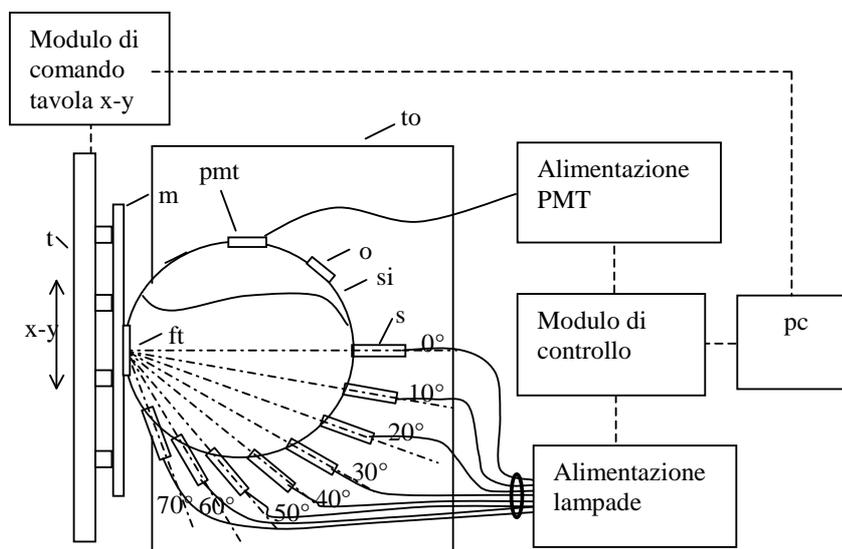


“RIFLETTOMETRO A SORGENTI MULTIPLE IMPULSATE PER LA MAPPATURA OTTICA DI UNA SUPERFICIE”

A. Parretta.

SOMMARIO

E' descritto un metodo innovativo non distruttivo ed un apparato sperimentale finalizzato alla mappatura ottica di una superficie di grandi dimensioni, ad esempio di moduli fotovoltaici o finestre ottiche impiegate nel campo delle fonti rinnovabili dell'energia. Il metodo consiste nell'illuminare una porzione limitata della superficie di test con un fascio luminoso collimato e impulsato, incidente ad un angolo variabile, ad esempio tra 0° e 70° , nel misurare la riflettanza emisferica totale o diffusa, nel traslare il campione sul piano x-y e nel costruire una mappa di riflettanza ottica della superficie relativa ad ogni angolo d'incidenza. Il metodo è particolarmente utile per l'analisi delle proprietà ottiche di moduli fotovoltaici al silicio cristallino e per l'analisi delle proprietà ottiche ed elettriche di moduli fotovoltaici integrati (a-Si, CIS).



DESCRIZIONE

Scopo della presente invenzione è quello di presentare un metodo innovativo, e il relativo apparato sperimentale, per la mappatura ottica di una superficie piana di grandi dimensioni, a partire da misure locali della riflettanza direzionale/emisferica, totale e diffusa, risolte nell'angolo d'incidenza. Il metodo è di tipo non distruttivo e consente la caratterizzazione ottica di campioni piani di qualsiasi dimensione. L'invenzione si applica efficacemente alla misura delle proprietà ottiche di riflettanza di campioni fotovoltaici (FV) di grandi dimensioni e all'analisi delle proprietà ottico-elettriche di moduli FV integrati. Il campo di applicazione della presente invenzione non è limitato al settore fotovoltaico, ma comprende anche tutti quei settori nei quali sia richiesta la conoscenza delle proprietà ottiche riflesse di superfici di piccole o grandi dimensioni, tra i quali il settore dei beni culturali.

L'apparato sperimentale, nella configurazione qui presentata come esempio, comprende una sfera integratrice di grandi dimensioni, ad esempio 40 cm di diametro, equipaggiata con una batteria di lampade impulsate (flash), ciascuna orientata rispetto al campione in modo da fornire un fascio luminoso collimato incidente ad un angolo compreso tra 0° e 70° con intervalli di 10° . Associando alla sfera un sistema di movimentazione del campione sul piano x-y, controllato da un computer, è possibile effettuare una mappatura veloce del campione, ricavando la distribuzione spaziale della riflettanza per ciascuno degli angoli d'incidenza. Il metodo, attraverso la misura della riflettanza media locale della superficie e della sua distribuzione spaziale ai vari angoli d'incidenza, diventa particolarmente utile per investigare l'omogeneità ottica del campione e, nel caso particolare di un dispositivo fotovoltaico, le sue proprietà d'intrappolamento della luce, oppure lo stato di degrado ottico dei materiali incapsulanti o dei materiali costituenti il dispositivo a semiconduttore. Nel caso invece di dispositivi fotovoltaici integrati a film sottile (a-Si, CIS, ecc.), il metodo è anche in grado di associare all'analisi ottica del campione quella elettrica prodotta per illuminazione locale della singola cella. In tal modo è possibile investigare l'omogeneità dei singoli strati della struttura del dispositivo, l'omogeneità del processo di deposizione e l'efficacia degli strati riflettenti presenti sul retro della cella. L'insieme dei dati delle proprietà ottico-elettriche esaminate col seguente metodo può essere successivamente utilizzato in appropriati modelli di simulazione, allo scopo di prevedere il suo comportamento in condizioni di funzionamento "outdoor" e quindi ricavare le effettive prestazioni elettriche. Il metodo quindi è in grado di definire con accuratezza le perdite energetiche di un modulo

FV previste sul campo, funzioni delle particolari condizioni meteo-radiometriche, rispetto alle condizioni standard (STC). Grazie all'uso di sorgenti impulsate controllate elettronicamente e all'uso di un sistema automatico di movimentazione del campione, il metodo proposto è in grado di effettuare caratterizzazioni veloci e accurate su grandi aree. L'analisi dei dati dal punto di vista statistico consente inoltre di effettuare un feedback sul processo di fabbricazione del dispositivo per ottimizzarne le prestazioni.

Il metodo risulta utile anche all'analisi in riflettanza di specchi o lastre impiegate, per le loro proprietà ottiche, nei settori delle fonti rinnovabili e nell'edilizia, per estrarre informazioni sulla omogeneità e adeguatezza delle loro proprietà ottiche risolte nell'angolo d'incidenza della luce. Con una opportuna scelta della lunghezza d'onda del fascio incidente, il metodo può essere esteso senza difficoltà al settore dei beni culturali per l'indagine nel campo del visibile e del vicino infrarosso delle proprietà ottiche superficiali o degli strati immediatamente sottostanti la superficie, allo scopo di esaminare lo stato di conservazione di dipinti o per trarne altri tipi di informazione.

STATO DELLA TECNICA PER IL SETTORE DELL'INVENZIONE

La caratterizzazione ottica non distruttiva di campioni fotovoltaici di grandi dimensioni è stato oggetto di un'ampia investigazione con tecniche innovative basate sull'uso di sfere integratrici, tecniche tutte sviluppate nei laboratori di ottica dell'ENEA di Portici. La tecnologia scaturita da quegli studi consente di effettuare misure ottiche sofisticate su campioni fotovoltaici cambiando praticamente tutti i parametri ottici fondamentali. A tale proposito, la presente invenzione, per la comune tematica della caratterizzazione ottica di superfici FV, farà esplicito riferimento ai metodi e alle apparecchiature che sono oggetto delle invenzioni seguenti: *"Dispositivo per la esecuzione non distruttiva di misure di riflettanza spettrale, globale, speculare e diffusa, ad angolo di incidenza variabile, nonché di trasmittanza, per celle solari e moduli fotovoltaici"*, Application N. RM 97 A 000676, 5 November 1997; *"Apparecchio e metodo per la misura differenziale della riflettanza di una superficie"*. Application N. RM 99 A 000656, 25 October 1999; *"Apparecchio e metodo per la caratterizzazione ottica in luce diffusa di materiali e dispositivi fotovoltaici"*, Application N. RM 2000 A 000634, 1

December 2000; “Apparecchio e metodo per la misura simultanea della corrente e della riflettanza di una cella solare”, Application N. RM 2001 A 000321, 8 June 2001.

Pur disponendo di un ampio spettro di tecnologie come dal precedente elenco, non si ha ancora la possibilità di svolgere una caratterizzazione ottica completa di dispositivi FV di grandi dimensioni in tempi relativamente brevi con una tecnica espressamente dedicata alle larghe aree. Una tecnologia di questo tipo è altamente auspicabile per essere impiegata, ad esempio, nella fase finale di un processo di fabbricazione di moduli FV, al fine di analizzarne le proprietà ottiche e la loro distribuzione spaziale. Nel settore tecnologico dei moduli FV commerciali al Silicio monocristallino (single-Si) e multicristallino (multi-Si), esiste già un criterio di selezione delle singole celle e di raggruppamento in classi in funzione della potenza erogata alle condizioni STC. In vista di questa pre-selezione, e tenendo conto della stretta relazione tra proprietà di assorbimento della luce e di potenza elettrica erogata, mappe ottiche di moduli realizzate con celle pre-selezionate non costituiscono un'importante informazione aggiuntiva in termini di omogeneità spaziale rispetto a quella già fornita dalla classe di appartenenza. Il discorso cambia invece se si tiene conto dell'influenza che il materiale incapsulante (tipicamente EVA) può avere sulle proprietà ottiche del modulo FV. La degradazione del materiale incapsulante nei moduli FV al Silicio cristallino esposti alla radiazione solare per molti anni è stato da noi investigata in un recente lavoro [1]. Nei casi di forte degradazione, si è notata una disomogeneità ottica della superficie con la comparsa di zone diversamente colorate, e la riduzione sensibile delle prestazioni elettriche. A tal fine, una mappatura ottica completa di questi moduli, in funzione sia la lunghezza d'onda che l'angolo d'incidenza della luce, confrontata con la mappatura ottica di moduli equivalenti non esposti alla radiazione solare, riveste una particolare importanza dal punto di vista analitico.

Uno degli scopi principali della caratterizzazione ottica di moduli FV, prima dell'installazione su campo, è quella di valutarne le perdite ottiche relative alle condizioni standard (STC). Le perdite ottiche costituiscono uno di cinque meccanismi di perdita energetica cui un modulo FV è soggetto quando è esposto alla radiazione solare naturale [2]. Esse devono essere valutate per diversi angoli d'incidenza della luce e quindi l'apparato PROM risulta particolarmente adeguato per questo tipo di analisi.

Un discorso particolare meritano i moduli FV integrati a film sottile (CIS, CdTe, a-Si, ecc.). Essi sono prodotti depositando direttamente gli strati del dispositivo con tecniche di larga area (ad esempio

tecniche in plasma) che non presentano problemi legati all'incapsulante come nel caso dei moduli al Silicio cristallino. Per questi moduli integrati, il controllo dell'omogeneità ottica è particolarmente importante. La mappatura ottica in riflessione, da qui in poi brevemente riferita come tecnica ORM (Optical Reflectance Mapping) [3], fornisce la riflettanza emisferica locale, direttamente legata alle prestazioni ottiche del modulo, la sua deviazione standard e quindi l'omogeneità ottica della superficie. La deviazione standard è importante nei moduli integrati, dove la connessione tra celle è tipicamente di tipo seriale, e la corrente del dispositivo completo è condizionata dalla corrente della cella meno efficiente. In questo caso essa fornisce informazioni sulla ridotta efficienza ottica ed elettrica del dispositivo in conseguenza della sua disomogeneità nella raccolta della luce. La mappa ottica fornisce altresì informazioni sulla omogeneità dei singoli strati del dispositivo e quindi sulla omogeneità del processo di deposizione degli stessi strati. Essa fornisce quindi un feedback importante sul processo di deposizione ai fini di una sua ottimizzazione. La mappatura ottica, se associata ad una mappatura elettrica simultanea, ed inoltre se effettuata in congiunzione con un'analisi di tipo spettrale, costituisce, come è evidente per qualunque esperto del settore, uno strumento efficacissimo per analizzare in dettaglio il dispositivo integrato, ovvero per indagare sullo spessore e struttura dei singoli strati attivi e sull'efficacia degli strati riflettenti metallici o dielettrici posti sul retro del dispositivo.

I moduli FV attuali presentano perdite ottiche, in luce collimata quasi-normale, che, per i moduli integrati possono raggiungere valori del 20-30 % come risulta da nostri precedenti lavori [3]. Questi valori si traducono direttamente in termini di potenza elettrica non erogata dalla cella. Questo aspetto da solo giustifica uno sforzo per sviluppare nuove tecnologie che diano in tempi brevi, sul prodotto tecnologicamente finito, tutte le informazioni ottiche ed elettriche utili al suo miglioramento.

In risposta a queste esigenze, la presente invenzione si propone di offrire uno strumento, espressamente un riflettometro impulsato a sorgenti multiple, progettato e realizzato allo scopo di caratterizzare velocemente un modulo FV per l'intera sua superficie. Uno strumento del genere risulterebbe molto efficace al termine di una linea di fabbricazione di moduli FV e quindi di grande utilità tecnologica.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELLE FIGURE

Figura 1. Schema di principio della misura della riflettanza emisferica totale con l'apparato PROM (Pulsed Reflectometer for Optical Mapping). La zona azzurra mostra il piano equatoriale della sfera (si), che contiene il piano d'incidenza di tutti i fasci collimati provenienti dalle sorgenti (s). La zona gialla mostra la finestra di test (ft), all'interno della quale si formano le aree illuminate, di forma ellittica, prodotte dalle varie sorgenti e la cui estensione cambia a seconda dell'angolo d'incidenza θ . In rosso è mostrato un fascio luminoso (inc), proveniente da una delle sorgenti, incidente sul campione (c) con angolo θ , il quale produce una componente diffusa (diff) e una componente speculare (spec). La componente speculare è intercettata dalla finestra (fout) chiusa (colorata di bianco) corrispondente all'angolo θ e riflessa all'interno della sfera. Ogni sorgente (s) è costituita da una lampada a flash (fl) e da un'ottica di focalizzazione (of).

Figura 2. Schema di principio della misura della riflettanza emisferica diffusa con l'apparato PROM. In rosso è mostrato il fascio incidente (inc) sul modulo (m) con angolo θ , il quale produce una componente diffusa (diff) e una componente speculare (spec). La componente speculare fuoriesce da una delle finestre (fout) mantenute appositamente aperte (colorate di grigio).

Figura 3. Schema generale del riflettometro impulsato PROM nella configurazione per misure di riflettanza emisferica totale o diffusa. La figura mostra l'unità di controllo che gestisce l'alimentazione delle lampade flash e la rivelazione del segnale da parte del fotomoltiplicatore, e l'unità di controllo della tavola x-y per la movimentazione del campione. Entrambe queste unità sono sottoposte alla gestione di un software dedicato.

Figura 4. Spaccato di un sistema sorgente impulsato impiegato nell'apparato PROM.

Figura 5. Spaccato dell'assorbitore di luce impiegato nell'apparato PROM.

Figura 6. Supporto per la sorgente impulsata.

Figura 7. Fotomoltiplicatore impiegato come fotorivelatore nell'apparato PROM.

Figura 8. Schema generale dei collegamenti dell'alimentatore per le lampade e del fotometro tra di loro e con le altre parti del sistema.

Figura 9. a) Foto della cella solare al silicio monocristallino, con antiriflesso blu e con griglia, incapsulata nel modulo Eurosolare speciale; b) mappa ottica "ESSingleblugrid10°" del fattore di riflettanza misurato in luce bianca ad un angolo d'incidenza di 10°; c) funzione di distribuzione del fattore di riflettanza.

Figura 10. a) Foto della cella solare al silicio multicristallino, con antiriflesso violetto e con griglia, incapsulata nel modulo Eurosolare speciale; b) mappa ottica “ESmultiviogrid10°” del fattore di riflettanza misurato in luce bianca ad un angolo d’incidenza di 10°; c) funzione di distribuzione del fattore di riflettanza.

Figura 11. a) Foto della cella solare al silicio monocristallino, con antiriflesso blu e senza griglia, incapsulata nel modulo Eurosolare speciale; b)-f) mappe ottiche del fattore di riflettanza della cella in a), misurato in luce bianca agli angoli d’incidenza: $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ e 70° .

Figura 12. Dati sperimentali di trasmittanza relativa, $\alpha(\theta)$, misurata per la cella al silicio monocristallino priva di griglia della Fig. 11, confrontati con le curve teoriche di $\alpha(\theta)$, calcolate a partire dalle equazioni di Fresnel, e riferentesi ad un dielettrico omogeneo semiinfinito con indice di rifrazione variabile da 1.5 a 3.5.

Figura 13. a) Foto della cella solare al silicio multicristallino, con antiriflesso azzurro e senza griglia, incapsulata nel modulo Eurosolare speciale; b)-f) mappe ottiche del fattore di riflettanza della cella in a), misurato in luce bianca agli angoli d’incidenza: $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ e 70° .

Figura 14. Dati sperimentali di trasmittanza relativa, $\alpha(\theta)$, misurata per la cella al silicio multicristallino priva di griglia della Fig. 13, confrontati con le curve teoriche di $\alpha(\theta)$, calcolate a partire dalle equazioni di Fresnel, e riferentesi ad un dielettrico omogeneo semiinfinito con indice di rifrazione variabile da 1.5 a 3.5.

Figura 15. a) Foto di una cella solare al silicio multicristallino, con antiriflesso azzurro, del modulo Pragma (mod. 72SL) non esposto alla radiazione solare; b) mappa ottica del fattore di riflettanza della cella in a), misurato in luce bianca all’angolo d’incidenza $\theta = 60^\circ$; c) funzione di distribuzione del fattore di riflettanza.

Figura 16. a) Foto di una cella solare al silicio multicristallino, con antiriflesso azzurro, del modulo Pragma (mod. 72SL) esposto alla radiazione solare; b) mappa ottica del fattore di riflettanza della cella in a), misurato in luce bianca all’angolo d’incidenza $\theta = 60^\circ$; c) funzione di distribuzione del fattore di riflettanza.

Figura 17. a), c), e) Immagini riprese con videocamera Vidicon alla luce di laboratorio di tre generiche celle del modulo Pragma non degradato (non esposto alla radiazione solare). b), d), f) Immagini di elettroluminescenza riprese con videocamera Vidicon al buio di tre generiche celle del modulo Pragma non degradato, alimentato in polarizzazione diretta a 20 A.

Figura 18. a), c), e) Immagini riprese con videocamera Vidicon alla luce di laboratorio di tre generiche celle del modulo Pragma degradato (esposto alla radiazione solare). b), d), f) Immagini di elettroluminescenza riprese con videocamera Vidicon al buio di tre generiche celle del modulo Pragma degradato, alimentato in polarizzazione diretta a 20 A.

Figura 19. a) Foto generale dell'apparato PROM. Si notano le parti principali del sistema che sono: sulla sinistra il pc, sulla destra la tavola motorizzata per lo spostamento del modulo, la sfera integratrice, il modulo di controllo e il modulo di alimentazione delle lampade.

b) Particolare della sfera integratrice affacciata al modulo speciale Eurosolare con celle senza griglia. Sono ben evidenti le otto sorgenti impulsate affacciate alle otto finestre poste sul lato sinistro della sfera, corrispondenti agli angoli d'incidenza 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° e 70° . c) La sfera PROM è vista di lato. Si nota la finestra di test (ft) che è poggiata sulla superficie del modulo. Si notano altresì i cavi di collegamento tra la sfera e i moduli di controllo e alimentazione.

d) La sfera PROM è vista di fronte. La sorgente a 0° è usata soltanto per le misure di riflettanza emisferica diffusa.

e) La sfera PROM è vista dalla parte delle finestre per l'estrazione della componente speculare della luce riflessa.

f) La sfera PROM è affacciata sulla superficie del modulo Pragma degradato. Si nota bene sulla destra una trappola di luce per l'assorbimento della componente speculare. Nella mappatura ottica di riflettanza diffusa, le finestre complementari a quelle su cui sono poste le sorgenti, ovvero 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° e 70° , sono tutte chiuse con una trappola di luce.

g) Particolare del fotomoltiplicatore (PMT) collegato alla sfera con una fibra ottica e al modulo di controllo con due cavi elettrici.

h) Particolare della parte posteriore dei due moduli di controllo del sistema PROM (fare riferimento anche alla Fig. 8).

i) La tavola x-y di trascinamento del modulo è vista dalla parte posteriore.

l) Vista di profilo della tavola x-y per il trascinamento del modulo.

DESCRIZIONE TECNICA DETTAGLIATA DELL'INVENZIONE

La Fig. 1 mostra lo schema di principio della misura di riflettanza emisferica totale $R_{tot}(\lambda, \theta)$ con il metodo proposto nella presente invenzione. Il metodo è denominato PROM dall'inglese "Pulsed Reflectometer for Optical Mapping", termine che direttamente esprime l'azione del procedere del fascio luminoso sulla superficie del campione quando questo è movimentato dalla tavola x-y. La Fig. 2 mostra invece schematicamente il principio su cui si basa la misura ottica di riflettanza emisferica diffusa $R_{diff}(\lambda, \theta)$ con il metodo proposto nella presente invenzione. La differenza tra le due misure sta nel fatto che nella prima la luce riflessa dal campione viene tutta raccolta, integrata e misurata, mentre nella seconda questo succede solo per la componente diffusa, in quanto la componente speculare viene fatta uscire dalla sfera attraverso delle opportune finestre. In Fig. 1 il campione (c) è affacciato alla finestra (ft) della sfera integratrice (si) ed espone una porzione della sua superficie per la misura. La finestra (ft) è dimensionata in base all'estensione trasversale del fascio incidente e all'angolo massimo d'incidenza previsto. La sfera (si) è accoppiata ad una batteria di sorgenti (s) costituite da lampade impulsive (a flash) (fl), allineate su una serie di finestre d'ingresso (fin) della sfera, le quali puntano sulla zona di test con un angolo d'incidenza θ che varia da 0° a 70° con intervalli di 10° . Le lampade (fl) sono accoppiate ciascuna ad un'ottica di focalizzazione (of) che consente di avere in uscita un fascio collimato di luce che giunge fino alla finestra (ft) producendo, sulla zona di test, uno spot luminoso ellittico delle dimensioni di $\approx 1-2 \text{ cm}^2$. Le otto lampade impulsive (fl), alimentate in sequenza, producono un impulso di luce collimata, diversamente inclinata rispetto alla normale alla superficie del campione. Il massimo valore d'incidenza, 70° , è limitato, nel caso specifico riportato come esempio, dalle dimensioni della sfera e dall'estensione trasversale del fascio. Se D è il diametro della finestra di test (ft) e d è la dimensione trasversale del fascio, il massimo valore dell'angolo d'incidenza θ è dato dalla relazione: $\theta_{max} = \text{acos}(d/D)$. La luce riflessa dal campione è raccolta dalla sfera, integrata e misurata dal fotomoltiplicatore (pmt) posto al suo interno e collegato con una unità radiometrica (ra). Per la misura della riflettanza emisferica totale, le finestre (fout) vengono tutte mantenute chiuse con tappi bianchi, riflettenti quanto la parete interna della sfera, al fine di intercettare anche la componente riflessa speculare (vedi Fig. 1). Per la misura della riflettanza emisferica diffusa, invece, la componente speculare viene estratta dalla sfera attraverso le finestre (fout), poste simmetricamente a quelle d'ingresso (fin) rispetto all'asse ottico dell'apparato PROM (vedi Fig. 2). Su tutte le finestre d'uscita (fout) sono montati degli assorbitori di luce (as) realizzati con cilindri neri all'interno dei quali un cono determina multiple riflessioni della luce e il suo totale assorbimento. Le

finestre d'ingresso (fin) e d'uscita (fout) sono realizzate sul piano equatoriale orizzontale della sfera, corrispondente al piano d'incidenza comune dei diversi fasci collimati provenienti dalle sorgenti impulsive (s).

Per una posizione fissata del campione (c), ad esempio un modulo fotovoltaico (m), l'apparato PROM è realizzato in modo tale da attivare in sequenza le varie sorgenti (fl) per avere, sull'area di test all'interno di (ft), una sequenza di impulsi luminosi incidenti a vari angoli θ . Movimentando il campione (c) di fronte alla finestra (ft), è possibile ricavare una mappa ottica della superficie, o di riflettanza emisferica totale o di riflettanza emisferica diffusa. La mappa avrà una risoluzione spaziale dipendente sia dalle dimensioni degli spot luminosi ellittici (asse minore $d(\theta)$, asse maggiore $d(\theta)/\cos(\theta)$, dove $d(\theta)$ è la dimensione trasversale del fascio), e dagli spostamenti $\Delta x, \Delta y$ del campione sul piano di misura ortogonale all'asse ottico z . Periodicamente, è necessario poi affacciare su (ft) una trappola di luce del tipo mostrato in Fig. 5 per la misura dello zero e un campione standard di riflettanza lambertiano (uno standard Labsphere di riflettanza $\approx 99\%$) per calibrare le misure ottiche.

Descriviamo ora l'apparato PROM nel suo insieme riferendoci alla Fig. 3. Lo schema generale di Fig. 3 mostra le componenti principali dell'apparato che sono: la sfera integratrice (si); il campione (c) posto sulla tavola x-y motorizzata; il modulo di comando della tavola x-y motorizzata; la batteria di lampade impulsive (s); il sistema di rivelazione della luce a fotomoltiplicatore (pmt); il modulo di controllo che controlla l'alimentazione sequenziale delle lampade e l'attivazione della misura con il fotomoltiplicatore (pmt); il computer (pc) sul quale è impostato il programma generale di gestione del sistema. I parametri di misura sono impostati sul pc attraverso una finestra del programma per la gestione delle misure e sono: il ritardo temporale tra una sorgente e l'altra, lo spostamento $\Delta x, \Delta y$ del campione, la sensibilità del sistema di fotorivelazione.

La descrizione che segue si riferisce ad una particolare realizzazione del riflettometro PROM, la quale non condiziona in alcun modo i principi generali su cui si basa la presente invenzione e che riguardano per l'appunto un apparato di misura della riflettanza di un campione di grandi dimensioni, per mezzo di un sistema a sorgenti multiple impulsive le quali illuminano il campione localmente con luce collimata la cui incidenza può variare nell'intervallo tra 0° e $\approx 90^\circ$ e comprendente un sistema di traslazione del campione rispetto all'apparato di misura, o viceversa, in modo da formare una mappa di

riflettanza ai vari angoli d'incidenza stabiliti, riflettanza emisferica che può essere del tipo totale o diffuso, a seconda se la misura comprenda o meno la componente speculare della luce diffusa.

La Fig. 3 mostra lo schema dell'apparato PROM completo delle sue parti principali, nella configurazione per misure di riflettanza emisferica, totale o diffusa. L'apparato PROM è stato realizzato dalla MACAM Photometrics (Scozia), rappresentata in Italia dalla Photoanalytical (Milano). Il campione, nel caso specifico un modulo fotovoltaico (m), è fissato ad una tavola motorizzata x-y (t), la quale è posta verticalmente rispetto al tavolo ottico (to) su cui è disposto il PROM. La sfera (si) del riflettometro PROM è posizionata a sbalzo sul tavolo ottico (to) in modo da avere la finestra di test (ft) parallela e a contatto con la superficie del modulo (m). Sul piano equatoriale della sfera (si) parallelo al piano orizzontale è praticata una molteplicità di finestre (fin) per l'ingresso della luce. Nell'esempio riportato, le finestre sono otto e vanno da 0° a 70°, con intervalli di 10°. Sulle finestre sono posizionate le sorgenti luminose (s), costituite da lampade impulsive (a flash) allo Xenon (fl) Hamamatsu L4633 e da unità ottiche di focalizzazione (of) (vedi Fig. 4). Le sorgenti sono posizionate in corrispondenza delle finestre (fin) con un sistema che permette di fissarle e di orientarle al meglio per avere la corretta focalizzazione del fascio in corrispondenza della finestra (ft) (vedi Fig. 6). Lo spot luminoso sulla finestra (ft) può essere visivamente controllato attraverso un oblò (o) (vedi Fig. 3). Tutte le sorgenti sono collegate elettricamente ad un modulo di alimentazione, collegato a sua volta ad un modulo di controllo che gestisce sia la parte delle sorgenti che la parte di fotorivelazione per mezzo del fotomoltiplicatore (pmt) (vedi Fig. 8). Il modulo di controllo è comandato dal computer (pc) attraverso una porta seriale RS232. La sfera integratrice porta al suo interno un fotomoltiplicatore (pmt) per la misura dell'intensità d'illuminazione della sfera, il quale è mascherato da un baffle (ba), che intercetta la luce che proviene direttamente dall'area di test. L'uso di un fotomoltiplicatore per la misura della luce non è indispensabile, ma utile per avere una buona sensibilità della misura quando si tratti di campioni molto poco riflettenti, come le celle o moduli ad alta efficienza di conversione, caratterizzati da elevata efficienza di collezione della luce. In alternativa al fotomoltiplicatore, si può usare, per la rivelazione della luce all'interno della sfera, un fotodiodo (fd) oppure una videocamera CCD, il che non modifica lo schema di principio del sistema. Nel seguito sono descritte dettagliatamente le singole parti del riflettometro PROM.

La Fig. 4a mostra lo spaccato di un sistema sorgente impulsato (fl) impiegato nell'apparato PROM. La lampada impulsata (la), Hamamatsu L4633, è montata sul portalampe (pl) Hamamatsu E4370-01, e

direttamente di fronte ad essa è montato un otturatore (ot) con foro (fo1) da 5 mm di diametro. La sorgente (fl) collegata elettricamente con il modulo di alimentazione, è poi innestata sulla parte (of1) dell'ottica di focalizzazione (vedi Fig. 4b), costituita da un cilindro con un foro (fo2) da 2 mm di diametro all'estremità. La parte terminale del cilindro (of1) è a sua volta inserita nel cilindro (of2), provvisto di otturatore con foro (fo3) da 5 mm di diametro, che porta ad una sua estremità la lente di focalizzazione (l) e il foro (fo4) da 10 mm di diametro. La lampada (fl) può scorrere entro (of1) ed essere bloccata da una vite nella posizione ottimale per avere il fascio focalizzato correttamente sull'area di test. La parte (of1) a sua volta può scorrere in (of2) e può essere anch'essa bloccata nella posizione ottimale.

La Fig. 5 mostra l'assorbitore di luce (as), provvisto di un cono interno che promuove riflessioni multiple della luce che, grazie alla bassa riflettività interna di (as), determinano il completo assorbimento della luce incidente. L'assorbitore (as) è fissato sulla flangia di una delle finestre di uscita (fout) della sfera.

La Fig. 6 mostra il supporto (sl) della sorgente (fl). La sorgente, una volta fissata con l'ottica di focalizzazione, forma un solo corpo che va fissato sul supporto (sl). A sua volta il supporto va inserito sulla flangia della finestra d'ingresso (fin) e fissato.

La Fig. 7 mostra il fotomoltiplicatore (PMT) impiegato nell'apparato PROM e dettagli delle sue parti. Il PMT PM223 Macam è collegato otticamente con la sfera tramite la fibra ottica (fo). La fibra porta la luce ad uno shutter controllato dal modulo di controllo. Il PMT è connesso al modulo di controllo tramite un cavo per l'alimentazione ed uno per la raccolta del segnale.

Lo schema elettrico generale del riflettometro con i collegamenti tra le varie unità del riflettometro PROM è mostrato in Fig. 8. Il modulo di controllo, MACAM TR300 Photometer, collegato al computer tramite cavo RS232, ha un'uscita per il controllo del PMT (modalità di apertura/chiusura), un ingresso per la ricezione del segnale dal PMT e un'uscita per il controllo delle lampade. Il modulo per l'alimentazione delle lampade, MACAM XXPS100, presenta otto connettori corrispondenti alle otto uscite di collegamento alle lampade. Sul suo pannello frontale otto indicatori a LED indicano la lampada attualmente in funzione.

Descriviamo ora nel seguito una tipica procedura di mappatura della riflettanza con l'apparato PROM. Dapprima è necessario definire i parametri di acquisizione, che sono: intervallo temporale tra le accensioni di due lampade adiacenti; la sensibilità del PMT, gli intervalli spaziali Δx , Δy , e

l'estensione spaziale della misura. Altri parametri da controllare sono la velocità e accelerazione della tavola x-y, che devono essere compatibili con l'intervallo temporale stabilito per la sequenza di accensione di due lampade adiacenti. Tutti i parametri di acquisizione vengono impostati nel programma di gestione del sistema, che comprende sia le unità collegate con la sfera integratrice sia l'unità di controllo della movimentazione della tavola x-y.

Impostati i parametri per la misura, si passa alla predisposizione dello strumento: allineamento e focalizzazione di tutte le lampade sulla finestra di test (ft); preparazione del campione, che deve essere libero da cornici che impediscano il libero movimento della finestra (ft) sulla sua superficie; regolazione della pressione del modulo sulla finestra della sfera, attraverso una regolazione fine lungo l'asse z della tavola x-y. Segue un test di prova sul campione per impostare la sensibilità del PMT e per evitare effetti di saturazione.

La misura vera e propria inizia con la determinazione dello zero e con la misura sullo standard di riflettanza. Successivamente si posiziona il campione nella posizione iniziale e si procede alla sequenza automatica delle misure, realizzata su una matrice di n_x, n_y punti, con intervalli $\Delta x, \Delta y$. Alla fine della mappatura ottica si ripete la misura dello zero e dello standard. I dati acquisiti sono poi trasferiti su programmi opportuni (Excel, Origin) per la loro elaborazione statistica.

Il segnale ricavato dal PMT, $I_c(s, \vartheta)$, relativo ad una sorgente con spettro "s" e per un angolo d'incidenza θ , è legato alla riflettanza spettrale del campione, $R_c(\lambda, \vartheta)$, dalla relazione:

$$I_c(s, \vartheta) = k \cdot \int_s d\lambda \cdot S(\lambda) \cdot R_c(\lambda, \vartheta) \cdot SR(\lambda) \quad (1)$$

con:

$S(\lambda)$, in $W \cdot nm^{-1}$: intensità spettrale della sorgente;

$SR(\lambda)$, in $A \cdot W^{-1} \cdot nm$: risposta spettrale del fotorivelatore;

k : costante d'integrazione della sfera.

Per il campione standard abbiamo:

$$I_r(s, \vartheta) = k \cdot \int_s d\lambda \cdot S(\lambda) \cdot R_r(\lambda, \vartheta) \cdot SR(\lambda) \quad (2)$$

Impiegando come riferimento uno standard Labsphere con caratteristiche di lambertianità, abbiamo:

$$R_r(\lambda, \vartheta) = R_r(\lambda) = R_r \approx 0.99 \quad (3)$$

valida per l'intervallo spettrale 300-1200 nm entro cui lavora la maggior parte dei moduli FV.

Abbiamo:

$$I_r(s, \vartheta) = k \cdot R_r \cdot \int_s d\lambda \cdot S(\lambda) \cdot SR(\lambda) \quad (2')$$

Da cui il rapporto:

$$\mathfrak{R}_c(s, \vartheta) = \frac{I_c(s, \vartheta)}{I_r(s, \vartheta)} \cdot R_r = \frac{\int_s d\lambda \cdot S(\lambda) \cdot R_c(\lambda, \vartheta) \cdot SR(\lambda)}{\int_s d\lambda \cdot S(\lambda) \cdot SR(\lambda)} \quad (4)$$

Dove $\mathfrak{R}_c(s, \vartheta)$ rappresenta il fattore di riflettanza misurato con l'apparato PROM alla luce bianca delle lampade a flash e senza l'uso di filtri. Esso corrisponde al valor medio di $R_c(\lambda, \vartheta)$ pesato con lo spettro della lampada $S(\lambda)$ e la risposta spettrale del PMT, $SR(\lambda)$.

Per avere la riflettanza $R_c(\lambda, \vartheta)$ alla lunghezza d'onda λ e all'angolo d'incidenza θ , è necessario effettuare le misure filtrando l'uscita delle sorgenti oppure l'ingresso al PMT con un filtro passa-banda stretto (parlarne nella parte sperimentale):

$$R_c(\lambda, \vartheta) = \frac{I_c(\lambda, \vartheta)}{I_r(\lambda, \vartheta)} \cdot R_r = \frac{I_c(\lambda, \vartheta)}{I_r(\lambda, \vartheta)} \cdot 0.99 \quad (5)$$

Da più misure di $R_c(\lambda, \vartheta)$ si perviene al valore di $R_c(s_{STC}, \vartheta)$ relativo allo spettro solare AM1.5G delle condizioni standard STC:

$$R_c(s_{STC}, \vartheta) = 0.99 \cdot \frac{I_c(s_{STC}, \vartheta)}{I_r(s_{STC}, \vartheta)} = 0.99 \cdot \frac{\int d\lambda \cdot S_{STC}(\lambda) \cdot R_c(\lambda, \vartheta)}{\int_{s_{STC}} d\lambda \cdot S_{STC}(\lambda)} \quad (6)$$

Al fine di esaminare il comportamento ottico di moduli FV al silicio cristallino (sia mono-Si che multi-Si), considerando altresì l'effetto prodotto sulle misure da parte della griglia, sono stati realizzati, in collaborazione con Eurosolare (ES), moduli prototipali costituiti da celle solari isolate (non connesse elettricamente) di tipo single-Si (silicio monocristallino) e multi-Si (silicio multicristallino o policristallino), di diverso colore, con griglia e senza griglia.

La Fig. 9 riporta i risultati ottenuti con una cella solare di silicio monocristallino con griglia, incapsulata nel modulo Eurosolare speciale. La Fig. 9b mostra la distribuzione spaziale del fattore di riflettanza $\mathfrak{R}_c(s, \vartheta)$, relativo allo spettro della luce bianca delle lampade a flash.

La mappa di $\mathfrak{R}_c(s, 10^\circ)$ mostra chiaramente il disturbo prodotto sulle misure dalla presenza dei due bus bar, mentre la griglia distribuita sulla superficie determina un generale innalzamento della riflettanza della cella. La Fig. 9c mostra la funzione di distribuzione statistica della riflettanza, dalla quale è possibile distinguere i dati relativi ai bus bar da quelli relativi alla superficie ricoperta con la griglia sottile. La sottile curva di dispersione dei dati per la superficie evidenzia la forte omogeneità ottica della cella solare.

Nella Fig. 10 sono riportati per confronto i risultati della mappatura ottica PROM su una cella Eurosolare di silicio multicristallino, dai riflessi viola, anch'essa dotata di griglia. E' da notare che la funzione di distribuzione della riflettanza presenta ora, a differenza della cella monocristallina, una notevole dispersione dei dati, effetto prodotto dalle proprietà riflessive diversificate dei diversi grani cristallini che si affacciano sulla superficie.

Risultati quantitativi di un certo interesse sono stati ottenuti analizzando le proprietà ottiche di celle senza griglia, incapsulate nel modulo speciale prodotto dall'Eurosolare, in quanto esse permettono l'accesso diretto alla regione attiva della cella.

Come già anticipato precedentemente, la misura della riflettanza risolta nell'angolo d'incidenza permette di valutare le perdite ottiche della cella relativamente alle condizioni standard (STC), in particolare alla condizione di incidenza normale della luce. Questa informazione può essere trasferita ad un programma specifico, scritto per analizzare le prestazioni di un modulo FV in condizioni outdoor

[2], al fine di ricavare la perdita energetica associata alle condizioni d'incidenza della radiazione solare, tenendo conto della distribuzione reale dell'intensità della radiazione solare. Per semplificare la trattazione, la riflettanza $\mathfrak{R}(\theta)$ è tradotta in una trasmittanza della luce verso il modulo: $T(\theta) = 1 - \mathfrak{R}(\theta)$, la quale è poi normalizzata rispetto all'incidenza normale per ottenere il fattore di trasmittanza relativo: $\tau(\theta) = T(\theta)/T(0^\circ)$. Il termine $\tau(\theta)$, introdotto nel programma di simulazione del modulo, fornisce le perdite energetiche del modulo associate alle condizioni reali di incidenza della luce solare [2]. In un nostro precedente lavoro [5], analizzando una serie di moduli al silicio monocristallino con il riflettometro manuale ROSE [5], era stato trovato che l'andamento di $\tau(\theta)$ era paragonabile a quello di un dielettrico omogeneo semiinfinito, il cui indice di rifrazione fosse compreso tra 2.5 e 3.0. Il significato di quell'importante risultato era che un modulo al silicio monocristallino poteva essere modellato, ai fini della trasmittanza relativa della luce, semplicemente come un dielettrico omogeneo, con un indice di rifrazione (equivalente) $n_{eq} = 2.5 - 3.0$, a seconda della particolare tecnologia di fabbricazione. La grandezza n_{eq} può essere equiparata ad un parametro di targa, da affiancare agli altri parametri di targa del modulo. Lo studio precedente era condizionato dalla presenza della griglia. Il modulo Eurosolare prototipale realizzato con celle senza griglia ci consente di ricavare con più precisione il valore di n_{eq} e di estendere l'analisi alle celle al silicio multicristallino.

La Fig. 11 mostra le mappe ottiche di $\mathfrak{R}_c(s, \vartheta)$ della cella ES single-Si, ottenute in corrispondenza degli angoli d'incidenza $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$. I valori di riflettanza media e la deviazione standard, ricavate dalle corrispondenti funzioni di distribuzione, sono stati tradotti in termini di $\tau(\theta)$ e riportati in Fig. 12, confrontandoli con le curve teoriche di $\tau(\theta)$ calcolate dalle equazioni di Fresnel per dielettrici con n_{eq} compreso tra 1.5 e 3.5. Come si vede dal grafico, i punti sperimentali di $\tau(\theta)$ per la cella monocristallina sono ben modellati dalla curva teorica con $n_{eq} = 2.5$, a conferma di quanto da noi ottenuto precedentemente [5]. Il valore di n_{eq} è condizionato da tre parametri: testurizzazione o meno del vetro frontale, testurizzazione o meno del silicio, presenza o meno dell'antiriflesso [5].

In Fig. 13 sono riportate le mappe ottiche della cella ES al silicio multicristallino con riflessi azzurri e priva di griglia, ottenute agli stessi angoli d'incidenza. I valori di $\tau(\theta)$ ottenuti dalle corrispondenti funzioni di distribuzione sono riportati in Fig. 14 insieme alle curve teoriche. Si trova che anche per la

cella al silicio multicristallino i dati sperimentali sono ben modellati dalla curva teorica di $\tau(\theta)$ con $n_{eq} = 2.5$.

Come è stato già discusso precedentemente, la mappatura ottica di moduli FV degradati per effetto di una lunga esposizione alla radiazione solare è utile per analizzare i meccanismi della degradazione, che, nella maggior parte dei casi, interessano lo strato incapsulante (EVA) per effetto della radiazione ultravioletta [1]. Per dimostrare l'utilità della tecnica PROM in questo tipo di analisi, da utilizzare preferibilmente in congiunzione con altre tecniche, sono state analizzate coppie di moduli FV, realizzati con la stessa tecnologia di fabbricazione, nelle quali un elemento era stato conservato in magazzino, mentre l'altro era stato esposto per un lungo periodo (10-15 anni) alla radiazione solare. La Fig. 15a mostra una cella campione di un modulo FV al silicio multicristallino della Pragma (mod. 72SL), non esposto. La Fig. 16a mostra invece una cella campione di un modulo gemello esposto alla radiazione solare. La degradazione si manifesta con la formazione, nella parte centrale della cella compresa tra i due bus bar (vedi la zona evidenziata nella Fig. 16a), di una colorazione giallognola, brunastra distribuita quasi uniformemente sulla zona indicata. La degradazione ottica della parte centrale della cella è stata da noi osservata anche in altri moduli ed è stata associata ad un problema di surriscaldamento. I risultati delle mappature ottiche effettuate col PROM in luce bianca a 60° d'incidenza confermano quanto osservato visivamente, e inoltre forniscono altri particolari. Passando dal modulo non esposto a quello esposto, si osserva un leggero aumento della riflettanza media e una maggiore dispersione dei dati, come mostrato nelle Figg. 15c e 16c. Per un'analisi approfondita del fenomeno della degradazione, si possono sfruttare tutte le potenzialità dell'apparato PROM, ad esempio lavorando in luce monocromatica e cambiando l'angolo d'incidenza della luce. Altre tecniche possono poi essere associate a quella ottica, come l'analisi termografica della superficie e l'analisi di elettroluminescenza (EL), per citare due tecniche non distruttive che possono essere eseguite con facilità e celerità. Nelle Figg. 17 e 18 riportiamo, a titolo di esempio, alcuni risultati ottenuti con misure di EL, effettuate mediante videocamera Vidicon Hamamatsu C2741. La Fig. 17 riporta le immagini Vidicon prese su tre celle del modulo Pragma non degradato (non esposto alla radiazione solare), mentre la Fig. 18 riporta le immagini relative al modulo Pragma degradato (esposto alla radiazione solare). Le immagini a), c), e) sono state prese alla luce del laboratorio, mentre le b), d), f) sono le immagini di EL prese al buio con il modulo alimentato a una corrente costante di 20 A. Il modulo Pragma mod. 72SL è costituito da 6x12 celle connesse in serie. Nelle immagini alla luce la

griglia con i bus bar appaiono bianchi, mentre nelle immagini EL essi appaiono scuri, in quanto non emettono radiazione di EL. Come si può notare dalla Fig. 17, sia le immagini alla luce che quelle di elettroluminescenza mostrano una intensità della superficie piuttosto omogenea nelle varie zone della cella, a parte alcune differenze introdotte localmente dai grani cristallini. La situazione cambia drasticamente nella Fig. 18, in particolare per le immagini di elettroluminescenza. Si nota una intensità non omogenea, in particolare più bassa nella regione centrale delle celle, dove le immagini ottiche hanno messo in evidenza una maggiore degradazione. Evidentemente, se la degradazione nella regione centrale della cella interessa soltanto lo strato di EVA, allora questa determina una minore trasmissività della radiazione di EL, che si riferisce alla banda di emissione del silicio intorno a 1150 nm [6], [7].

A completamento della descrizione del metodo e dell'apparato PROM, riportiamo nelle Figg. 19 a)-l) le foto dell'apparato nel suo insieme e nelle sue parti principali, così come è stato realizzato all'ENEA di Portici. La sfera integratrice, di 40 cm di diametro, è stata realizzata dalla Macam Photometrics. La tavola motorizzata x-y per la movimentazione del modulo è stata realizzata appositamente dalla Newport-Micro-Controle. La tavola è controllata dal Motion Controller mod. MM4006.

CONCLUSIONI

In conclusione, è stato presentato un metodo e descritto un apparato sperimentale nella configurazione tipica per la mappatura ottica di una superficie, ovvero per la misura della riflettanza emisferica totale o diffusa, ad un angolo d'incidenza variabile. Le caratteristiche peculiari di questo apparato, o riflettometro, che lo rendono diverso e innovativo rispetto ad altre apparecchiature già note, sono principalmente il fatto che la sorgente usata è impulsata, il che rende la singola misura estremamente veloce (dell'ordine del secondo). Inoltre, sono presenti contemporaneamente nel sistema più sorgenti impulsive, ciascuna caratterizzata da un particolare angolo d'incidenza, le quali possono essere attivate in sequenza veloce, con il vantaggio che la caratterizzazione completa, a più angoli d'incidenza, di un punto della superficie può essere svolta in un tempo complessivo molto breve, dell'ordine di una decina di secondi. Da qui ne consegue che la caratterizzazione completa, o mappatura, di una superficie estesa data, può essere portata a termine in tempi relativamente brevi, che vanno dai minuti alle decine di minuti. Per l'analisi completa risolta in angolo di una cella solare tipica (10-12 cm di

lato), con una risoluzione dell'ordine del centimetro, occorreranno all'incirca 10 min, mentre per l'analisi completa del modulo occorreranno all'incirca 0.5-1 ore. Diversamente, se l'analisi interessa solo ad un angolo d'incidenza, la mappatura di una superficie del tipo di un modulo FV ($0.5-1 \text{ m}^2$), può essere effettuata in un arco di tempo di circa 1 ora. E' importante focalizzare il fatto che, col sistema PROM proposto, la mappatura ottica viene svolta secondo una sequenza del tipo:

- i) caratterizzazione di un punto a tutti gli angoli;
- ii) caratterizzazione di tutti i punti attraverso lo spostamento del campione rispetto alla sfera o viceversa.

Riflettometri noti, pur adatti a svolgere misure in funzione dell'angolo d'incidenza, richiederebbero, per una mappatura ottica simile a quella descritta, una sequenza di misure del tipo:

- i) caratterizzazione di un punto ad un solo angolo, con un'unica sorgente continua,
- ii) caratterizzazione di tutta la superficie allo stesso angolo movimentando il campione;
- iii) spostamento della sorgente su una diversa finestra (diverso angolo);
- iv) ripetizione dei punti i)-iii).

Risulta evidente da quanto descritto che la seconda procedura richiede un tempo molto lungo, paragonabile a quello della prima sequenza moltiplicato per il numero di angoli scelti.

Un altro aspetto della misura PROM che deve essere messo in evidenza, oltre ai ridotti tempi di misura, è il fatto che l'uso di una sorgente impulsata riduce notevolmente il budget energetico, evita il surriscaldamento di componenti e dà luogo a misure più precise.

E' stato discusso ampiamente l'uso del riflettometro PROM nelle applicazioni di tipo fotovoltaico, ma esso può essere altresì impiegato in tutte quelle applicazioni nelle quali sia necessario conoscere le proprietà riflessive di superfici di grandi dimensioni, o comunque nelle quali sia necessario effettuare un gran numero di misure. La scelta della lunghezza d'onda della sorgente, oltre che dell'angolo d'incidenza, permette di esaminare la superficie del campione a diverse profondità, compatibilmente con le proprietà di assorbimento del campione verso la radiazione scelta.

RIFERIMENTI

- [1] A. Parretta, G. Graditi, R. Schioppo, M. Bombace, “*Optical degradation of long-term field-aged c-Si photovoltaic modules*”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86 (2005) 349-364.
- [2] A. Parretta, A. Sarno and L. Vicari, “*Effects of Solar Irradiation Conditions on the Outdoor Performance of Photovoltaic Modules*”, *Optics Communications*, 153 (1998) 153-163.
- [3] A. Parretta, A. Sarno, M. Pellegrino, C. Privato, E. Terzini, A. Romano and H. Yakubu, “*Optical Reflectance Mapping (ORM): a Diagnostic Tool in the Study of Light Collection in PV Modules*”, poster presentation at the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, Austria, 6-10 July, 1998. Proceedings vol II, ed J. Schmid, H.A. Ossenbrink, P. Helm, H. Helimann and E.D. Dunlop (Ispra, I: JRC European Commission), 1998, pp 2342–2345.
- [4] A. Parretta, A. Sarno, P. Tortora, H. Yakubu, P. Maddalena, J. Zhao, A. Wang, “*Angle-dependent Reflectance and Transmittance Measurements on Photovoltaic Materials and Solar Cells*”, *Optics Communications*, 172 (1999) 139-151.
- [5] A. Parretta, A. Sarno and H. Yakubu, “*Non-destructive Optical Characterization of Photovoltaic Modules by an Integrating Sphere. Part I: Mono-Si Modules*”, *Optics Communications*, 161 (1999) 297-309.
- [6] L. Ferraioli, P. Maddalena, E. Massera, A. Parretta, M.A. Green, A. Wang and J. Zhao, “*Evidence for Generalized Kirchhoff’s Law from Angle-resolved Electroluminescence of High Efficiency Silicon Solar Cells*”, *Applied Physics Letters*, 85 (2004) 2484-2486.
- [7] L. Ferraioli, P. Maddalena, A. Parretta, A. Wang, J. Zhao, “*Current-Voltage Characteristics of High Efficiency Silicon Solar Cells from Photoluminescence*”, *Applied Physics Letters*, 85 (2004) 4222-4224.

Fig. 1.

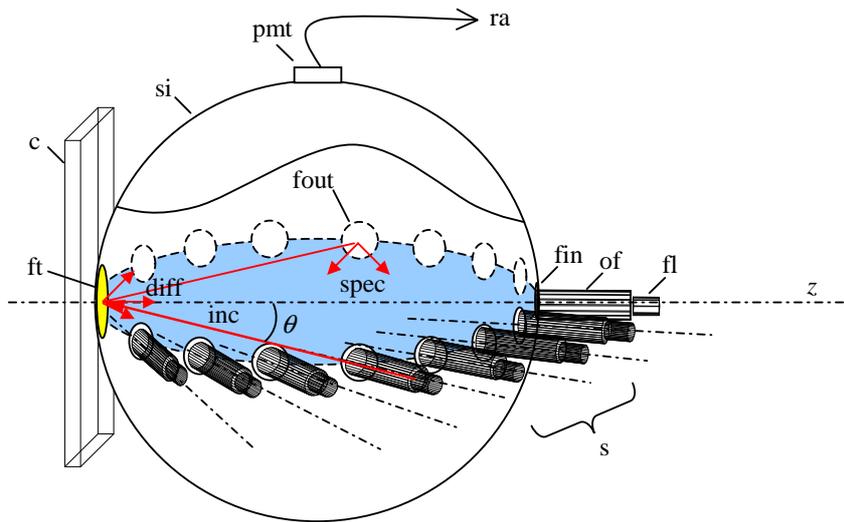


Fig. 2.

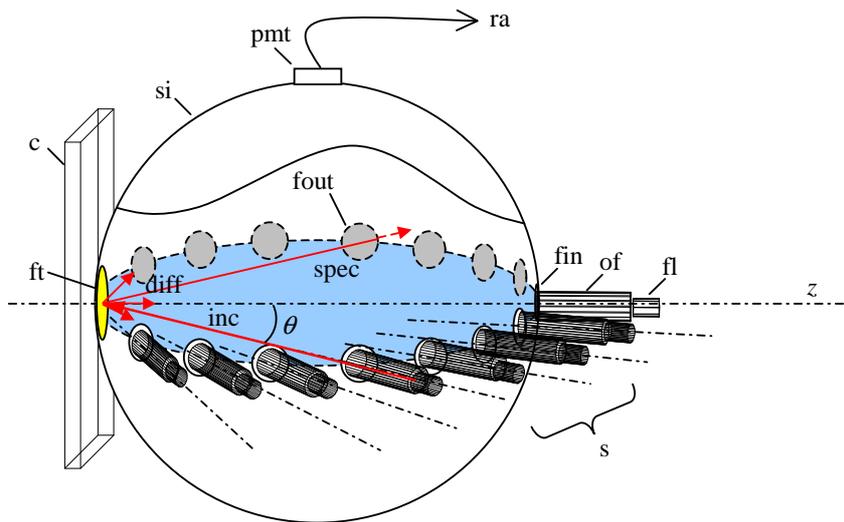


Fig. 3.

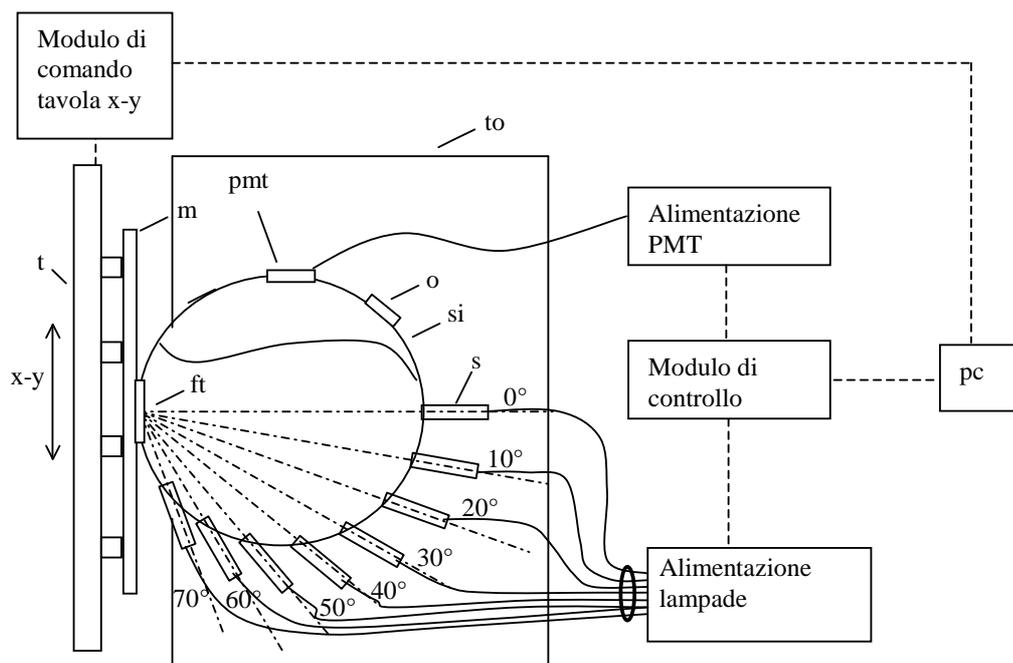
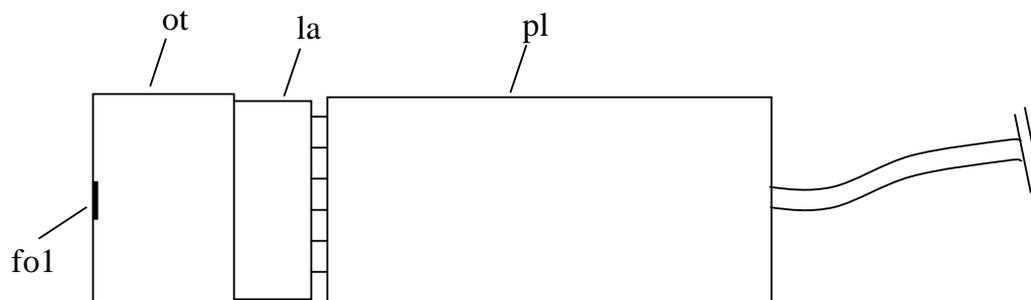
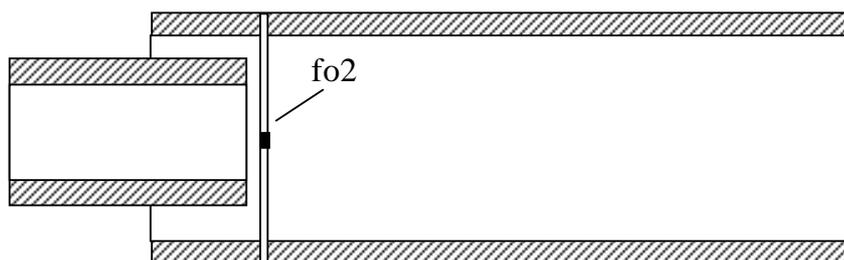
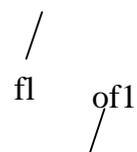


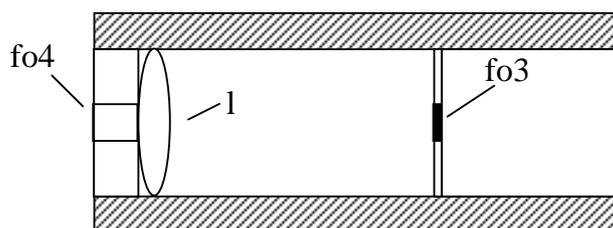
Fig. 4.



a)



b)



c)

Fig. 5.

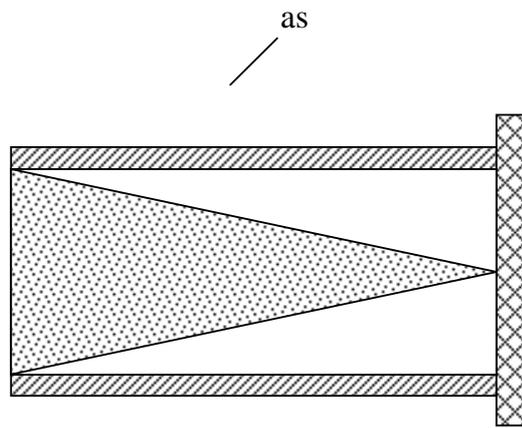


Fig. 6.

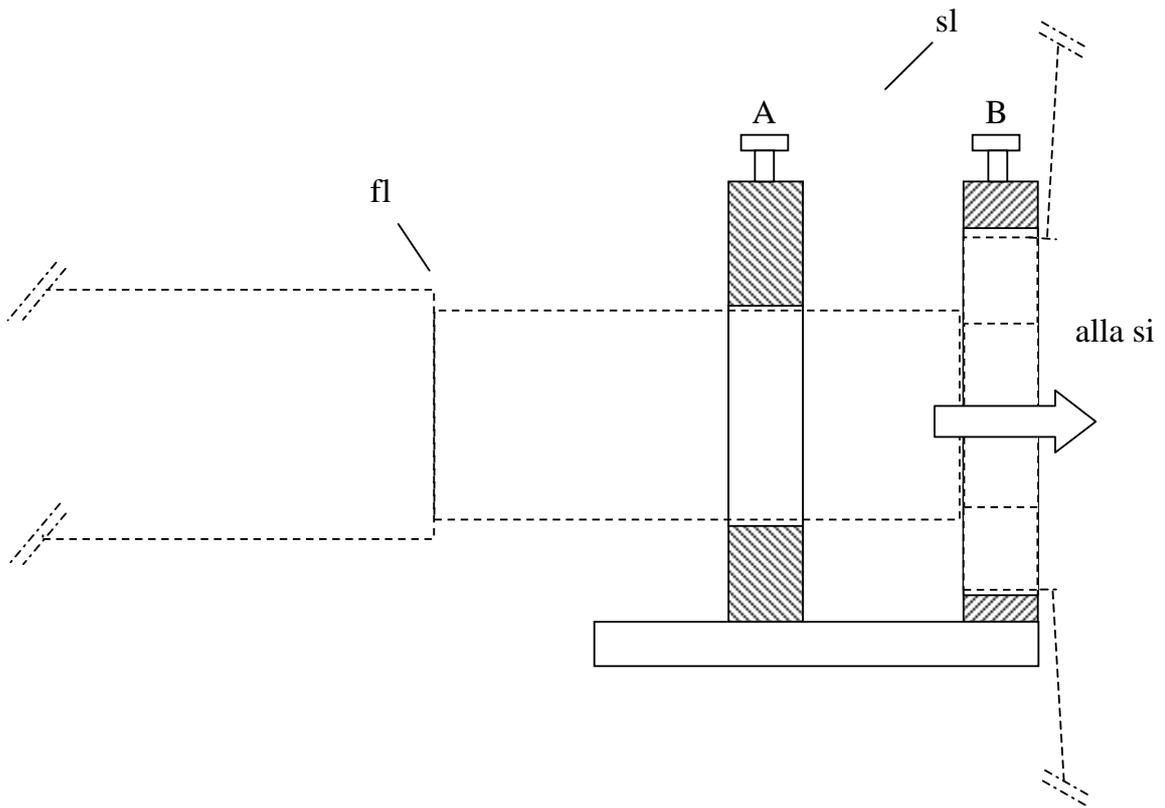


Fig. 7.

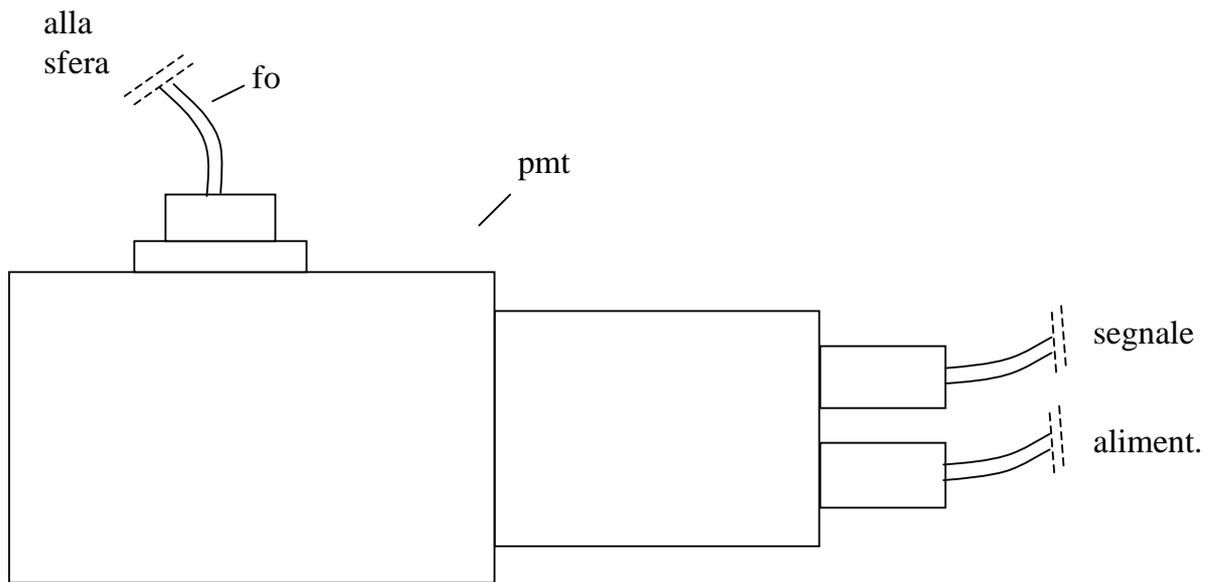


Fig. 8.

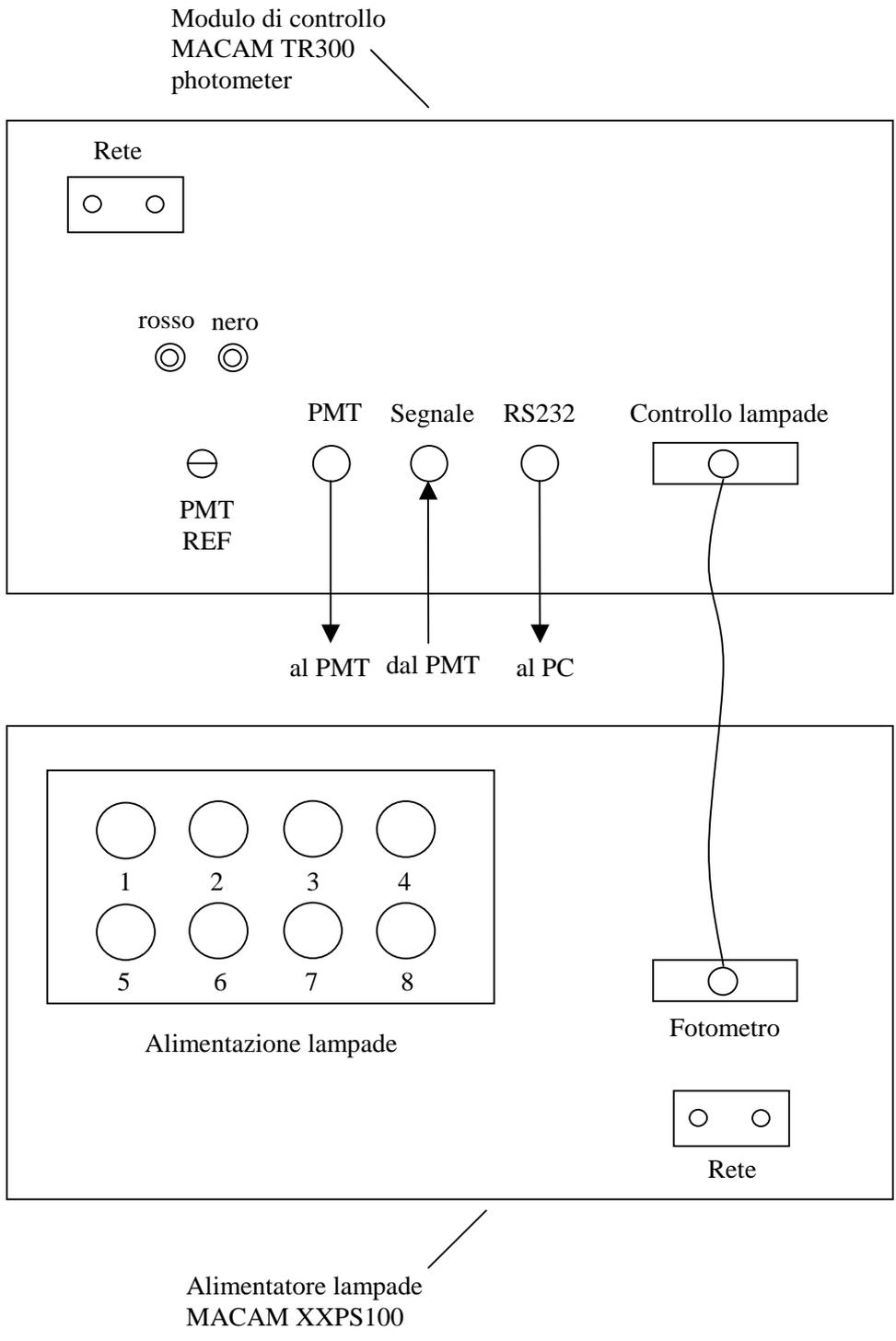
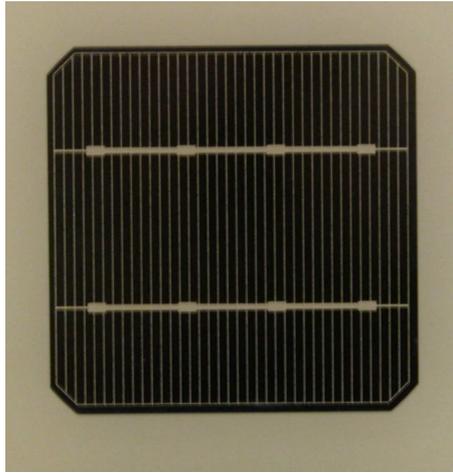
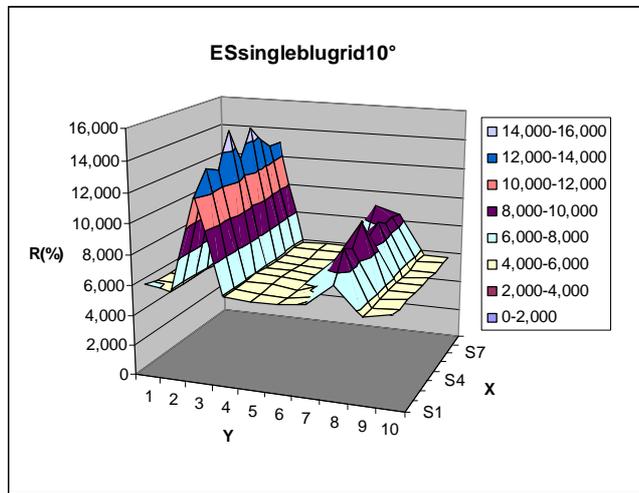


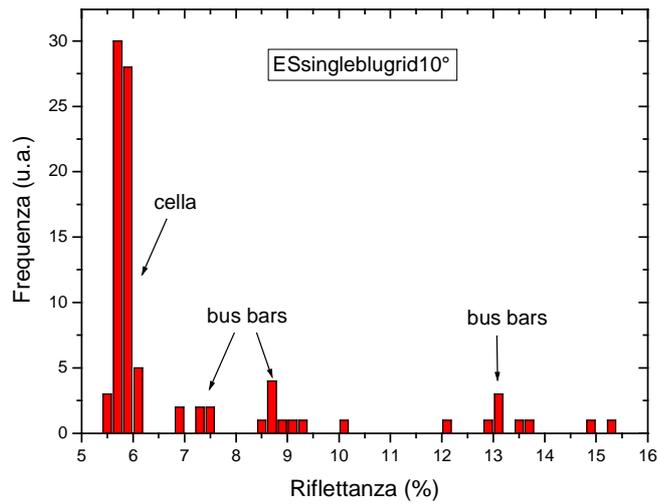
Fig. 9.



a)

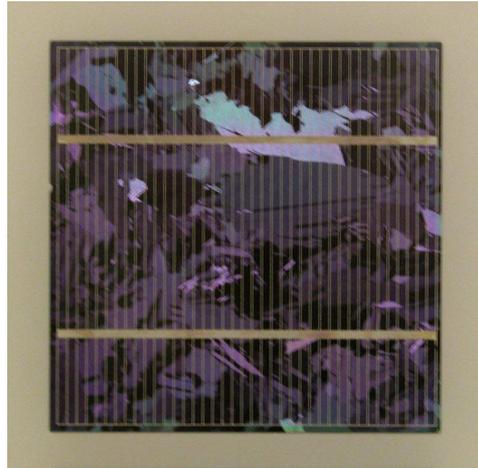


b)

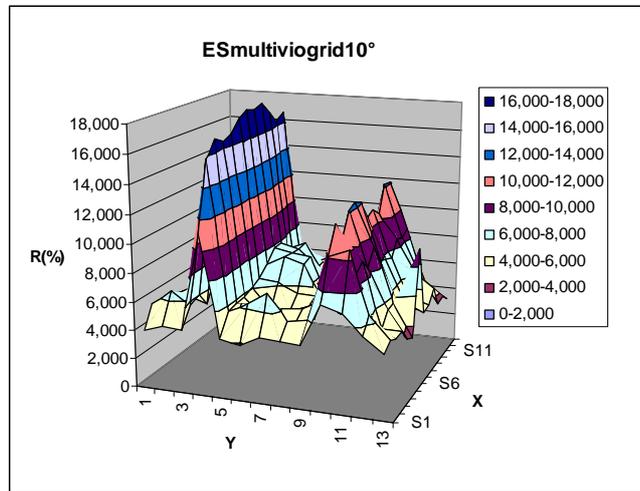


c)

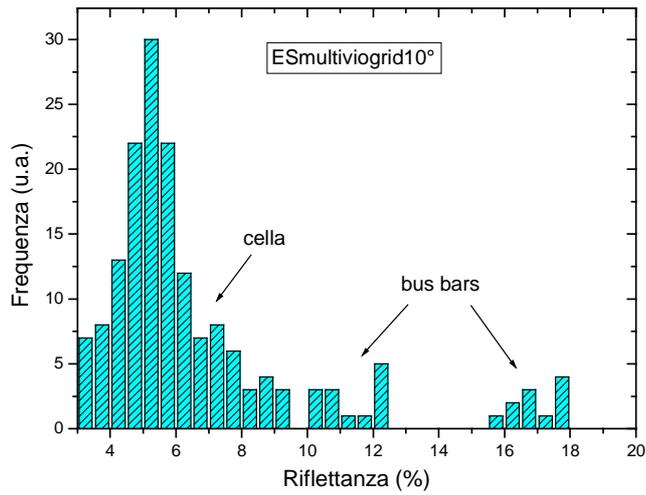
Fig. 10.



a)

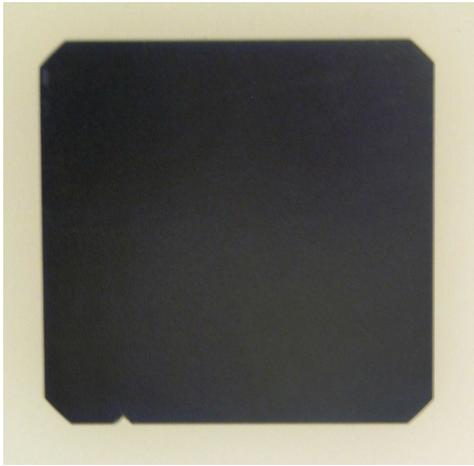


b)

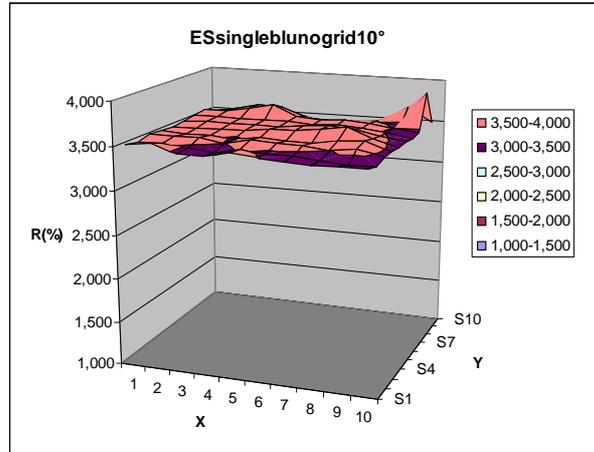


c)

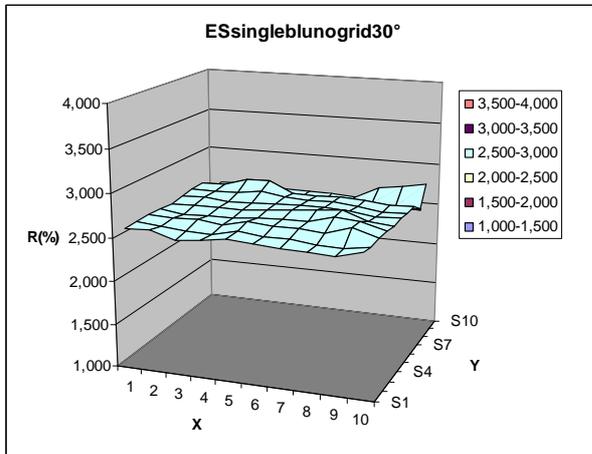
Fig. 11.



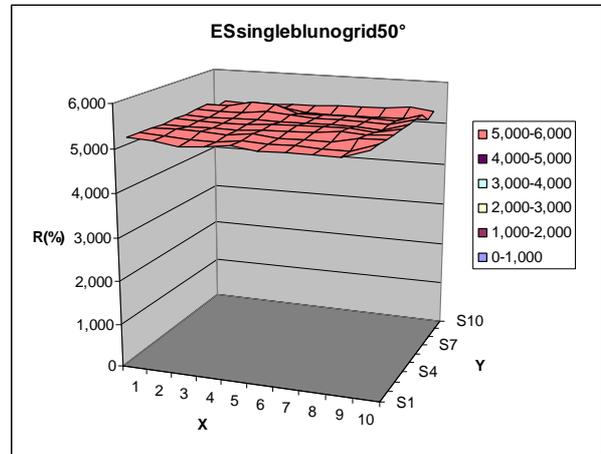
a)



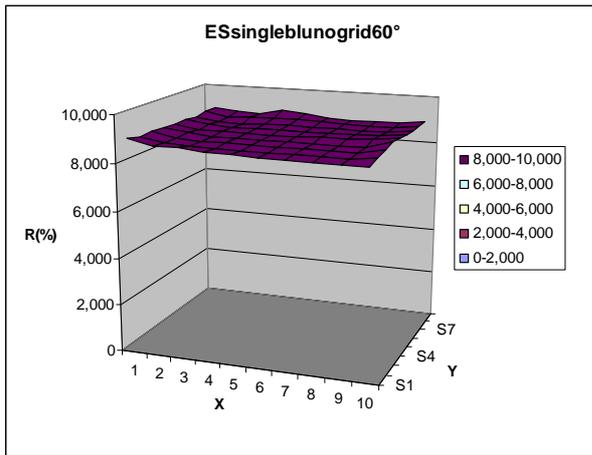
b)



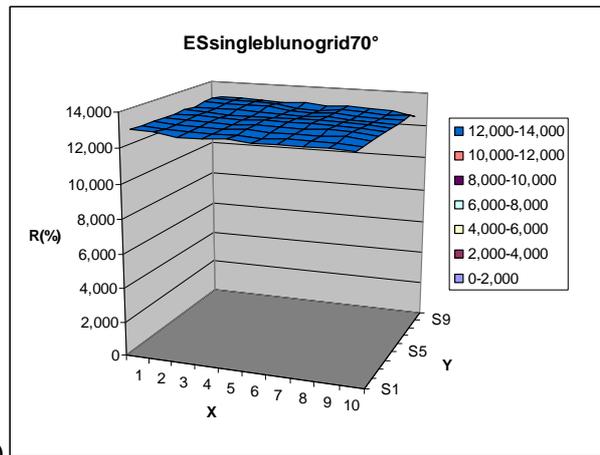
c)



d)



e)



f)

Fig. 12.

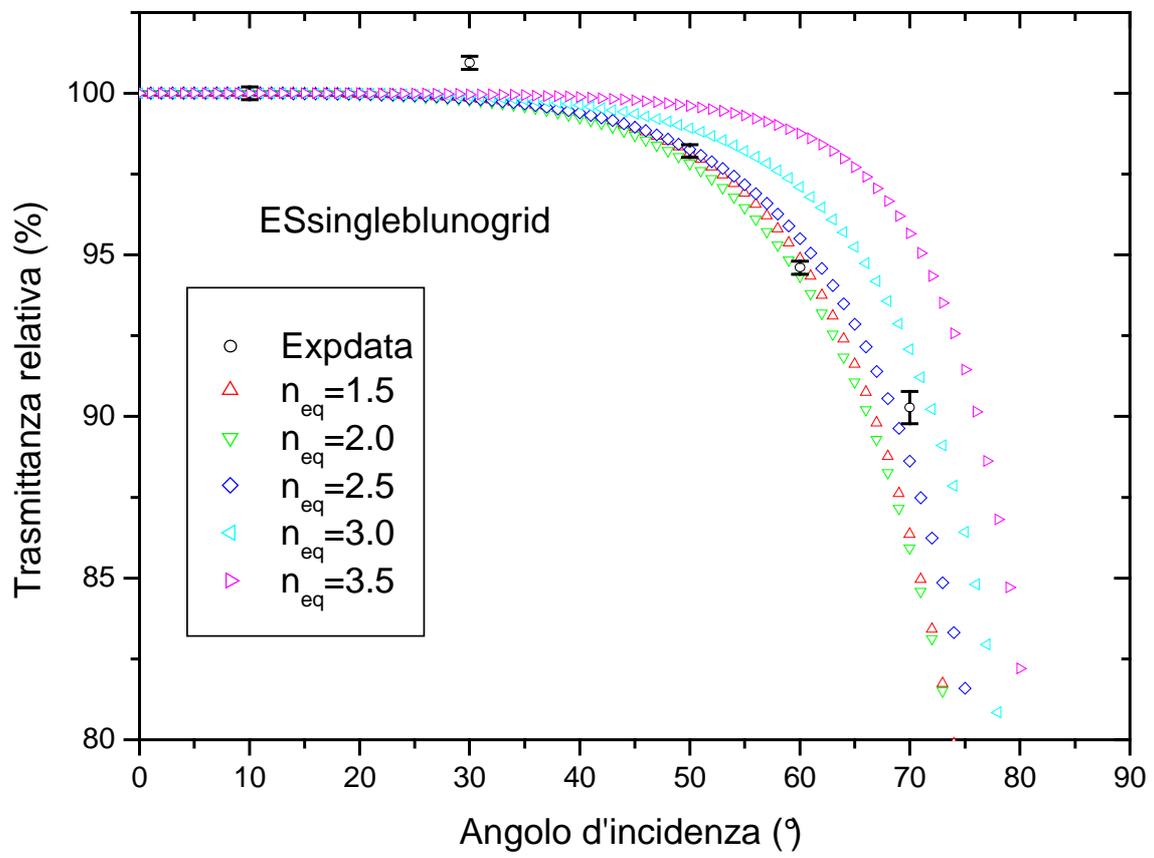


Fig. 13.

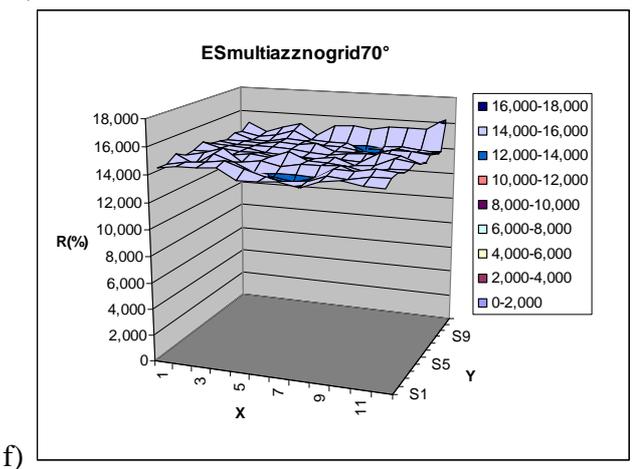
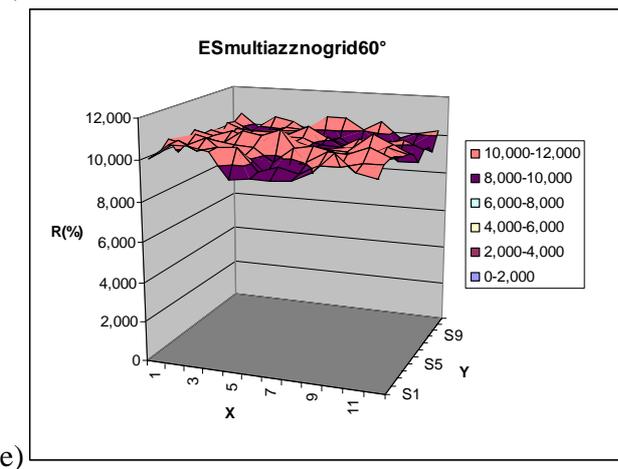
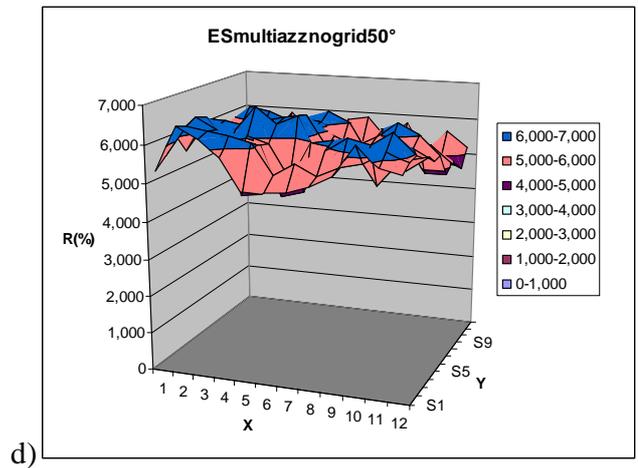
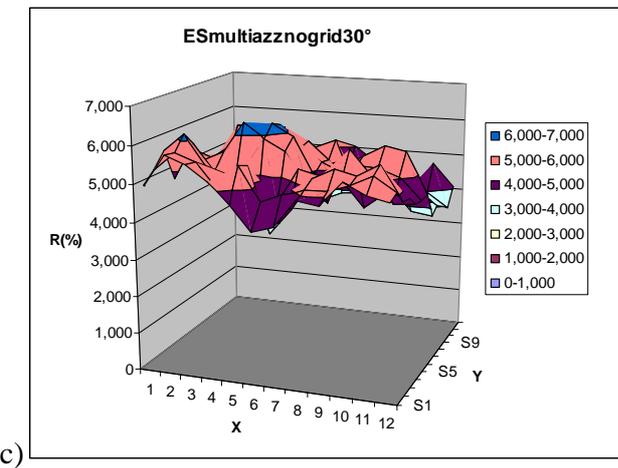
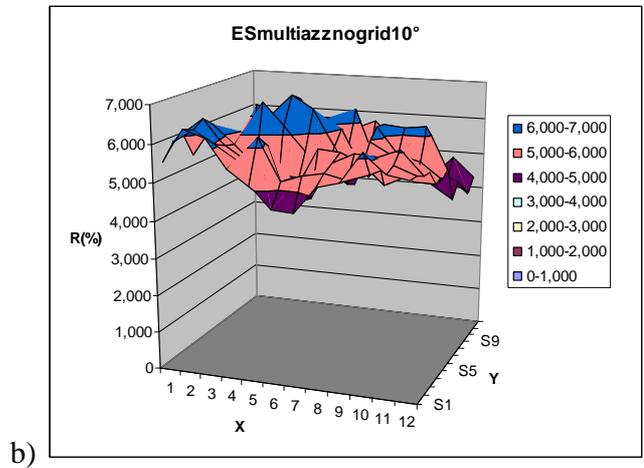
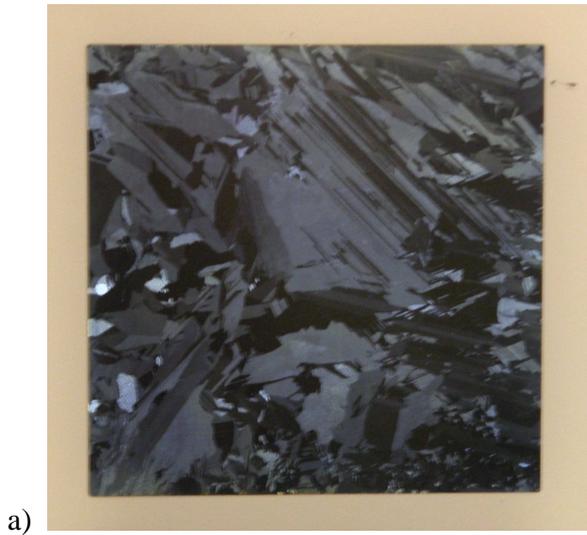


Fig. 14.

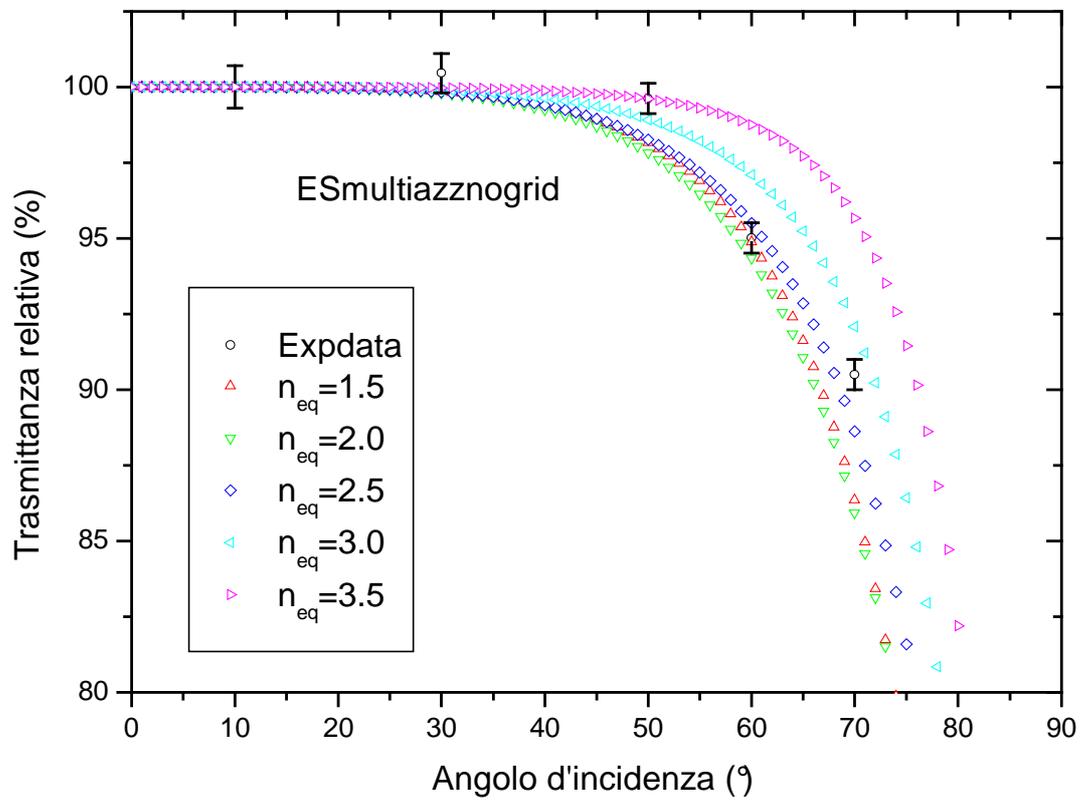
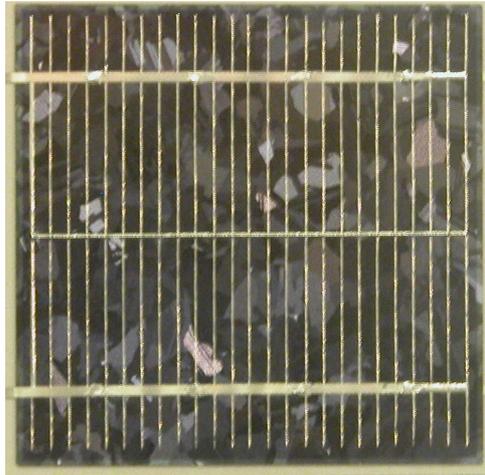
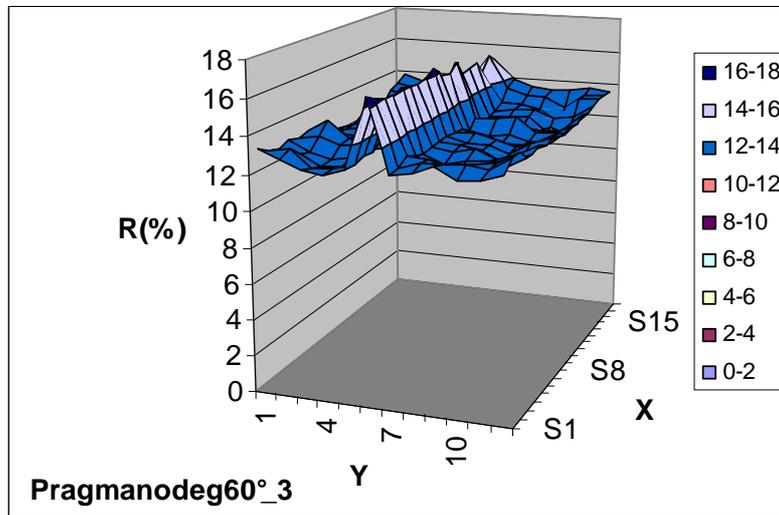


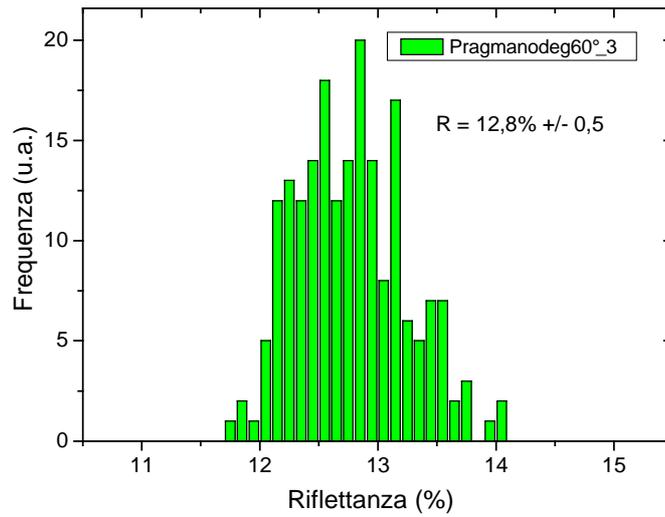
Fig. 15.



a)



b)

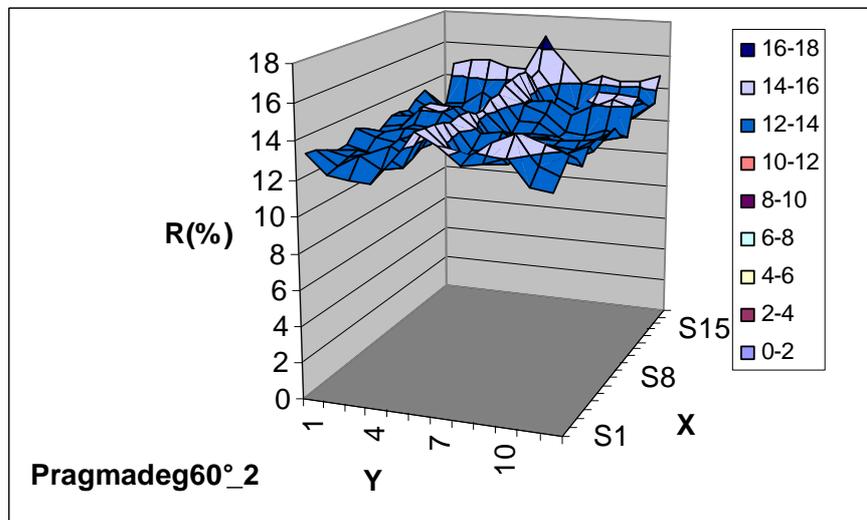


c)

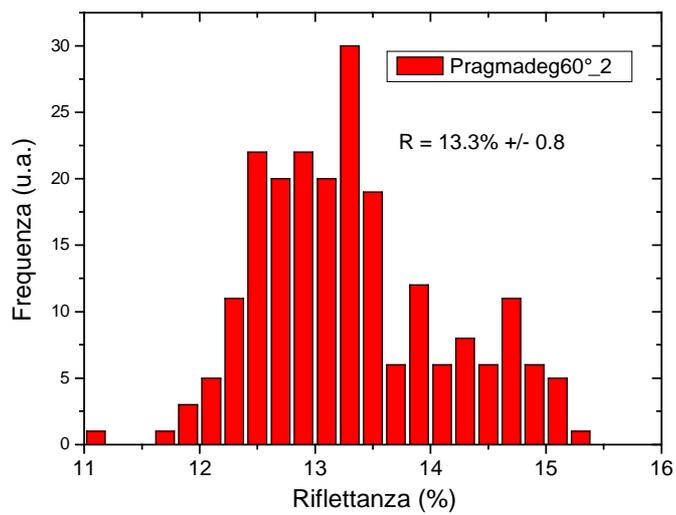
Fig. 16.



a)



b)

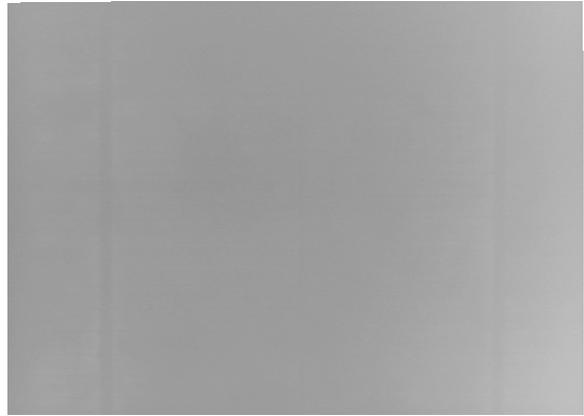


c)

Fig. 17.



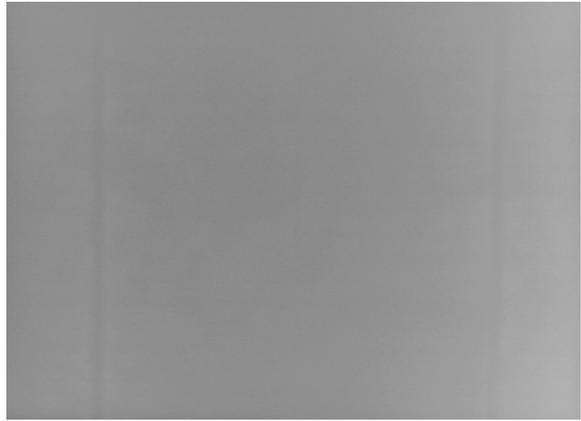
a)



b)



c)



d)

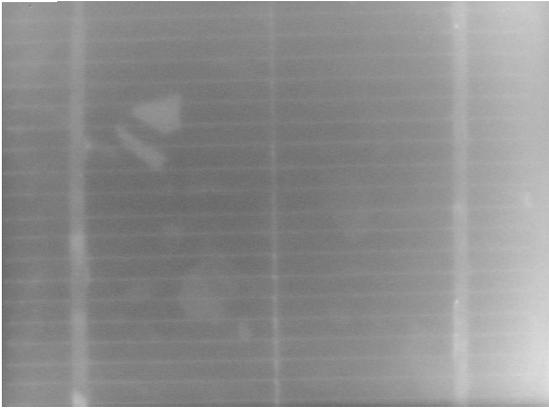


e)

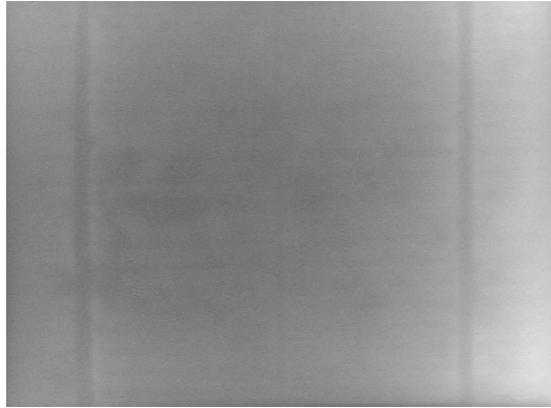


f)

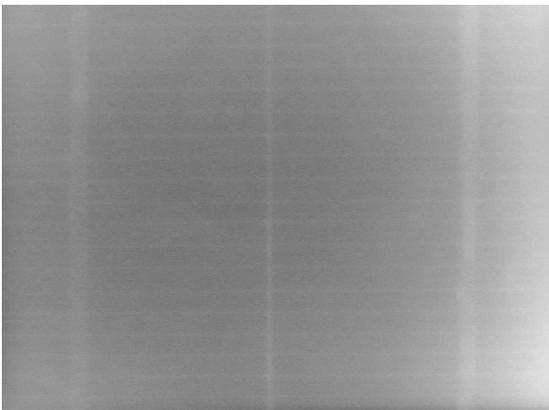
Fig. 18.



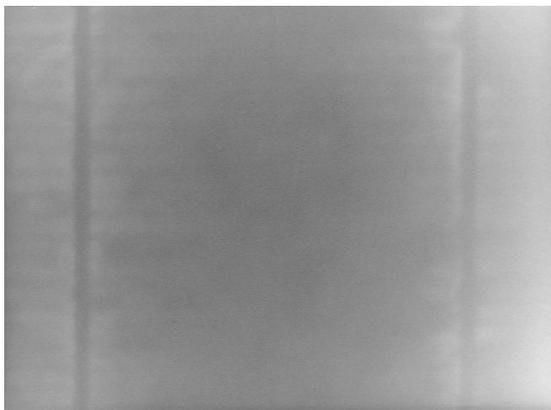
a)



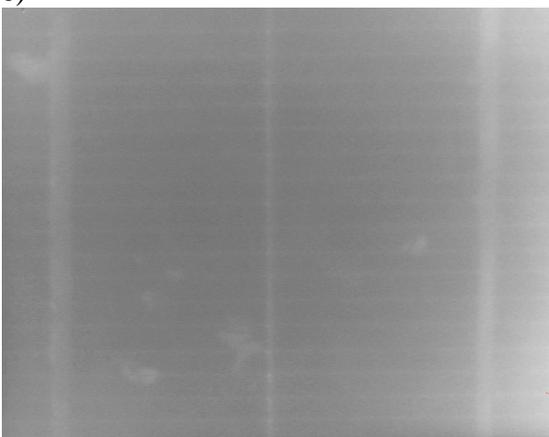
b)



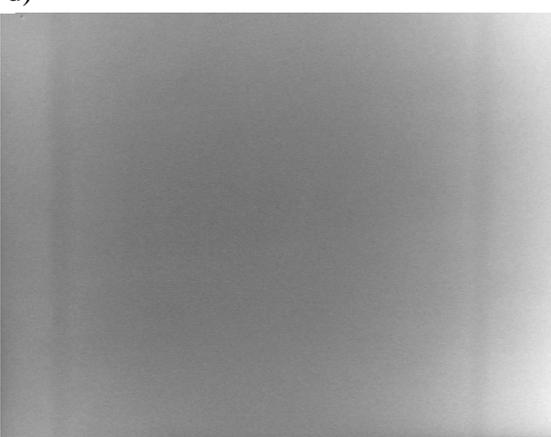
c)



d)



e)



f)