

un limitato potenziale di flessibilità in termini di adattamento dinamico del compromesso fotovoltaico/fotosintesi; l'altra (i moduli agrivoltaici) caratterizzata da un limitato grado di flessibilità in termini di design, ma di un alto potenziale di sperimentazione rispetto alle sinergie fotovoltaico/fotosintesi per l'adattabilità del sistema alle prestazioni desiderate dall'utente.

Il progetto della serra di media scala è avvenuto in sintonia con le indicazioni fornite dal team MUSA e dagli esperti di Insolight, anche per il set up del sistema sperimentale di monitoraggio. La serra progettata ha dimensioni in pianta di 6m x 3m. In copertura sono previste due zone: nella prima è presente l'integrazione di 8 moduli fotovoltaici Insolight per un totale di circa 6 m²; nella seconda si installeranno vetri delle stesse dimensioni, in modo da avere una *reference zone*, come mostrato in figura 2.1.6.

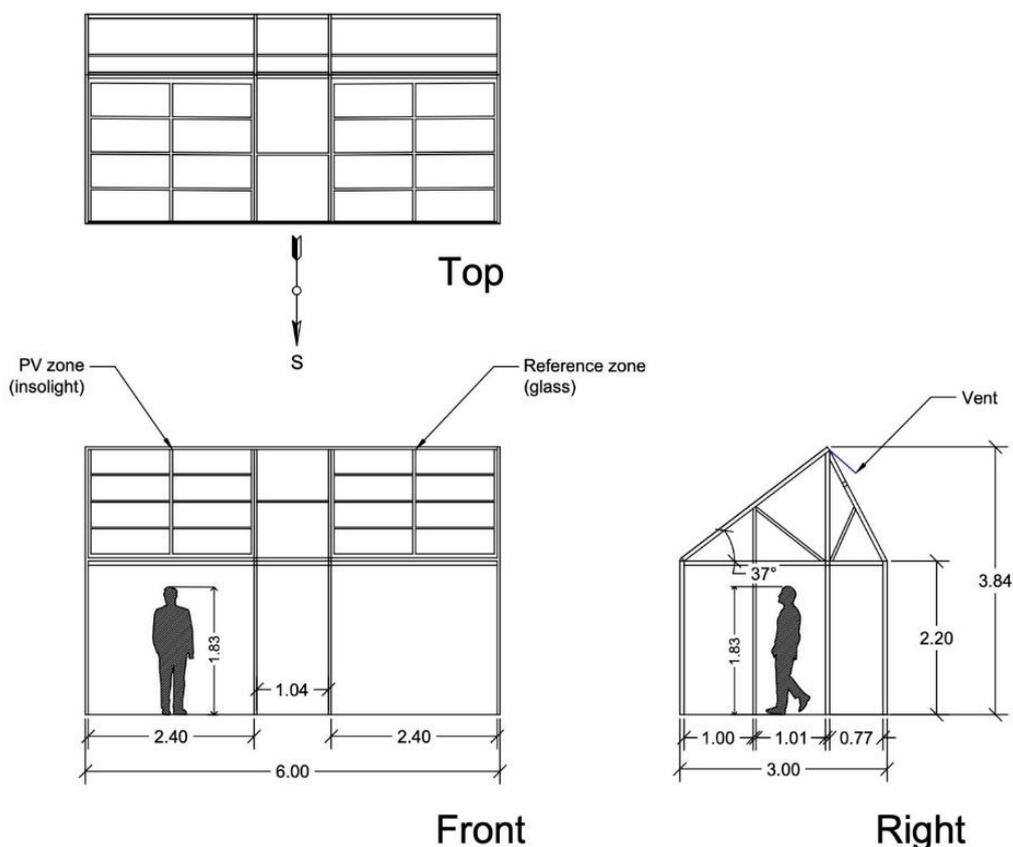


Figura 2.1.6: Progetto di massima della serra di media scala.

Nel progetto della serra si è tenuto conto di diversi requisiti del progetto; tra questi: la statica della serra; le caratteristiche tecnologiche e meccaniche dei moduli da integrare nell'involucro; il posizionamento ottimale della specifica tecnologia di modulo (la presenza dei micro-sistemi ad inseguimento condiziona il posizionamento ottimale); la disposizione delle specie vegetali designate in maniera che le condizioni di illuminazione fossero ottimali (studio dei percorsi solari nel corso dell'anno e relativi ombreggiamenti); le esigenze funzionali di una persona che debba lavorare all'interno della serra (figure 2.1.7-2.1.12).

Sun-path analysis
Medium-size PV Greenhouse

Asymmetrical-roof design

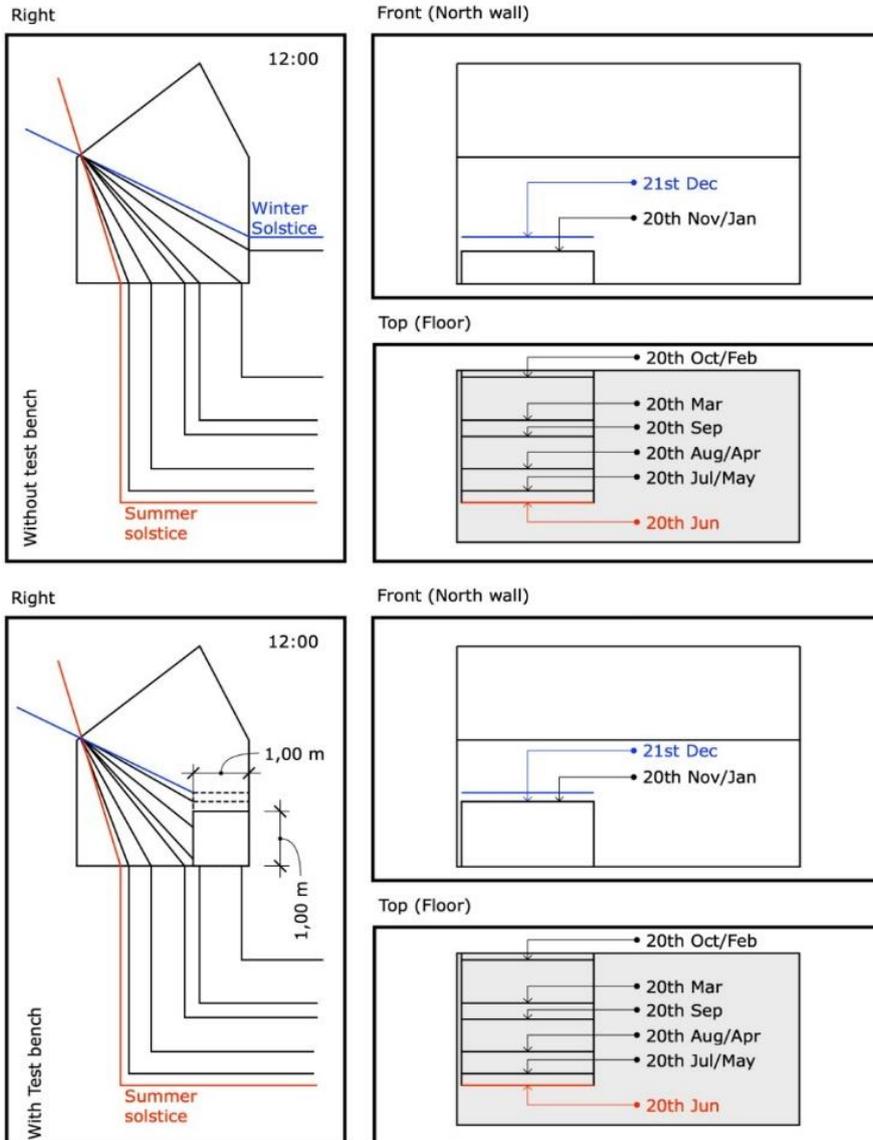


Figura 2.1.7: Studio dei percorsi solari nel corso dell'anno e relativi ombreggiamenti.

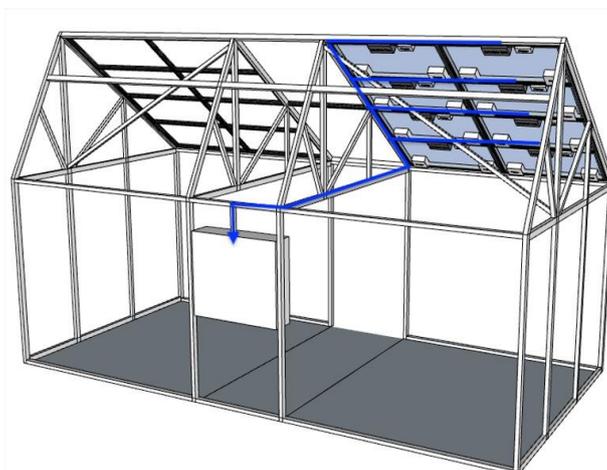


Figure 2.1.8: Studio della struttura e compatibilità con i moduli agrivoltaici scelti in fase di analisi.

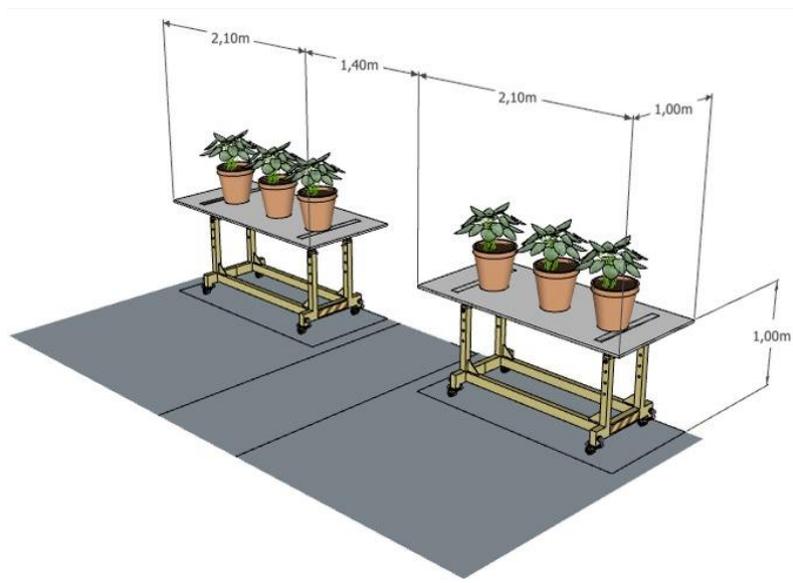


Figure 2.1.9: Dimensionamento ed organizzazione del layout spaziale in maniera funzionale alla disposizione delle specie vegetali

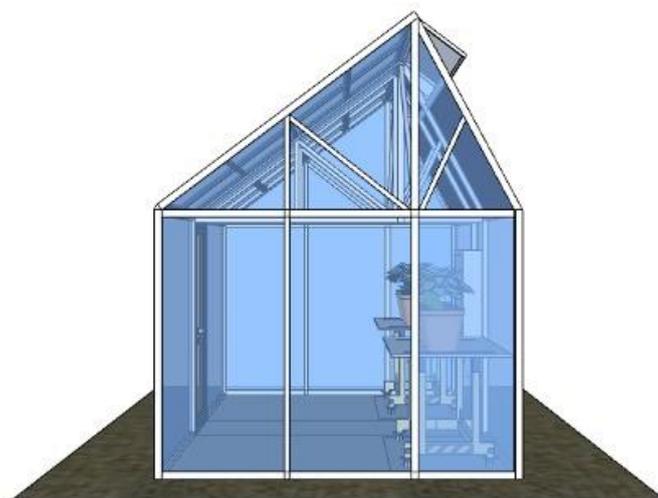


Figure 2.1.10: Immagine complessiva del prospetto laterale della serra, con dettaglio del sistema di ventilazione naturale affidato alla falda asimmetrica con apertura in alto lungo la parete nord.



Figure 2.1.11: Immagine complessiva del prospetto principale della serra, con dettaglio dell'ingresso sul lato sud.

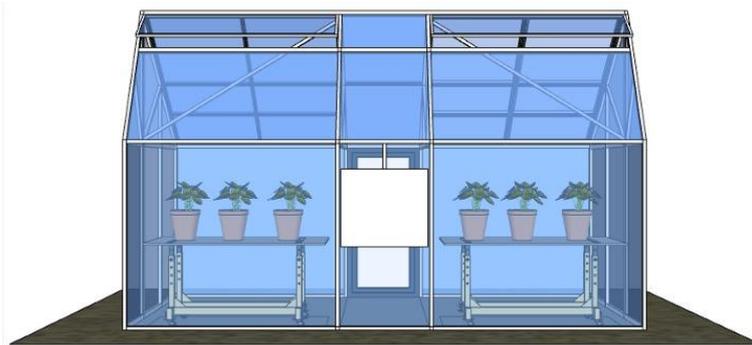


Figure 2.1.12: Immagine complessiva del prospetto posteriore della serra, con dettaglio del pannello di controllo del sistema.

2.2 *Sperimentazione su piccola scala*

2.2.1 *Descrizione del concetto e caratterizzazione ottica dei materiali selezionati*

L'attività ha riguardato lo studio su piccola scala (scala di laboratorio, con area massima di $10 \times 10 \text{ cm}^2$) del possibile uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi grazie a moduli fotovoltaici semitrasparenti spettralmente selettivi a base di silicio amorfo. Sono stati dapprima progettati e in seguito 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.

Il concetto di base prende spunto dal tipico spettro di assorbimento dei pigmenti delle piante nel processo di fotosintesi. In figura 2.2.1 è graficato lo spettro di assorbimento normalizzato dell'Arabidopsis, pianta molto studiata e utilizzata come organismo modello per le scienze vegetali, fornito dal MUSA, insieme ai classici spettri della clorofilla di tipo a e di tipo b [18]. È evidente in tutti i casi la presenza di un picco/banda nel blu e uno nel rosso, mentre la regione intermedia tra i picchi (circa 500-650 nm) e l'IR sono in linea di principio disponibili per possibili usi complementari, come può essere la generazione di elettricità da fotovoltaico.

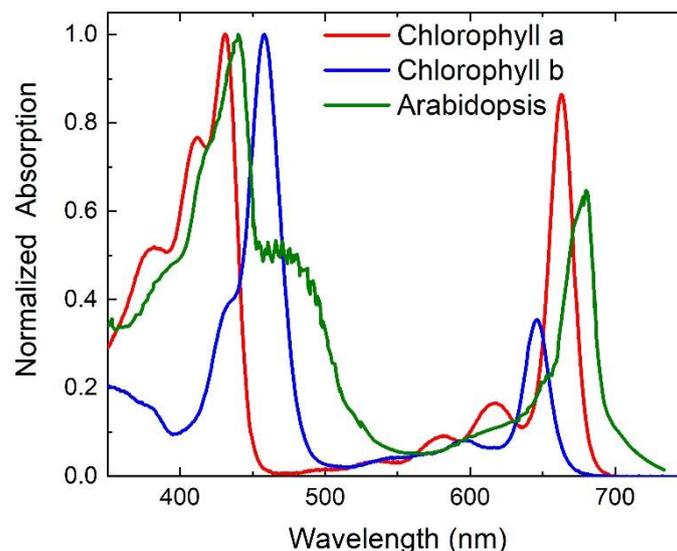


Figura 2.2.1. Spettro di assorbimento normalizzato dell'Arabidopsis, fornito da MUSA, e della clorofilla tipo a e tipo b ricavati dalla letteratura [18].

Una cella solare a film sottile di silicio amorfo è composta da uno strato attivo in silicio amorfo intrinseco posto tra strati di supporto per la raccolta delle cariche (strati ultrasottili in silicio drogato tipo n e tipo p per la raccolta selettiva di elettroni e lacune su due facce opposte del dispositivo, seguiti dai rispettivi elettrodi),

fabbricata su un supporto come il vetro. A parte piccole variazioni relativamente agli strati drogati ultrasottili (con spessori tipicamente ≤ 20 nm), essenzialmente dal punto di vista ottico il dispositivo è un multistrato di film sottili, applicato su vetro, composto da un primo film di ossido trasparente e conduttivo (TCO) che funge da elettrodo frontale, uno strato di silicio amorfo (il cuore della cella solare) e un elettrodo posteriore a film sottile di metallo, totalmente riflettente, nella versione opaca più efficiente. Per realizzare celle solari semitrasparenti, l'elettrodo posteriore metallico viene sostituito da un film di TCO simile a quello frontale o da multistrati tipo ossido/metallo/ossido (OMO) con uno strato ultrasottile di metallo tra due film di TCO [19], [20], in modo da ottenere (in entrambe le realizzazioni) parziale trasparenza e buona raccolta di carica elettrica e nel secondo caso anche un possibile aspetto colorato delle celle. Strutture tipo OMO non consentono però la definizione di picchi di trasmittanza molto stretti, che sono invece necessari per realizzare un riflettore spettralmente selettivo efficiente. A tale scopo si può pensare di aggiungere un ulteriore strato ultrasottile di metallo per formare un multistrato tipo Fabry-Perot e sfruttarne le note proprietà di filtraggio in colore [21]. Spettri rappresentativi di trasmittanza e riflettanza di un multistrato tipo metallo/ossido/metallo/ossido (MOMO) costituito da Ag/AZO/Ag/AZO sono riportati in figura 2.2.2, a dimostrazione del funzionamento di un componente di questa tipologia nella riflessione e trasmissione di bande specifiche nel range del visibile e vicino infrarosso. Va sottolineato che 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 bisogna lavorare con interfacce perfettamente lisce.

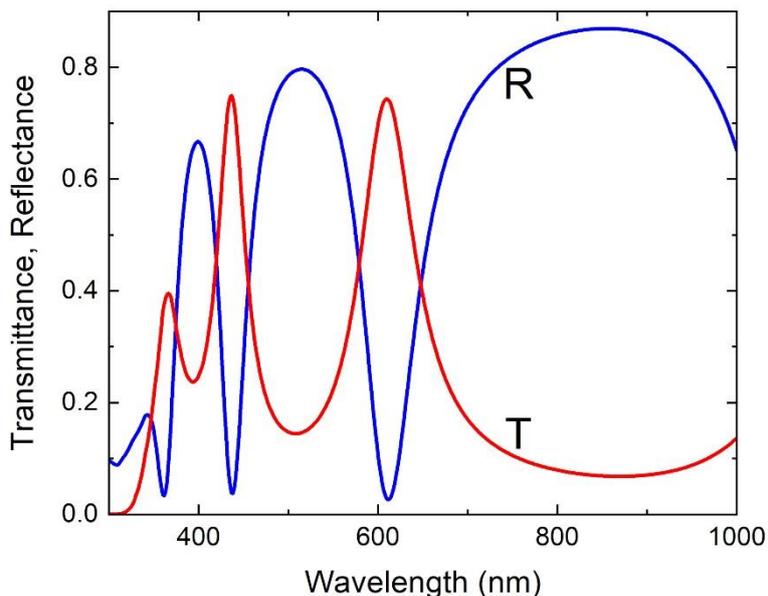


Figura 2.2.2. Spettri rappresentativi di trasmittanza e riflettanza di un multistrato di Ag/AZO/Ag/AZO.

In un multistrato di questo tipo, lo strato intermedio di ossido tra i due strati metallici altamente riflettenti è una cavità ottica in cui l'interferenza costruttiva dà luogo a trasmissione e la distruttiva a riflessione. Fissato il materiale, giocando sullo spessore di questo strato è quindi possibile selezionare le lunghezze d'onda trasmesse (ossia i picchi di trasmittanza in figura 2.2.2) e quindi, nel caso dell'applicazione in esame, adattarle agli spettri di assorbimento riportati in figura 2.2.1.

Ulteriore riaggiustamento fine dello spettro di trasmittanza è possibile anche variando lo spessore dello strato esterno di ossido, che ricopre inoltre un ruolo fondamentale di protezione del film ultrasottile di metallo che potrebbe altrimenti facilmente ossidarsi. Infine, relativamente ai film di metallo nella struttura, è evidente che questi debbano essere molto sottili per garantire sufficiente trasparenza.

In questa annualità è stata investigata la possibilità di sfruttare le potenzialità di questo componente ottico applicato 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 trasmissivo nel rosso e nel blu). Lo schema della struttura in esame è illustrato in figura 2.2.3 insieme a una rappresentazione grafica del suo funzionamento.

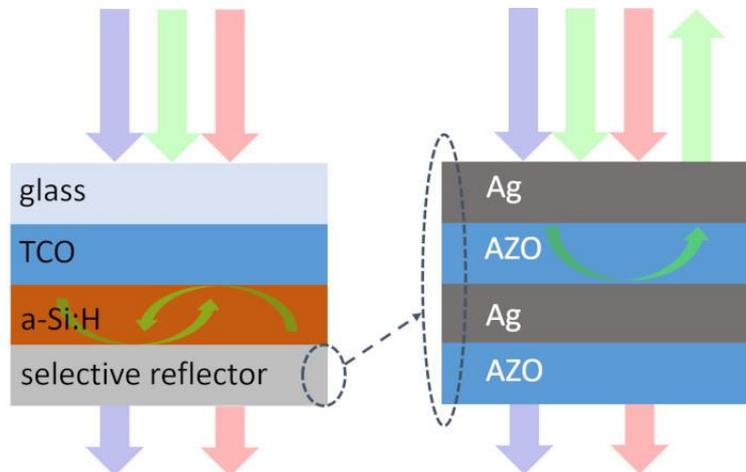


Figura 2.2.3 Schema di cella solare spettralmente selettiva con riflettore posteriore tipo Ag/AZO/Ag/AZO (spessori degli strati non in scala) e rappresentazione grafica del suo funzionamento.

Per l'attività di ricerca sono stati selezionati materiali disponibili in laboratorio, con il vantaggio di essere tipicamente in uso e già consolidati nella tecnologia a film sottile di silicio. Sono stati selezionati lo ZnO drogato alluminio (AZO) come ossido da usare sia nel riflettore posteriore che come TCO frontale e l'argento (Ag) come metallo in considerazione della sua alta conducibilità. Come fase propedeutica alla progettazione delle celle solari spettralmente selettive, sono stati innanzitutto depositati su vetro (vetri Corning Eagle di spessore 1.1 mm) film sottili dei vari materiali per poter effettuare una caratterizzazione ottica mediante ellissometria ed estrarre le costanti ottiche dei materiali reali fabbricati nei nostri laboratori. I film di silicio amorfo sono stati depositati per plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) e i film di AZO e Ag mediante sputtering. I principali dettagli di fabbricazione sono riportati più avanti nella sezione dedicata alla campagna sperimentale (2.2.3). I campioni sono stati caratterizzati otticamente utilizzando un ellissometro VASE della Woollam, acquisendo dati su 3 angoli di incidenza e misurando inoltre la trasmittanza nello stesso punto. Spessori e costanti ottiche sono stati determinati con modellazione ottica dedicata, tramite il software della Woollam, applicando le formule di dispersione di Tauc-Lorentz (T-L) per a-Si:H, una combinazione di T-L, gaussiana e modello di Drude per AZO, e una combinazione di T-L, oscillatore di Lorentz e gaussiane per Ag. Gli spettri del coefficiente di estinzione e dell'indice di rifrazione dei vari materiali sono riportati in figura 2.2.4. Questi sono stati utilizzati come input nella progettazione degli pseudo-moduli di test.

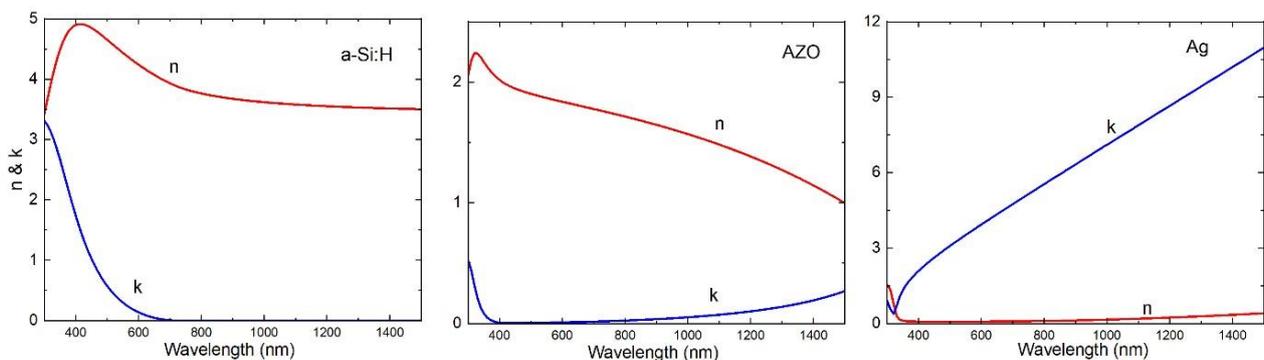


Figura 2.2.4 Spettri del coefficiente di estinzione (blu) e dell'indice di rifrazione (rosso) ottenuti da analisi ellissometrica dei materiali selezionati per l'attività di ricerca: a-Si:H, AZO, Ag.

2.2.2 Progettazione di celle solari spettralmente selettive a film sottile di silicio

La progettazione degli pseudo-moduli di test è stata effettuata utilizzando il pacchetto freeware IMD dedicato alla modellazione ottica di multistrati, disponibile come estensione del programma XOP dell'ESRF [22].

Come primo passo, è stata simulata la struttura base della cella solare, ossia una pseudo-cella opaca costituita da un sottile strato assorbitore di a-Si:H depositato su vetro e ricoperto posteriormente da uno strato metallico totalmente riflettente (Ag). La cella è stata modellata come uno strato di a-Si:H posto tra vetro e Ag trattati come mezzi semi-infiniti. In questo studio puramente ottico non consideriamo gli strati di supporto necessari alla separazione delle cariche (film a base di silicio ultrasottili drogati tipo p e tipo n) che tipicamente differiscono poco dal materiale assorbitore da un punto di vista ottico. Lo spessore di a-Si:H va quindi considerato come uno spessore efficace che include anche questi contributi. Assorbimento e riflessione di questo sistema, che può essere visto come una guida d'onda, dipendono da spessore, indice di rifrazione e coefficiente di estinzione del mezzo assorbitore. Restando su spessori contenuti, per poter poi avere una sufficiente trasmissione per l'applicazione in esame, l'assorbimento nel verde appare massimizzato per spessori di a-Si:H intorno a 70 nm (simulazione in figura 2.2.5a). Ciò resta confermato anche includendo il contatto frontale trasparente tra vetro e a-Si:H, ossia uno strato di AZO frontale con spessore fissato a 180 nm in modo da considerare una cella funzionale (figura 2.2.5b). Ovviamente va tenuto presente che nell'assorbimento totale è anche incluso un contributo di assorbimento parassita (essenzialmente assorbimento da parte dell'AZO).

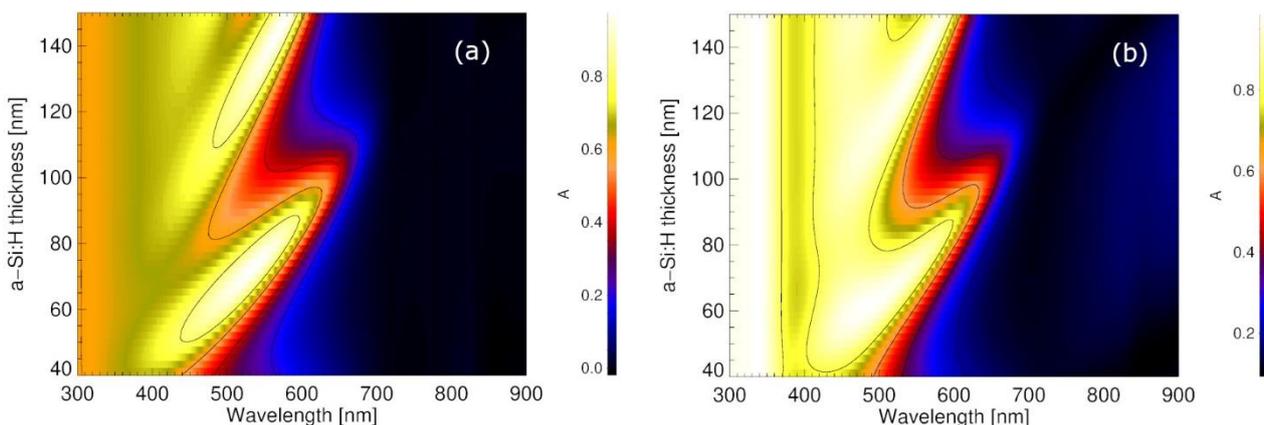


Figura 2.2.5. Simulazione dell'assorbimento (1-Riflettanza) della struttura base di cella solare opaca vetro/a-Si:H/Ag (a) e vetro/AZO/a-Si:H/Ag (b) al variare dello spessore di a-Si:H, con vetro come mezzo di ingresso e Ag mezzo di uscita semi-infiniti.

È stata poi studiata l'evoluzione dell'assorbimento per piccole variazioni dello spessore dello strato di AZO e si è osservato che 180 nm consentono un allargamento del range spettrale di assorbimento nel verde (figura 2.2.6). Spessori più elevati di AZO sarebbero preferibili da un punto di vista elettrico, ma otticamente comportano lo svantaggio di un aumento del numero di frange di interferenza. Sulla base di queste simulazioni preliminari, gli spessori di a-Si:H e AZO frontale sono stati quindi fissati rispettivamente pari a 70 nm e 180 nm.

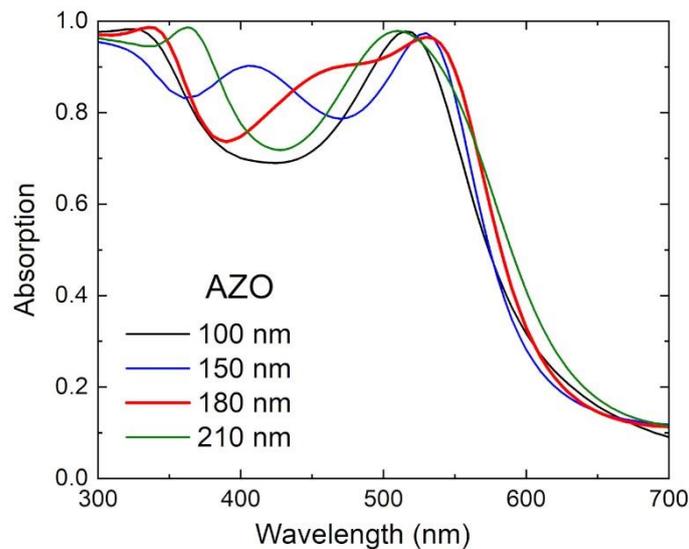


Figura 2.2.6. Simulazione dell'assorbimento (1-Riflettanza) della struttura base di cella solare opaca vetro/AZO/a-Si:H(70 nm)/Ag, al variare dello spessore di AZO, con vetro come mezzo di ingresso e Ag mezzo di uscita semi-infiniti.

Il passaggio successivo è stato la sostituzione del riflettore opaco di Ag nella struttura simulata con un multistrato di Ag/AZO/Ag/AZO (o MOMO) semitrasparente e spettralmente selettivo mirando ad ottenere una parziale trasmittanza in regioni precise del rosso e del blu. In particolare, su indicazione del MUSA, è stato stabilito come target in trasmittanza lo spettro di assorbimento dell'Arabidopsis mostrato in figura 2.2.1. 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 sarà certamente limitata. Sarà però possibile ottenere un contributo non nullo, non praticabile con altra tipologia di contatto semitrasparente posteriore.

È stata quindi simulata l'intera struttura AZO/a-Si:H/Ag/AZO/Ag/AZO, con vetro come mezzo di ingresso e aria in uscita, ed effettuato uno studio completo dell'effetto dei vari strati per poter evidenziare le potenzialità dell'approccio e i parametri regolabili per poi definire la struttura ottimale rispetto al target fissato. Lo strato cruciale del MOMO che consente di regolare la posizione del picco di trasmittanza è l'AZO intermedio. In figura 2.2.7 è mostrata la mappatura della trasmittanza simulata dell'intera pseudo-cella solare, inclusi AZO frontale e assorbitore in a-Si:H con gli spessori già stabiliti rispettivamente pari a 180 nm e 70 nm, lasciando lo spessore di AZO intermedio variabile tra 250 nm e 400 nm (in questo caso con AZO posteriore fissato a 100 nm e i due film di Ag a 12 nm). È evidente la presenza di tre massimi di trasmittanza (nel blu, rosso e IR) che si spostano a lunghezze d'onda crescenti al crescere dello spessore di AZO intermedio nel riflettore. Il picco più intenso è quello intermedio (posizionato approssimativamente nel rosso per un certo range di spessori) con un'intensità che supera anche il 50%, mentre il primo picco a bassa lunghezza d'onda, come preannunciato, ha intensità più bassa, soprattutto finché è posizionato al di sotto dei 500 nm, corrispondente al caso di interesse per l'applicazione in esame (intensità intorno a 10-15%). Considerando lo spettro di riferimento dell'Arabidopsis, lo spessore ottimale dello strato di AZO intermedio è 330 nm, con i primi due picchi di trasmittanza intorno a 480 nm e 680 nm.

È stato poi indagato l'effetto dello spessore dello strato di AZO finale. In figura 2.2.8 è riportata la mappa di trasmittanza simulata dell'intera struttura al variare dello spessore di questo strato nel range 50-200 nm, con l'AZO intermedio fissato al valore ottimale di 330 nm. Si può osservare che questo strato, che ha un ruolo di protezione del film ultrasottile di Ag, al contempo consente anche un fine-tuning dei picchi di trasmittanza. Dalle simulazioni risulta che spessori intorno a 100 nm sono idonei, con un buon margine di variabilità consentito senza inficiare i risultati in trasmittanza, a differenza della forte dipendenza della posizione dei picchi rispetto allo spessore di AZO intermedio, che comporta invece la necessità di un elevato controllo a livello di fabbricazione.

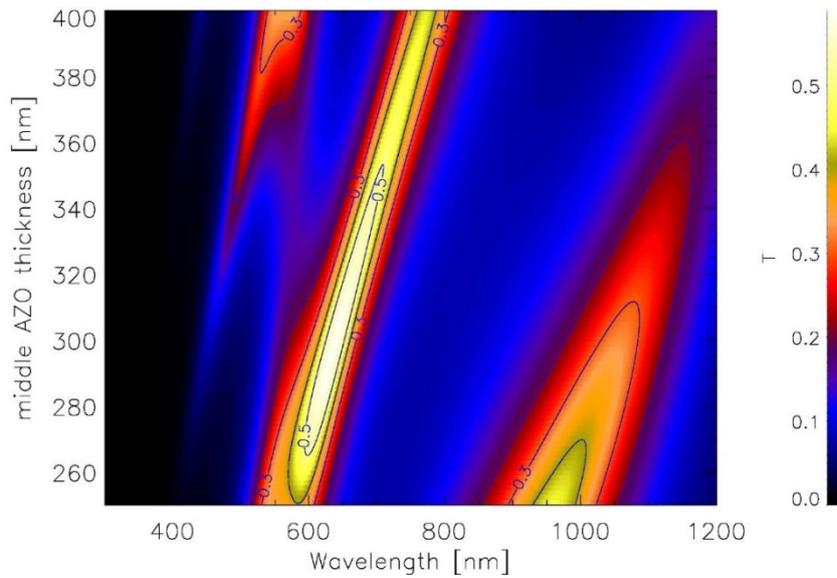


Figura 2.2.7. Simulazione della trasmittanza della struttura spettralmente selettiva AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/MOMO, dove MOMO sta per Ag/AZO/Ag/AZO, al variare dello spessore dello strato intermedio di AZO del MOMO. Nella simulazione l’AZO posteriore e i due strati di Ag sono fissati rispettivamente a 100 nm e 12 nm.

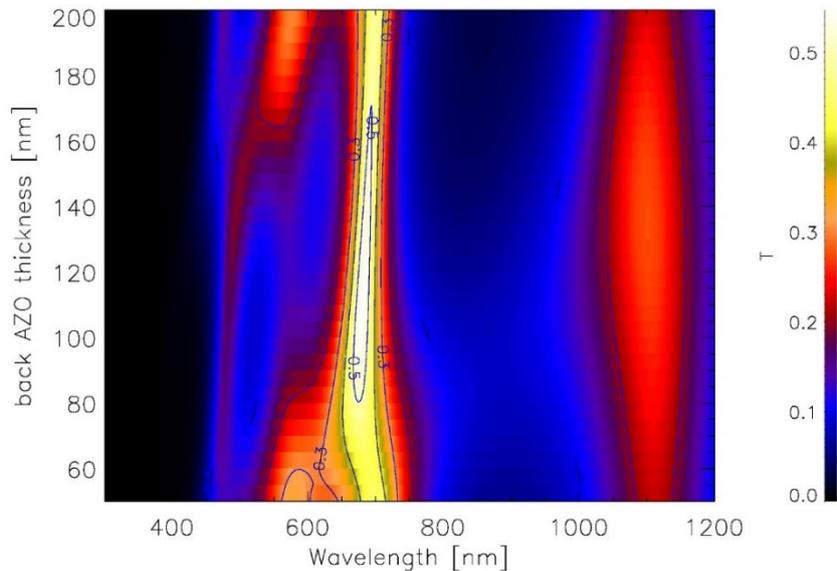


Figura 2.2.8. Simulazione della trasmittanza della struttura spettralmente selettiva AZO(180 nm)/a-Si:H(70 nm)/MOMO, al variare dello spessore dello strato finale di AZO, avendo fissato lo strato intermedio a 330 nm e Ag a 12 nm.

I risultati dello studio dell’effetto dello spessore degli strati di Ag sono mostrati in figura 2.2.9. Come si può notare, spessori elevati di Ag (30 nm, curva nera in figura) affinano i picchi di trasmittanza e squadrano la curva tra i picchi, ma non sono fattibili in quanto abbattano drasticamente la trasmittanza. I film di metallo nella struttura devono essere sufficientemente sottili per garantire adeguata trasparenza, ma non è raccomandabile scendere sotto la decina di nm per garantire un film continuo (film di Ag di qualche nm tipicamente crescono “a isole”). Inoltre, spessori non troppo bassi sono utili per la componente fotovoltaica 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 definitiva, mentre agendo sugli spessori degli strati di AZO del MOMO è possibile regolare la posizione dei picchi di trasmittanza, lo spessore degli strati di Ag è il parametro da variare per regolare il rapporto tra luce riflessa e trasmessa, volendo favorire il fotovoltaico rispetto alla fotosintesi o viceversa. Valori intorno a 12-15 nm rappresentano un buon compromesso. Si è infine selezionato il valore di 12 nm, che dà luogo a picchi di trasmittanza simulata intorno al 17% (picco posizionato a 480 nm) e 54% (picco posizionato a 680 nm), avendo fissato gli spessori dei due strati di AZO a 330 nm e 100 nm rispettivamente per lo strato intermedio e l'esterno. Va precisato che la trasmittanza simulata non tiene conto della prima riflessione sulla superficie frontale del vetro in quanto il vetro è considerato come mezzo semi-infinito, per cui bisogna attendersi dei valori ridotti approssimativamente di un 4%. Perdite ottiche per assorbimento da parte delle interfacce e da possibili effetti plasmonici da Ag granulare possono contribuire ulteriormente al *mismatch* in intensità tra simulazione ed esperimento. La progettazione ottica va però letta soprattutto in termini di previsione della posizione dei picchi di trasmittanza, da adattare allo spettro di assorbimento delle colture selezionate (*Arabidopsis* nel nostro caso).

Si noti infine che la curva di trasmittanza dell'intera struttura progettata (figura 2.2.9) presenta anche un picco nell'IR con intensità di circa 25% posizionato a 1100 nm. A parte la presenza di questo picco, la trasmittanza in questo range spettrale è notevolmente ridotta, con possibili benefici in termini di stabilizzazione termica nelle applicazioni in serra soprattutto in regioni e stagioni con climi molto caldi.

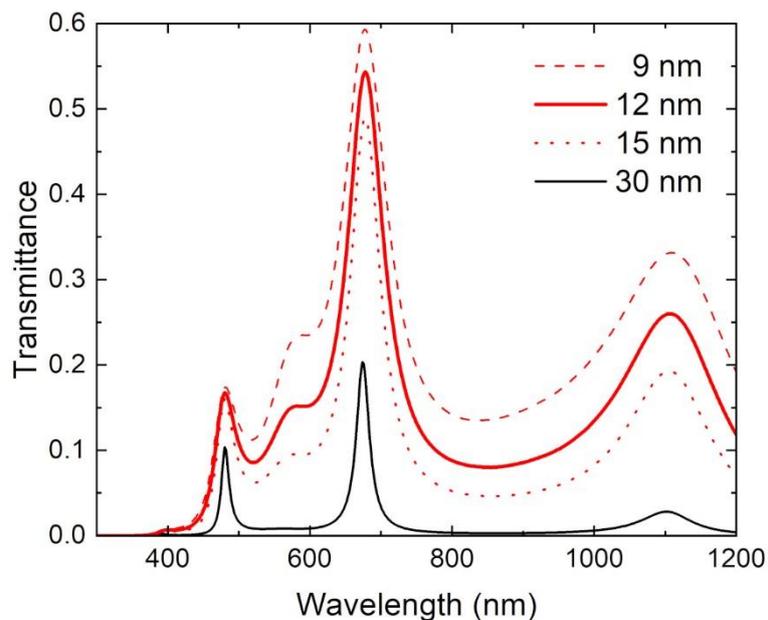


Figura 2.2.9. Simulazione della trasmittanza della struttura spettralmente selettiva AZO(180nm)/a-Si:H(70nm)/MOMO, con spessori ottimali di AZO, al variare dello spessore degli strati di Ag (9, 12, 15 e 30 nm).

2.2.3 Fabbricazione e caratterizzazione di campioni

Sulla base della progettazione effettuata, sono stati fabbricati e caratterizzati diversi campioni su substrati di vetro Corning Eagle di area 10x10 cm² e spessore 1.1 mm, secondo la struttura schematizzata in figura 2.2.10. Tra le tipologie di campioni testate è incluso il solo riflettore posteriore depositato su vetro. È stata effettuata una caratterizzazione approfondita anche per step intermedi a valle della deposizione dei vari componenti per un controllo diretto dei vari strati aggiunti nonché per risolvere alcune criticità.

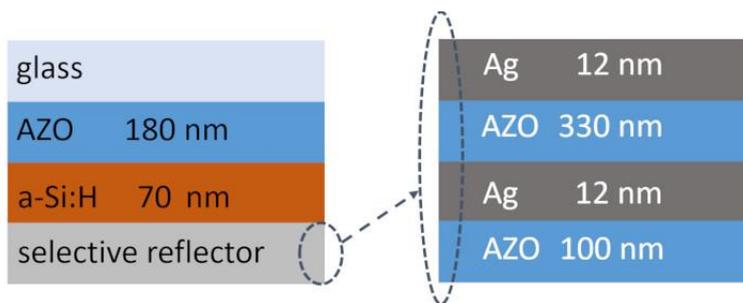


Figura 2.2.10 Schema della cella solare spettralmente selettiva progettata con gli spessori ottimizzati (non in scala).

Gli strati in AZO sono stati fabbricati mediante processo di RF-Sputtering (sistema multitarget MRC, mod.643) a frequenza standard di 13.56 MHz con gas Argon a partire da un target di AZO (ZnO:Al₂O₃ al 2% in peso) ad una pressione di processo di 6 mTorr. Nel sistema MRC il campione scorre periodicamente davanti al target ad una velocità che, unitamente alla potenza del segnale RF, determina il rate di crescita del film di AZO. Quest'ultimo è stato valutato dalla misura dello spessore finale e dal tempo di deposizione che a sua volta dipende ovviamente dal numero di step e dalla velocità di movimento del campione, parametri peraltro indipendenti. Il processo di deposizione è stato ottimizzato utilizzando un segnale RF con potenza pari a 1kW (densità di circa 2.2 W/cm²) ed una velocità di scorrimento del campione intorno a 50 cm/min, determinando infine un rate di crescita di circa 0.85 nm/s. Tutti gli strati in AZO sono stati realizzati con la medesima potenza RF e pressione di Argon, variando solo opportunamente il numero di step e la velocità di scorrimento per ottenere lo spessore desiderato. I film risultanti hanno caratteristiche opto-elettroniche appropriate per applicazioni nel fotovoltaico grazie a una resistività di circa 1.2 x 10⁻³ Ohm*cm e alle costanti ottiche già riportate in figura 2.2.4.

Gli strati ultrasottili in Argento sono stati realizzati per DC-Sputtering nello stesso sistema di deposizione, con potenza DC di 300 W e pressione di Argon pari a 10 mTorr. Dopo vari tentativi si è stabilito che l'adesione del film di Ag, depositato sia su a-Si:H che su AZO, risulta migliore se il processo di crescita consiste di un singolo step con velocità di scorrimento di 104 cm/min.

I film di a-Si:H sono stati fabbricati per PECVD (Plasmalab800+, Oxford Inst.) utilizzando solo gas Silano (SiH₄) 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/cm²). La valutazione dello spessore finale (70 nm) tramite ellissometria ed il tempo di deposizione di 275 s comportano un rate di crescita di 0.25 nm/s.

In pratica, per la realizzazione dell'intero campione, viene depositato per RF-Sputtering il primo strato di AZO su vetro che successivamente viene collocato sull'elettrodo orizzontale nel sistema PECVD. È risultato conveniente per la riproducibilità del processo attendere il tempo necessario affinché il campione "vetro+AZO" termalizzi all'interno del reattore, considerata anche la bassa conducibilità termica del vetro, e che inoltre si raggiunga un vuoto iniziale prima del processo inferiore a 3 x 10⁻⁶ mbar.

Il campione viene quindi trasferito nuovamente nel sistema di sputtering e prima delle successive deposizioni viene sottoposto ad una pressione minore di 10⁻⁶ mbar. Sono stati realizzati inizialmente vari campioni sia per determinare con più precisione il tasso di crescita dei vari costituenti del MOMO sia per comprendere le possibili soluzioni ad evidenti fenomeni di spellicolamento. In particolare si è notato che a valle della deposizione dello strato più spesso di AZO nel MOMO, la successiva ed immediata deposizione dello strato di Ag comportava uno spellicolamento già a partire dall'estrazione del campione dal sistema, esposto quindi ad aria a pressione ambiente. Il fenomeno è probabilmente legato all'alta temperatura in libera evoluzione determinata dal lungo tempo richiesto per la deposizione del film di AZO (la deposizione è effettuata nominalmente a temperatura ambiente ma il processo di sputtering è di per sé esotermico). Il problema è stato risolto lasciando raffreddare il campione in vuoto per diverse ore prima della deposizione in sequenza degli ultimi due strati (Ag ed AZO).

L'aspetto più critico, come evidenziato nella sezione precedente (2.2.2), è la necessità di controllare lo spessore dell'AZO intermedio del MOMO sull'ordine del nm. È stata innanzitutto effettuata una taratura preliminare, valutando la posizione del picco rosso di trasmittanza ottenuta sperimentalmente al variare

dello spessore nominale dello strato intermedio di AZO nel MOMO. Si è osservato che in generale l'andamento sperimentale riproduce quello atteso da simulazione, ma in alcuni casi, per problemi durante la deposizione di questo strato relativamente spesso, lo spessore reale può discostarsi molto da quello nominale e/o le proprietà ottiche del materiale AZO possono risultare leggermente differenti comportando un discostamento notevole dalle previsioni teoriche. Sono state quindi effettuate diverse deposizioni su spessori dell'ordine del valore target con rispettivo feedback da analisi ellissometrica per definire aspetti tecnico-pratici del protocollo di fabbricazione.

Risolte le criticità riscontrate, sono stati fabbricati e caratterizzati campioni sia della tipologia riflettore MOMO che pseudo-cella completa. Relativamente al solo MOMO su vetro, da un punto di vista elettrico l'intera struttura ha una *sheet resistance*, misurata tramite sonda a quattro punte, di $\sim 2 \text{ Ohm/sq}$. Tale valore è pienamente compatibile con il ruolo simultaneo di elettrodo giocato dal riflettore una volta applicato nella cella solare. Da un punto di vista ottico la funzione di riflettore selettivo semitrasparente è evidente già da ispezione visiva, come dimostrano le fotografie in trasmissione e riflessione in figura 2.2.11. L'aspetto visivo di trasmissione nel blu e nel rosso e di elevata componente riflessa nel verde sono verificati e quantificati nelle curve di trasmittanza e riflettanza misurate con spettrofotometro (figura 2.2.12). È stata quindi provata sperimentalmente l'adeguatezza del MOMO progettato all'applicazione in esame in cui si vuole utilizzare il componente sul retro dello strato attivo della cella solare per riflettere indietro appunto la componente verde della radiazione, lasciando passare specifiche bande nel blu e nel rosso.

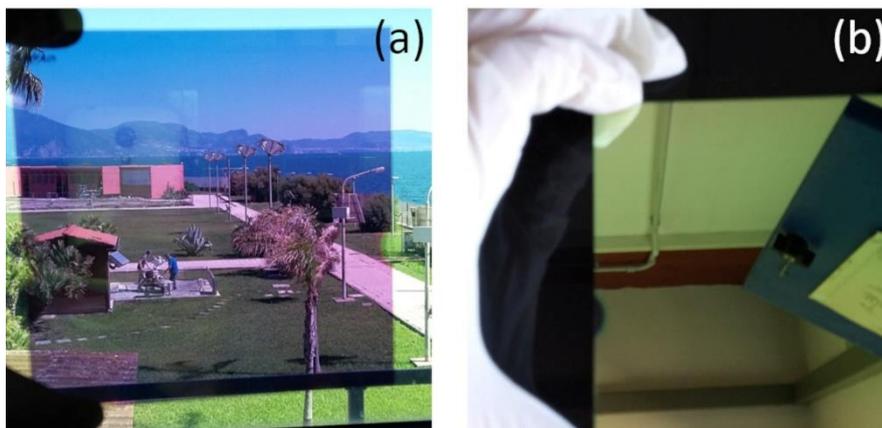


Figura 2.2.11 Fotografie di un campione MOMO su vetro in trasmissione (a) e riflessione (b).

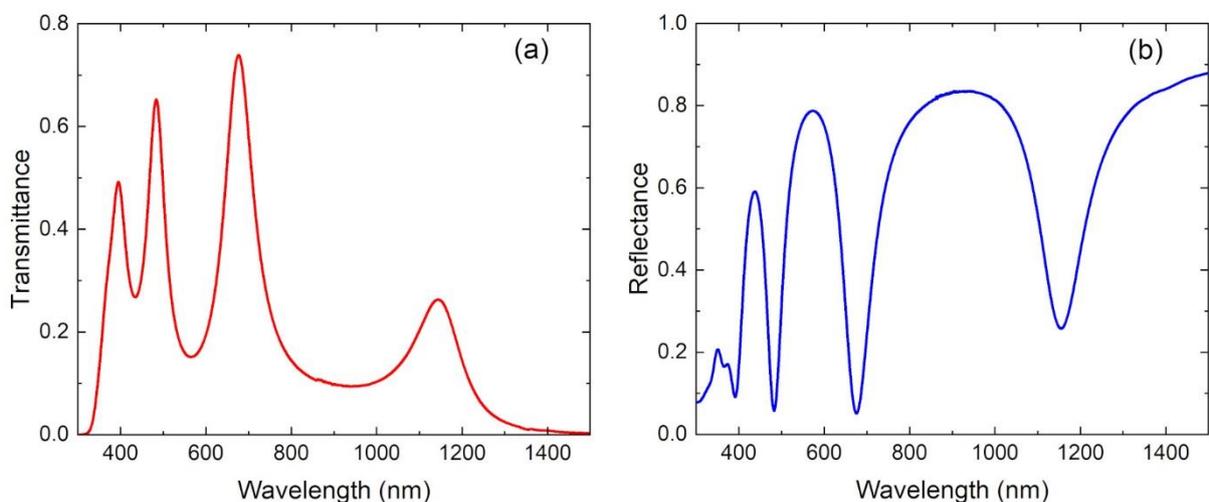


Figura 2.2.12 Trasmittanza (a) e riflettanza (b) del multistrato MOMO di figura 2.2.11 misurate con spettrofotometro.

Grazie allo studio sperimentale per step intermedi della struttura completa è stato poi possibile verificare come agiscono otticamente i vari componenti della struttura seguendo l'evoluzione della trasmittanza man mano che vengono depositati i vari strati (figura 2.2.13 a), a partire dall'AZO frontale di 180 nm (curva nera) per poi passare al bilayer AZO/a-Si:H una volta depositato lo strato di silicio di 70 nm (curva blu) e per finire con la struttura completa che include il riflettore semitrasparente selettivo (curva rossa). La caratterizzazione ottica completa dell'intera struttura (curve di riflettanza dalle due facce insieme alla trasmittanza) è poi riportata in figura 2.2.13b. Per un confronto diretto visivo in figura 2.2.14 sono riportate le foto dei campioni.

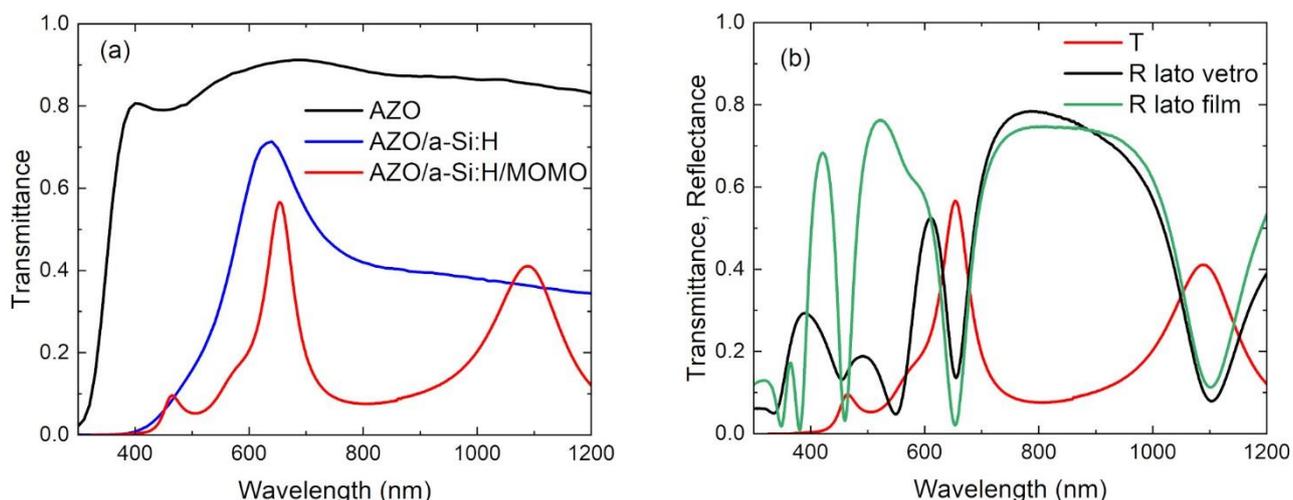


Figura 2.2.13 Evoluzione della trasmittanza della pseudo-cella solare spettralmente selettiva nei vari step fabbricativi (a); spettri di trasmittanza e riflettanza (lato film e lato vetro) della struttura completa (b).

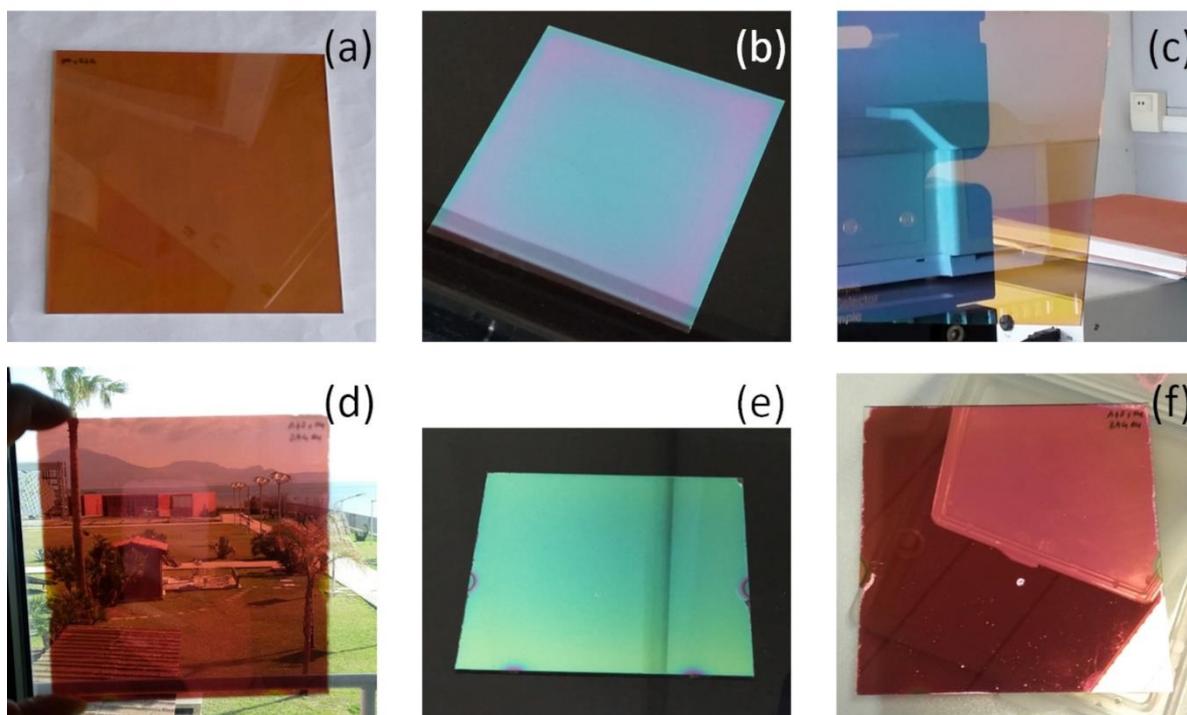


Figura 2.2.14 Fotografie del campione bilayer AZO/a-Si:H su vetro in trasmissione (a), riflessione (b) e parziale trasmissione/riflessione (c) e sulla seconda riga foto dello stesso campione una volta completata la deposizione del riflettore selettivo MOMO, in trasmissione (d), riflessione dal lato dei film (e) e riflessione dal lato del vetro (f).

Più in dettaglio, in figura 2.2.14 sono riportate le foto in trasmissione e riflessione del bilayer iniziale AZO/a-Si:H su vetro (pannelli a,b,c) e dell'intera struttura a valle della deposizione del riflettore selettivo MOMO (d,e,f), che consentono di osservare visivamente i cambiamenti nel campione durante gli step di fabbricazione. In particolare si può notare come i diversi colori del campione completo in riflessione (figura 2.2.14 e,f) sono verificati nelle curve di riflettanza (figura 2.2.13 b), mentre il colore rossiccio in trasmissione è essenzialmente dovuto al picco principale di trasmittanza posizionato appunto nel range del rosso (figura 2.2.13 b).

Una volta definiti i protocolli sperimentali e verificata l' idoneità dei multistrati definiti, sono stati realizzati vari campioni poi forniti al MUSA per gli esperimenti relativi agli effetti sulla fotosintesi previsti nella linea LA2.18. I campioni, nominalmente equivalenti, presentano la variabilità di trasmittanza mostrata in figura 2.2.15, legata ai limiti intrinseci sul controllo dello spessore fisico del middle AZO rispetto al valore designato. Tale variabilità sperimentale è comunque pienamente compatibile con lo spettro di assorbimento dei pigmenti delle piante.

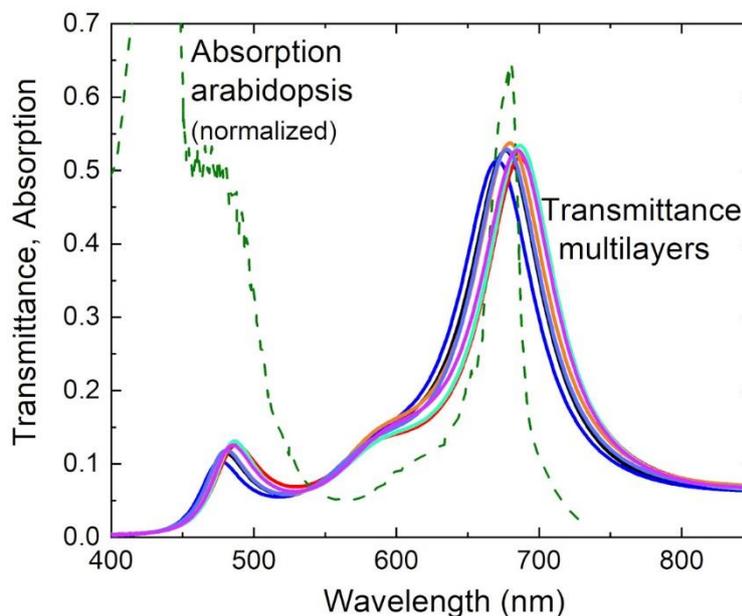


Figura 2.2.15 Spettri di trasmittanza di una serie di campioni nominalmente identici di pseudo-celle spettralmente selettive (spessori nominali di figura 2.2.10) e confronto con lo spettro di assorbimento normalizzato dell'Arabidopsis.

3 Conclusioni

Nella presente annualità è stata condotta un'attività di ricerca sull'utilizzo del fotovoltaico negli involucri trasparenti, e in particolare nelle serre, sotto due possibili punti di vista, su scala media e su scala piccola. Su scala media, a valle di uno studio specifico e di una ricerca di mercato sui principali moduli fotovoltaici adatti all'impiego in combinazione con la crescita di specie vegetali, è stato individuato un componente innovativo sviluppato dalla ditta svizzera Insolight (THEIA pre-series module) basato su celle fotovoltaiche in silicio con delle lenti ad inseguimento integrate e una tecnologia di micro-tracking brevettata. Il modulo si presta ad essere integrato in un involucro, ed è quindi da considerare equivalente ad una soluzione BIPV. Si è stipulato un accordo di collaborazione e ricerca con la ditta produttrice e si è proceduto al progetto di una serra di dimensioni in pianta di 6m x 3m, il cui disegno è stato poi fornito a MUSA che ne cura la realizzazione e il funzionamento presso i giardini della Reggia borbonica di Portici.

Su piccola scala (scala di laboratorio), è stato esplorato un approccio tecnologico innovativo che mira all'uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi, facendo ricorso alla tecnologia fotovoltaica semitrasparente a film sottile di silicio e al concetto di riflettori spettralmente selettivi tipo Fabry-Perot. Questo approccio, ancora in fase di proof-of-concept, consentirebbe almeno in linea di principio di sfruttare l'intera superficie della copertura della serra. Nei laboratori ENEA sono stati progettati, fabbricati e

caratterizzati dai precursori di moduli fotovoltaici semitrasparenti in grado di trasmettere porzioni dello spettro solare nel blu e nel rosso, utili alle piante per il processo di fotosintesi, mentre il resto della radiazione può essere utilizzato dalla cella solare. I campioni realizzati sono multistrati di film sottili su substrato di vetro da 10 x 10 cm² che simulano celle solari funzionali. La sequenza degli strati è vetro/AZO/aSi:H/Ag/AZO/Ag/AZO. Tramite simulazioni ottiche, è stato studiato l'effetto degli spessori dei vari strati e sono stati definiti i valori ottimali. Alle simulazioni è seguita l'indagine sperimentale di fabbricazione e caratterizzazione. Un set di campioni è stato poi fornito al MUSA per poter valutare mediante studi di crescita di piante la fattibilità dell'applicazione combinata integrata fotovoltaico/fotosintesi. Va sottolineato che la tecnologia sotto indagine è promettente, in quanto consente di avere una buona trasmittanza nel rosso e una seppur minima trasmittanza anche nel blu, senza dover agire sul materiale attivo della cella (come accade invece per l'approccio basato sul fotovoltaico organico). Inoltre si fa uso di tecniche di deposizione (PECVD e sputtering) ben consolidate e scalabili su larga area e in prospettiva si può contare sulla tecnologia matura di produzione industriale dei moduli a film sottile di silicio.

4 Riferimenti bibliografici

- [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] M. E. Loik, S. A. Carter, G. Alers, C. E. Wade, D. Shugar, C. Corrado, D. Jokerst and C. Kitayama, "Wavelength-Selective Solar Photovoltaic Systems: Powering Greenhouses for Plant Growth at the Food-Energy-Water Nexus," *Earth's Future*, vol. 5, pp. 1044-1053, 2017.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] L. Mercaldo, I. Usatii, E. Esposito, P. Delli Veneri, J.-W. Schüttauf, E. Moulin, F.-J. Haug, C. Zhang e M. Meier, «Metal versus dielectric back reflector for thin-film Si solar cells with impact of front electrode surface texture», L.V. Mercaldo, I. Usatii, E.M. Esposito, P. Delli Veneri, J.-W. Schüttauf, E. Moulin, F.-J. Haug, C. Zhang, M. Meier,,» *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 24, p. 968–977, 2016.
- [6] C. Mennucci, C. Martella, L. Mercaldo, I. Usatii, P. Delli Veneri e 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.
- [7] 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.
- [8] "Art 14, Premi per specifiche tipologie e applicazioni di impianti fotovoltaici, Decreto 5 maggio 2011, Incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti solari fotovoltaici," *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 15 aprile 2011.
- [9] 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.
- [10] 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*, in press.

- [11] A. Yano, M. Kadowaki, A. Furue, N. Tamaki, T. Tanaka, E. Hiraki, Y. Kato, F. Ishizu and S. Noda, "Shading and Electrical Features of a Photovoltaic Array Mounted inside the Roof of an East-West Oriented Greenhouse," *Biosyst. Eng.*, vol. 106, pp. 367-377, 2010.
- [12] A. Marucci and A. Cappuccini, "Marucci, A.; Cappuccini, A. Dynamic Photovoltaic Greenhouse: Energy Balance in Completely Clear Sky Condition during the Hot Period," *Energy*, vol. 102, pp. 302-312, 2016.
- [13] «IEC 63092-1:2020, Photovoltaics in buildings - Part 1: Requirements for building-integrated photovoltaic modules».
- [14] «Norma UNI 8290 "Edilizia residenziale. Sistema tecnologico"».
- [15] A. Scognamiglio, P. Bosisio and V. D. Dio, *Fotovoltaico negli edifici*, Milano: Edizioni Ambiente, ISBN 978-88-6627-025-6, 2013.
- [16] T. E. Kuhn, C. Erban, M. Heinrich, J. Eisenlohr, F. Ensslen and D. H. Neuhaus, "Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV)," *Energy and Buildings*, vol. 231, p. 110381, 2021.
- [17] A. Scognamiglio, "A Trans-Disciplinary Vocabulary for Assessing the Visual Performance of BIPV," *Sustainability*, vol. 13, no. 10, p. 5500, 2021.
- [18] L. Clementson and B. Wojtasiewicz, "Dataset on the absorption characteristics of extracted phytoplankton pigments," *Data in brief*, vol. 24, pp. 103875 (1-7), 2019.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Y.-T. Yoon and S.-S. Lee, "Transmission type color filter incorporating a silver film based etalon," *Optics Express*, vol. 18, p. 5344–5349, 2010.
- [22] «<https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/support-and-infrastructure/software/data-analysis/OurSoftware/xop2.4/extensions.html>».