

DESCRIZIONE

A corredo di una domanda di Brevetto per Invenzione avente per titolo:
"Scatterometro a sfera integratrice, sensore di posizione e dimensione di oggetti, e relativi metodi di misura"

Richiedente: ENEA, Ente per le Nuove Tecnologie e l'Ambiente

Inventori: Antonio PARRETTA, Pasquale MORVILLO, Eugenia BOBEICO.

RIASSUNTO

L'invenzione riguarda uno scatterometro a sfera integratrice per la caratterizzazione superficiale di campioni (c) di materiale o la caratterizzazione di diffusione di sorgenti luminose (la) di tipo puntiforme, comprendente: nel caso della caratterizzazione superficiale di campioni (c) di materiale, una sorgente di luce (l) che produce un fascio di luce collimato (li) modulato ad una frequenza f_1 che incide sul campione (c) sotto analisi ad un angolo δ rispetto alla direzione normale z , e una testa di misura ($tm1$) comprendente un fotorivelatore ($fr2$) per la rivelazione di una parte (lr) di luce (ld) diffusa indietro dal campione (c) in risposta a detto fascio di luce collimato (li), in trasmissione o in riflessione, oppure diffusa dalla sorgente luminosa (la) di tipo puntiforme, caratterizzato dal fatto che detta parte (lr) di luce è raccolta da una sfera integratrice (si) presentante una finestra (f), posta su un asse ζ orientato ad un angolo ψ rispetto a detta direzione normale z e a distanza x dal campione (c) o dalla sorgente luminosa (la) di tipo puntiforme, la distanza x potendo assumere anche valori negativi per i

quali la sorgente (I_a) di tipo puntiforme risulta all'interno della sfera integratrice (s_i), detta parte (I_r) di luce essendo raccolta entro un angolo solido Ω attorno a detto asse ζ , ovvero entro un semiangolo lineare θ , il fotorilevatore (fr_2) misurando la luce integrata dalla sfera a partire dalla luce (I_r) raccolta dalla sfera, l'angolo solido Ω essendo funzione della distanza x .

L'invenzione riguarda altresì un sensore utilizzante lo scatterometro nonché i relativi metodi di misura.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELL'INVENZIONE

L'invenzione riguarda uno scatterometro a sfera integratrice, sensore di posizione e dimensione di oggetti, e relativi metodi di misura.

Più in particolare, l'invenzione riguarda un metodo ed il relativo apparato per la caratterizzazione angolare della luce diffusa da una superficie illuminata, in particolare da superfici testurizzate di dispositivi fotovoltaici, oppure emessa da sorgenti di luce diffusa. L'apparato, opportunamente modificato, è anche utilizzabile come sensore di distanza, dimensione, velocità e colore di oggetti attraverso un metodo specifico di misura.

Una visione qualitativa della luce diffusa da superfici fotovoltaiche testurizzate è ottenibile con l'apparato oggetto della domanda di brevetto "Apparecchio per la riproduzione della figura di diffusione della luce da campioni fotovoltaici", Applicazione N. RM2001A000576, del 24 Settembre 2001, con il quale sono state ottenute le figure 5 b), 6 b) e 7 b), e che nel seguito sarà chiamato

fotocamera CARDIFF ("CAmera for Recording DIFFusion and DIFFraction figures"). Tuttavia, una quantificazione utile con tale apparato è ottenibile solo a prezzo di una maggiore complessità di misura.

Un esempio molto noto di celle solari testurizzate sono le celle al silicio amorfo (a-Si) con struttura a superstrato, nelle quali è presente uno strato di ossido trasparente e conduttore (TCO), depositato su vetro con tecniche che favoriscono la formazione di una superficie rugosa. Le proprietà diffusive del TCO permettono di ottimizzare la raccolta della luce da parte dei sottili strati sottostanti di silicio amorfo. Esse sono sintetizzate dal parametro "haze", che rappresenta la rugosità della superficie, espresso dal rapporto tra trasmittanza diffusa e trasmittanza totale. Il parametro "haze" è l'unica informazione che viene generalmente ricavata per questo tipo di strutture.

Nelle celle solari con struttura a substrato, ad esempio quelle al silicio cristallino (c-Si), è largamente diffusa, invece, la testurizzazione diretta del semiconduttore che assorbe la radiazione incidente. Per questo tipo di celle non viene definito alcun parametro ottico di tipo "haze", e l'efficacia della testurizzazione è valutata in maniera indiretta misurando l'intensità della fotocorrente generata nel dispositivo. Sono stati comunque sviluppati modelli ottici per simulare la raccolta della luce in alcuni tipi di tessiture applicate su queste celle. Per entrambi i tipi di dispositivi citati, non è comune la caratterizzazione ottica in funzione dell'angolo di diffusione.

La misura della luce diffusa da una superficie, opaca o

semitrasparente, in trasmissione o in riflessione, in funzione dell'angolo di diffusione, costituisce in generale un mezzo molto efficace per valutarne indirettamente la morfologia. Che si tratti di una superficie speculare di cui si voglia valutare la planarità media, la residua rugosità e la presenza di difetti, o che si tratti di una superficie intenzionalmente resa rugosa allo scopo di diffondere la luce, la conoscenza della funzione di distribuzione angolare (FDA), risultante dalla misura del profilo d'intensità della luce diffusa in funzione dell'angolo di osservazione (o angolo di diffusione) risulta uno strumento di analisi estremamente efficace. Nel campo dei materiali e dispositivi fotovoltaici, la testurizzazione della superficie o delle interfacce è un processo molto comune, reso necessario dall'esigenza di migliorare l'efficienza di raccolta della luce in dispositivi che, per motivi economici, debbono essere realizzati con la minima quantità di materiale possibile e quindi molto sottili. Interagendo con una superficie testurizzata, la luce incidente subisce una serie di riflessioni e rifrazioni che ne cambiano la direzione, favorendone la diffusione laterale e quindi l'assorbimento da parte del materiale semiconduttore.

Un esempio di formazione della FDA in trasmissione è mostrato nella allegata figura 1 per un campione semitrasparente di TCO/vetro. La FDA può comprendere anche una componente speculare, come mostrato nella stessa figura. In figura 2 è mostrato invece un esempio di FDA in riflessione, come effetto della tessitura a piramidi invertite di uno strato di silicio cristallino, accompagnata da una FDA prodotta per trasmissione della luce all'interno della cella solare.

Nell'esempio di figura 1, la distribuzione della luce diffusa in trasmissione può essere misurata muovendo opportunamente un fotodiodo di fronte al fascio diffuso. Nell'esempio illustrato in figura 2, invece, la luce diffusa all'interno del semiconduttore, quella significativa dal punto di vista della produzione delle cariche elettriche, non può essere misurata direttamente. Ciononostante, si è trovato che la FDA esterna, in riflessione, può essere messa in relazione con le proprietà di assorbimento della cella, e quindi, in maniera indiretta, con le proprietà diffusive della luce all'interno del semiconduttore. Anche in questo caso la FDA può essere misurata orientando opportunamente un fotorivelatore di fronte al fascio diffuso.

In figura 3 è mostrato lo schema di massima di un apparato (scatterometro a fotorivelatore angolare) per la misura della FDA in riflessione. Il fascio di luce della sorgente I incide perpendicolarmente sul campione c . L'intensità della luce diffusa da c nella direzione \underline{r} , in corrispondenza dell'angolo zenitale θ e dell'angolo azimutale ϕ , è misurata dal fotorivelatore r e dal voltmetro v . Variando gli angoli θ e ϕ si costruisce la FDA del campione c , alla lunghezza d'onda λ_0 del fascio incidente. In maniera equivalente si ottiene la FDA in trasmissione ponendo il fotorivelatore r dalla parte opposta del campione. La FDA di un campione otticamente isotropo è rappresentata da un solido di rivoluzione (vedi figura 4), dove il vettore OP rappresenta l'intensità della luce diffusa nella direzione individuata dall'angolo θ . In questo caso la misura in funzione dell'angolo azimutale ϕ non è necessaria. Molti campioni fotovoltaici, tuttavia, non sono isotropi rispetto all'asse z .

E' sufficiente a tal fine osservare le testurizzazioni più comuni realizzate sulle celle solari al silicio cristallino, ottenute seguendo due diverse procedure. Nella prima, quella comunemente adottata per celle ad alta efficienza, si realizzano, tramite tecniche di fotolitografia, cavità a forma di piramide (attacco anisotropo di silicio monocristallino) o di buca semicircolare (attacco isotropo di silicio multicristallino), distribuite regolarmente su un reticolo quadrato o a nido d'ape (vedi figura 5a e 6a). Nella seconda, quella comunemente adottata per celle di media efficienza e per quasi tutte le celle commerciali al silicio cristallino, si realizzano strutture piramidali diritte, distribuite randomicamente sulla superficie e disomogenee nelle dimensioni (vedi figura 7a), tramite attacco anisotropo del silicio cristallino senza l'uso di maschere. Le strutture regolari ottenute con la prima procedura portano alla formazione di figure di diffusione o di diffrazione (FDD), che sono caratteristiche della particolare geometria adottata. Le FDD sono ottenute per proiezione della luce diffusa dal campione su di un piano ortogonale all'asse ottico. Queste figure sono state ottenute per mezzo della fotocamera CARDIFF, apparato descritto nell'invenzione sopra citata (Brevetto It. N. RM2001A000576). La FDD relativa al reticolo quadrato di piramidi è mostrata in figura 5b, mentre la FDD relativa al reticolo a nido d'ape di buche emisferiche è mostrata in figura 6b. Nel caso della testurizzazione randomica di piramidi diritte, a causa dell'orientazione uniforme delle piramidi, la FDD mostrata in figura 7b mette in evidenza l'esistenza di direzioni privilegiate di riflessione della luce.

Le FDD mostrate nelle figure 5b, 6b e 7b sono state ottenute esponendo una lastra fotografica piana di fronte al campione illuminato da un fascio di luce laser con $\lambda = 633$ nm. Come si vede, in tutti i casi esaminati la distribuzione della luce non è simmetrica rispetto all'asse ottico, e quindi la corrispondente funzione di distribuzione angolare (FDA) non è un solido di rivoluzione.

Questo comporta che, per questo tipo di tessiture, le più diffuse nel campo fotovoltaico, la costruzione della FDA completa richiede un numero elevato di misure. Infatti, discretizzando l'intervallo angolare di θ in n_θ punti e l'intervallo angolare di ϕ in n_ϕ punti, risulta necessario effettuare $n = n_\theta \cdot n_\phi$ misure, tipicamente dell'ordine delle centinaia. Le misure per la costruzione della FDA secondo il metodo convenzionale illustrato in figura 3, o metodo dello scatterometro a fotorivelatore, risultano, da quanto illustrato sinora, alquanto laboriose. D'altra parte, ai fini della raccolta della luce da parte del dispositivo fotovoltaico, non è l'informazione della distribuzione azimutale della luce misurata, trasmessa o riflessa, a rivestire particolare importanza, quanto quell'informazione media calcolata rispetto all'angolo di azimut.

In alternativa al metodo del fotorivelatore, nella presente invenzione viene proposto un diverso metodo, e descritto il relativo apparato, che risulta altrettanto semplice dello scatterometro a fotorivelatore, ma che presenta il vantaggio fondamentale di misurare direttamente il valor medio azimutale dell'intensità diffusa, laddove la misura risolta nell'angolo azimutale non è richiesta. In tal caso si riduce notevolmente numero di misure e tempo necessari per la costruzione

della FDA. In aggiunta a ciò, l'apparato di misura a sfera integratrice, grazie all'uso di un sistema ottico di riferimento interno, è in grado di effettuare la misura della FDA su campioni di qualsiasi dimensione, purché otticamente omogenei, e quindi il metodo sviluppato si può considerare di tipo non distruttivo.

Scopo della presente invenzione, è quello di fornire uno scatterometro a sfera integratrice che superi gli inconvenienti e risolva i problemi della tecnica anteriore.

Scopo ulteriore della presente invenzione è quello di fornire un metodo semplice per misurare la radiazione diffusa da una generica superficie in funzione dell'angolo di diffusione, che superi gli inconvenienti e risolva i problemi della tecnica anteriore e che faccia uso dello scatterometro scopo dell'invenzione.

Ancora, è scopo specifico della presente invenzione, un sensore di posizione, dimensione, colore e velocità di oggetti, utilizzando uno scatterometro a sfera integratrice, che superi gli inconvenienti e risolva i problemi della tecnica anteriore.

Inoltre, è scopo specifico della presente invenzione un metodo di misura di posizione, dimensione, colore e velocità di oggetti che faccia uso del sensore scopo dell'invenzione.

E' oggetto della presente invenzione uno scatterometro a sfera integratrice per la caratterizzazione superficiale di campioni di materiale o la caratterizzazione di diffusione di sorgenti luminose di tipo puntiforme, comprendente:

- nel caso della caratterizzazione superficiale di campioni di

- materiale, una sorgente di luce che produce un fascio di luce collimato ad una frequenza f_1 che incide sul campione sotto analisi ad un angolo δ rispetto alla direzione normale z ,
- una testa di misura comprendente un fotorivelatore per la rivelazione di una parte di luce diffusa indietro dal campione in risposta a detto fascio di luce collimato, in trasmissione o in riflessione, oppure diffusa dalla sorgente luminosa di tipo puntiforme,

caratterizzato dal fatto che detta parte di luce è raccolta da una sfera integratrice presentante una finestra, posta su un asse ζ orientato ad un angolo ψ rispetto a detta direzione normale z e a distanza x dal campione o dalla sorgente luminosa di tipo puntiforme, la distanza x potendo assumere anche valori negativi per i quali il campione o la sorgente di tipo puntiforme risulta all'interno della sfera integratrice, detta parte di luce essendo raccolta entro un angolo solido Ω attorno a detto asse ζ , ovvero entro un semiangolo lineare θ , il fotorivelatore misurando la luce integrata dalla sfera a partire dalla luce raccolta dalla sfera, l'angolo solido Ω essendo funzione della distanza x .

Preferibilmente secondo l'invenzione, per evitare che la sfera integratrice, al variare della distanza x lungo l'asse ζ disturbi il fascio incidente, la sfera integratrice presenta una fenditura atta a far passare il fascio luminoso, nel caso di detta caratterizzazione superficiale, durante il movimento, la fenditura essendo ottenuta per intersezione della sfera con la direzione del fascio di luce collimato.

Preferibilmente secondo l'invenzione, z coincide con ζ , il fascio

di luce collimato, nel caso di detta caratterizzazione superficiale, incidendo perpendicolarmente al campione.

Preferibilmente secondo l'invenzione, lo scatterometro comprende un foro, praticato sulla parte della sfera integratrice opposta alla finestra, tale che, quando la luce è emessa in riflessione dal campione, la luce collimata proveniente da detta sorgente di luce attraversa indisturbata la sfera integratrice passando dapprima attraverso il foro, dimensionato in modo da non disturbare il funzionamento della sfera integratrice, ed arriva al campione posto sull'asse ottico z .

Preferibilmente secondo l'invenzione, quando la luce è emessa in trasmissione dal campione, il campione è posto tra la sorgente di luce e la sfera integratrice.

Preferibilmente secondo l'invenzione, detta finestra è circolare e ha diametro D .

Preferibilmente secondo l'invenzione, il fotorivelatore è un fotodiodo, in particolare quando la sorgente di luce, nel caso di detta caratterizzazione superficiale, è un laser.

Preferibilmente secondo l'invenzione, il fotorilevatore è collegato ad almeno un radiometro.

Preferibilmente secondo l'invenzione, lo scatterometro comprende un meccanismo di traslazione automatica del campione o di detta sorgente luminosa di tipo puntiforme o della sfera integratrice per variarne la distanza reciproca x in modo da raccogliere la luce emessa dal campione in modo continuo, con differenti valori dell'angolo solido

Ω , sincronizzando il movimento con l'acquisizione dei segnali tramite un opportuno dispositivo di elaborazione dati.

Preferibilmente secondo l'invenzione, nel caso di detta caratterizzazione superficiale, le dimensioni della finestra sono piccole rispetto alle dimensioni trasversali del campione, in modo che, quando il campione è molto ravvicinato alla sfera integratrice, al limite quando per $x = 0$ la sua superficie si sovrappone a quella della finestra, la sua presenza non alteri apprezzabilmente le perdite ottiche della sfera integratrice.

Preferibilmente secondo l'invenzione, lo scatterometro comprende un'ulteriore testa di misura comprendente una sorgente di luce supplementare e un fotorivelatore supplementare, il fotorivelatore supplementare essendo atto ad effettuare, per ogni valore scelto della distanza x tra campione e sfera, una misura della luce supplementare integrata dalla sfera integratrice, la luce supplementare essendo operante alla stessa lunghezza d'onda λ della sorgente di luce o della sorgente luminosa di tipo puntiforme ed illuminando la parete interna della sfera integratrice dall'interno della sfera stessa per mezzo di una radiazione di test il cui flusso integrato viene misurato dal fotorivelatore supplementare, il segnale luminoso emesso dalla luce supplementare essendo modulato ad una frequenza f_2 diversa da f_1 attraverso un alimentatore o generatore di segnali.

Preferibilmente secondo l'invenzione, l'ulteriore testa di misura è divisa in due sezioni, la prima sezione contenendo la sorgente di luce supplementare, un filtro neutro o interferenziale e una lente

convergente, la luce della sorgente di luce supplementare essendo focalizzata dalla lente sulla parete interna della sfera integratrice, la luce di test, integrata dalla sfera integratrice, pervenendo alla seconda sezione della ulteriore testa di misura, dove essa viene diffusa da un diffusore, filtrata dal filtro neutro o interferenziale e convertita in segnale elettrico dal fotorivelatore.

Preferibilmente secondo l'invenzione, detta ulteriore sorgente di luce è una sorgente di luce LED.

E' oggetto specifico della presente invenzione un metodo di misura della funzione di distribuzione angolare di una luce diffusa, utilizzando lo scatterometro a sfera integratrice secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 13, caratterizzato dal fatto che luce diffusa è raccolta entro un intervallo di θ compreso tra circa 0° per $x \gg D$ e 90° esatti per $x = 0$, ottenendo così il flusso radiante raccolto o intercettato dalla sfera, espresso in funzione della distanza x , dal quale si ricava il profilo dell'intensità della luce diffusa, ovvero la funzione di distribuzione angolare della luce diffusa o FDA.

Preferibilmente secondo l'invenzione, la FDA, mediata rispetto all'angolo ϕ , è ricavata a partire dal flusso integrale $\Phi_{in}(\theta)$ della luce raccolta dalla sfera entro l'angolo solido $\Omega(\theta)$ e dall'intensità $I(\theta, \phi)$ della luce diffusa verso la direzione di osservazione (θ, ϕ) , $\Phi_{in}(\theta)$ esprimendosi come:

$$\Phi_{in}(\theta) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} d\varphi \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha, \phi)$$

e l'intensità media della luce diffusa ad angolo θ , $\bar{I}(\theta)$, ottenendosi differenziando $\Phi_{in}(\theta)$:

$$\bar{I}(\theta) = \frac{1}{2\pi \sin \theta} \cdot \frac{d}{d\theta} \Phi_{in}(\theta)$$

Preferibilmente secondo l'invenzione, il rumore che accompagna l'intensità $\bar{I}(\theta)$ è diminuito adottando una modalità di interpolazione dei dati o di filtraggio della funzione $\Phi_{in}(\theta)$, prima di procedere al calcolo del differenziale.

Preferibilmente secondo l'invenzione, si interpola la FDA sperimentale del campione con un ellissoide di rivoluzione teorico con un semiasse trasversale ed un semiasse longitudinale orientati rispetto all'asse ottico z, e determinando così il fattore di forma $ff = aa/cc$ proprio dell'ellissoide.

Preferibilmente secondo l'invenzione, per ottenere un valore più accurato di ff , mediato sull'intero intervallo delle distanze esaminato, si calcola l'integrale degli ellissoidi di rivoluzione teorici in funzione di ff , tracciando con questi valori una curva di calibrazione e interpolando su questa curva l'integrale della curva sperimentale FDA ed ottenendo così il corrispondente fattore di forma ff relativo alla luce diffusa.

E' oggetto specifico della presente invenzione un sensore di posizione, dimensione, colore e velocità di oggetti, comprendente una sfera integratrice presentante una finestra, caratterizzato dal fatto che la sfera integratrice comprende una testa di misura comprendente almeno una sorgente di luce e almeno un rispettivo fotorivelatore, detta almeno

una sorgente di luce emettendo almeno una luce di test, una parte di detta almeno luce di test uscendo dalla sfera attraverso la finestra, detto almeno un rispettivo fotorivelatore essendo atto ad effettuare una misura della luce che rientra attraverso la finestra in seguito alla riflessione da parte dell'oggetto esterno alla sfera ed integrata nuovamente dalla sfera integratrice.

Preferibilmente secondo l'invenzione, la testa di misura è divisa in due sezioni, la prima sezione contenendo almeno una sorgente di luce, almeno un rispettivo filtro neutro o interferenziale e almeno una rispettiva lente convergente, la luce di detta almeno una sorgente di luce essendo focalizzata da detta almeno una lente sulla parete interna della sfera integratrice, almeno una luce di test, integrata dalla sfera integratrice, pervenendo alla seconda sezione della testa di misura, dove essa viene diffusa da almeno un rispettivo diffusore, filtrata da almeno un rispettivo filtro neutro o interferenziale e convertita in segnale elettrico da almeno un rispettivo fotorivelatore.

Preferibilmente secondo l'invenzione, detta almeno una sorgente di luce è una sorgente di luce LED.

Preferibilmente secondo l'invenzione, detta prima sezione contiene tre sorgenti di luce, tre rispettivi filtri neutri o interferenziali e tre lenti convergenti, corrispondenti ai colori RGB, detta seconda sezione contenendo tre rispettivi diffusori, tre rispettivi filtri neutri o interferenziali e tre rispettivi fotorivelatori.

E' oggetto specifico della presente invenzione un metodo di misura di posizione, dimensione, colore e velocità di oggetti,

caratterizzato dal fatto di utilizzare la risposta fornita dal sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 19 a 22.

Preferibilmente secondo l'invenzione, il metodo utilizza un campione di test a superficie testurizzata, distinto dall'oggetto da esaminare, ma ad esso accoppiato, operando a una distanza alla quale l'oggetto è indifferente alla sfera, mentre il campione di test è in interazione con essa.

L'invenzione verrà ora descritta a titolo illustrativo ma non limitativo, con particolare riferimento alle figure dei disegni allegati, in cui:

- la figura 1 mostra la formazione della FDA in trasmissione per diffusione della luce collimata da parte di una struttura finestra del tipo vetro/TCO impiegata in celle solari con struttura a superstrato;
- la figura 2 mostra la formazione di una FDA riflessa, esterna alla cella solare, e di una FDA trasmessa, interna al dispositivo, per una cella solare con struttura a substrato;
- la figura 3 mostra uno schema dell'apparato convenzionale (scatterometro a fotorivelatore angolare) per la misura della distribuzione angolare dell'intensità diffusa (FDA) da una superficie illuminata localmente;
- la figura 4 mostra un esempio di funzione di distribuzione angolare (FDA), di una superficie (s) illuminata, isotropa rispetto all'asse z, ottenuta con l'apparato di figura 3 variando gli angoli θ (da 0° a 90°) e ϕ (da 0° a 360°);

- la figura 5a una testurizzazione regolare a reticolo quadrato di piramidi inverse su cella al silicio monocristallino e
- la figura 5b un negativo della figura di diffrazione (FDD) registrata con la fotocamera CARDIFF: il foro centrale nella foto b) è stato praticato sulla lastra per permettere il passaggio del fascio laser;
- la figura 6a mostra una testurizzazione regolare a nido d'ape di buche emisferiche HW ("Hemispherical Wells") su cella al silicio multicristallino;
- la figura 6b mostra un negativo della figura di diffrazione (FDD) registrata con la fotocamera CARDIFF;
- la figura 7a mostra una testurizzazione randomica (rispetto alla posizione e alle dimensioni) con piramidi diritte, su cella commerciale al silicio cristallino ottenuta per "screen printing"; le piramidi sono orientate tutte verso la stessa direzione;
- la figura 7b mostra un negativo della figura di diffrazione (FDD) registrata con la fotocamera CARDIFF;
- la figura 8 mostra uno schema della misura della luce diffusa da un campione illuminato, secondo il metodo della sfera integratrice, o metodo BASALT: a) misura in riflessione, b) misura in trasmissione;
- la figura 9 mostra un diagramma polare in sezione longitudinale della funzione di distribuzione angolare, o FDA, dell'intensità della luce diffusa $I(\theta)$ da un diffusore quasi-

lambertiano, ricavata applicando l'equazione (2) illustrata nel seguito del testo: la curva di $I(\theta)$ non filtrata è molto rumorosa, particolarmente a bassi angoli dove il rapporto S/N è inferiore; per confronto è riportata la curva di $\cos(\theta)$ che rappresenta la sezione della FDA di un diffusore ideale, o lambertiano;

- la figura 10 mostra delle sezioni longitudinali di ellissoidi di rivoluzione di tipo prolato, modelli della funzione di distribuzione angolare FDA impiegati estensivamente nella presente invenzione, calcolati per diversi valori del rapporto (fattore di forma o "aspect ratio") $ff = aa/cc$;
- la figura 11 mostra delle intensità integrali normalizzate $I_{in}(x)$ di ellissoidi prolati, calcolate in funzione della distanza sfera-campione per diversi valori del fattore di forma ff (diametro finestra: $D = 60$ mm);
- la figura 12 mostra il flusso relativo $I_{in}(x)$ intercettato dalla sfera, espresso in funzione della distanza campione-sfera, per un campione tesaurizzato con piramidi inverse, confrontato con le curve teoriche di $I_{in}(x)$ calcolate per alcuni valori del fattore di forma di ellissoidi prolati;
- la figura 13 mostra lo schema generale di una versione dello scatterometro introdotto con la presente invenzione, per la misura della luce diffusa in riflessione da un campione testurizzato di piccole dimensioni rispetto alla finestra f ;
- la figura 14 mostra lo schema generale di una versione dello

- scatterometro introdotto con la presente invenzione, per la misura della luce diffusa in trasmissione da un campione testurizzato di piccole dimensioni rispetto alla finestra f ;
- la figura 15 mostra lo schema generale di una versione dello scatterometro introdotto con la presente invenzione, per la misura della luce diffusa in riflessione da un campione testurizzato di grandi dimensioni rispetto alla finestra f ;
 - la figura 16 mostra un particolare della testa di misura $tm2$ contenente la sezione sorgente e fotorivelatore per il monitoraggio delle perdite ottiche della sfera integratrice;
 - la figura 17 mostra delle curve di flusso misurato in riflessione dal segnale $sign_1(x)$ (vedi figg. 13 e 15) per i campioni Labsphere[®] SRS-99-010 e SRS-99-020, di diametro rispettivamente di 1" e 2";
 - la figura 18 mostra una funzione di correzione da apportare alle misure di flusso per tener conto dell'effetto tappo ("capping") prodotto dai campioni Labsphere[®] sulla finestra della sfera;
 - la figura 19 mostra delle curve di flusso diffuso normalizzato dei campioni Labsphere[®] SRS-99-010 e SRS-99-020, dopo la correzione attraverso la funzione $sign_2(x)/sign_2(0)$;
 - la figura 20 mostra il flusso normalizzato del campione Labsphere[®] SRS-99-020, confrontato con quello calcolato per alcuni tipi di ellissoidi di rivoluzione. Il fattore di forma risulta $ff = aa/cc = 1.05$, corrispondente ad un ellissoide

lievemente oblato;

- la figura 21 mostra la funzione di distribuzione angolare (FDA) del campione Labsphere[®] SRS-99-020, ottenuta con i due metodi proposti nella presente invenzione (modello della derivata e modello ellissoidale) e confrontata con quella ricavata col metodo del fotorivelatore angolare;
- la figura 22 mostra l'aspetto superficiale del campione testurizzato creato dagli inventori e dagli stessi denominato "HW1", come visto al microscopio ottico;
- la figura 23 mostra la FDA del campione testurizzato HW1 di piccole dimensioni, come ottenuta col fotorivelatore angolare. I dati sperimentali si accordano bene con un'ellisse con fattore di forma $ff = aa/cc = 0.045$; la scala delle x è stata intenzionalmente dilatata rispetto a quella delle y per mostrare meglio l'andamento dei dati;
- la figura 24 mostra una funzione di correzione da apportare alle misure di flusso per tener conto dell'effetto tappo o "capping" prodotto dai campioni HW1 sulla finestra della sfera. Area campione HW1 piccolo: $\approx 1 \text{ cm}^2$; area campione HW1 grande: $\approx 10 \text{ cm}^2$; area finestra della sfera: $\approx 28 \text{ cm}^2$;
- la figura 25 mostra dei dati sperimentali di flusso intercettato dallo scatterometro a sfera secondo l'invenzione per i campioni HW1 di piccole e grandi dimensioni;
- la figura 26 mostra una FDA del campione vetro/TCO, ottenuta col fotorivelatore angolare: i dati sperimentali si

accordano bene con un'ellisse con fattore di forma $ff = aa/cc$
= 0.83;

- la figura 27 mostra delle curve di flusso relativo intercettato dalla sfera BASALT sul campione vetro/TCO: le misure sono state fatte con luce laser a 543 nm (verde), e sono mostrate anche alcune curve calcolate per ellissoidi prolati; la curva sperimentale si accorda al meglio con quella calcolata per un fattore di forma $ff = aa/cc = 0.86$;
- la figura 28 mostra una curva di flusso ottenuta secondo l'invenzione del campione di silicio policristallino, chiamato dagli inventori "PSEUR1", prodotto dalla Eni Tecnologie S.p.A., con testurizzazione piramidale. Sono mostrate anche alcune curve teoriche di ellissoidi prolati;
- la figura 29 mostra dei profili dell'intensità radiante della luce verde diffusa da un grano del campione di silicio policristallino PSEUR1, per quattro valori dell'angolo di azimut;
- la figura 30 mostra dei profili della FDA per un grano del campione di silicio policristallino PSEUR1, per quattro valori dell'angolo di azimut: la forma a deltoide rovesciato comune alle quattro curve è stata elegantemente anticipata dalle misure con lo scatterometro ed il metodo secondo l'invenzione;
- la figura 31 mostra l'influenza delle dimensioni relative del campione sulla misura che usa lo scatterometro secondo

l'invenzione;

- la figura 32 mostra una rappresentazione schematica dello scatterometro configurato per la più generica misura, nella quale δ sia l'angolo d'incidenza del fascio rispetto alla normale al campione, e ψ sia l'angolo di orientazione dell'asse ottico della sfera, anch'esso misurato rispetto alla normale al campione;
- la figura 33 mostra uno schema dell'apparato nella misura della FDA di una sorgente di piccole dimensioni con l'apparato secondo l'invenzione: a) misura della FDA frontale, con la sorgente all'esterno della sfera ($x > 0$, $\theta < 90^\circ$, $\Omega < 2\pi$ steradiani); b) misura della FDA posteriore, con la lampada all'interno della sfera ($x < 0$, $\theta > 90^\circ$, $\Omega > 2\pi$ steradiani);
- la figura 34 mostra una prima forma di realizzazione del sensore ottico secondo l'invenzione;
- la figura 35 mostra una seconda forma di realizzazione del sensore ottico secondo l'invenzione;
- la figura 36 mostra un esempio di realizzazione della testa di misura utilizzata nei dispositivi delle figure 34 e 35.

Nelle figure verranno utilizzati uguali segni di riferimento per identici elementi.

La figura 8 mostra schematicamente alcuni esempi di misura di luce diffusa da campioni di piccole dimensioni, in riflessione e in trasmissione, secondo il metodo proposto con la presente invenzione.

Nella modalità in riflessione, la luce collimata proveniente da una sorgente attraversa indisturbata la sfera integratrice s_i , grazie ad un piccolo foro o praticato sulla parte posteriore, e giunge al campione c posto sull'asse ottico z e perpendicolare ad esso. Qui la luce viene diffusa indietro e una porzione di essa, quella compresa entro l'angolo solido Ω , ovvero entro il semiangolo lineare θ , viene raccolta dalla sfera s_i attraverso la finestra f , di diametro D , posta alla distanza x dal campione. L'intensità d'illuminazione della sfera è misurata attraverso il fotorivelatore fr , tipicamente un fotodiodo quando si lavora con i laser, e il radiometro. Nel modo in trasmissione si opera in maniera analoga, con la differenza che il campione è posto tra sorgente e sfera. Traslando allora la sfera rispetto al campione lungo l'asse ottico, è possibile raccogliere la luce diffusa entro un angolo solido

$$= \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{x} \right)^2$$

variabile. Operando entro un intervallo sufficientemente ampio di θ (cioè tra $\sim 0^\circ$ per $x \gg D$ e 90° esatti per $x = 0$), si ottiene il flusso radiante raccolto o intercettato dalla sfera, espresso in funzione della distanza x , dal quale si ricava il profilo dell'intensità della luce diffusa dal campione, ovvero la funzione FDA. La sfera raccoglie allo stesso modo e contemporaneamente la luce diffusa inclinata allo stesso angolo θ e non distingue quindi gli angoli azimutali ϕ , come anticipato in precedenza. In tal modo la sfera effettua automaticamente la media dell'intensità della luce diffusa ad un angolo θ , come da noi desiderato

per l'analisi di campioni fotovoltaici. Il metodo e l'apparato secondo l'invenzione saranno nel seguito indicati col nome "BASALT", acronimo di "backscattering light topography" e "backscattering light topographer", rispettivamente.

Prima di mostrare in dettaglio l'apparato sperimentale, con le procedure di misura per effettuare misure anche su campioni di grandi dimensioni, descriviamo qui di seguito due metodi per il calcolo della FDA a partire dalle misure sperimentali del flusso radiante intercettato, effettuate secondo gli schemi della figura 8. Questi metodi si applicano indipendentemente dalle dimensioni del campione.

Il primo metodo descritto consente di ricavare la forma precisa della FDA, mediata rispetto all'angolo ϕ , ma richiede una particolare attenzione nell'elaborazione dei dati sperimentali. Chiamando con $\Phi_{in}(\theta)$ il flusso integrale della luce raccolta dalla sfera entro l'angolo solido $\Omega(\theta)$ e $I(\theta, \phi)$ l'intensità della luce diffusa verso la direzione di osservazione (θ, ϕ) , allora $\Phi_{in}(\theta)$ si può esprimere come:

$$\Phi_{in}(\theta) = \int_{\phi=0}^{2\pi} d\phi \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha, \phi) \quad (1)$$

L'intensità media della luce diffusa ad angolo θ , $\bar{I}(\theta)$, si ottiene differenziando $\Phi_{in}(\theta)$:

$$\bar{I}(\theta) = \frac{1}{2\pi \sin \theta} \cdot \frac{d}{d\theta} \Phi_{in}(\theta) \quad (2)$$

L'intensità ricavata dall'equazione (2) è di solito accompagnata da molto rumore a causa della natura discreta dei dati. Un esempio è riportato in figura 9 per un diffusore di tipo lambertiano. Questo problema può essere superato adottando una tra le tante modalità di interpolazione dei dati o di filtraggio della funzione $I_{in}(\theta)$, prima di procedere al calcolo del differenziale, facendo attenzione a non alterare significativamente l'andamento dei dati sperimentali. Quando questo succederà, sarà necessario sacrificare una parte dei dati.

Il secondo metodo è più semplice, ma comporta un certo grado di approssimazione dei risultati. L'approssimazione consiste nell'assegnare alla FDA del campione la forma di un ellissoide di rivoluzione (vedi figura 4), caratterizzato da un semiasse trasversale aa , e da un semiasse longitudinale cc , orientati rispetto all'asse ottico z . Il rapporto $ff = aa/cc$ sarà chiamato fattore di forma ("aspect ratio") e sarà $ff < 1$ per ellissoidi prolati, $ff > 1$ per ellissoidi oblati e $ff = 1$ per una sfera, caratteristica di un diffusore ideale (lambertiano).

Il metodo dell'ellissoide si adatta bene a campioni nei quali la luce sia distribuita più o meno omogeneamente nell'emisfero frontale, anche se sotto forma di spot (vedi figure 5 e 6), nel senso che permette di riprodurre con buona approssimazione la FDA media del campione. Nel caso invece di campioni nei quali siano presenti forti riflessioni verso particolari direzioni (vedi ad esempio la figura 7), il metodo o modello ellissoidale proposto diventa indispensabile per ottenere in tempi ragionevoli un'informazione sulla FDA, e quindi è l'unica alternativa pratica a laboriosissime misure di tipo angolare illustrate in

figura 3.

La figura 10 mostra alcune FDA calcolate, espresse dalla funzione $I(\theta, \phi)$, di forma ellissoidale prolata, proiettate su un piano ortogonale all'asse z. L'equazione dell'ellissoide di rivoluzione in coordinate cartesiane diventa:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{(z - c)^2}{c^2} = 1 \quad (3)$$

L'intensità della luce diffusa $I(\theta, \phi)$ è espressa dalla lunghezza del vettore $r = OP$ (vedi Figura 4):

$$I(\theta, \phi) = I(\theta) = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \frac{2a^2 c \cdot \cos \theta}{a^2 \cdot \cos^2 \theta + c^2 \cdot \sin^2 \theta} \quad (4)$$

L'integrale della relazione (4) fornisce il flusso luminoso raccolto dalla sfera entro l'angolo θ , $\Phi_{in}(\theta)$:

$$\begin{aligned} \Phi_{in}(\theta) &= \\ &= \int_{\phi=0}^{2\pi} d\phi \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha) = \\ &= 2\pi \cdot \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot \frac{2a^2 c \cdot \cos \alpha}{a^2 \cdot \cos^2 \alpha + c^2 \cdot \sin^2 \alpha} \end{aligned} \quad (5a)$$

che deve essere normalizzata in corrispondenza di $\theta = \pi/2$ per avere lo stesso valore unitario indipendentemente dal valore del fattore di forma ff , ponendo:

$$\Phi_{in}(\theta) = \frac{2\pi \cdot \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha)}{2\pi \cdot \int_{\alpha=0}^{\pi/2} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha)} \quad (5b)$$

L'intensità integrale $I_{in}(\theta)$ può essere più semplicemente espressa in funzione della distanza x tra finestra della sfera e campione, ponendo $x = D/(2 \tan \theta)$. Le intensità integrate $I_{in}(x)$ calcolate per alcuni ellissoidi prolati in funzione della distanza x , per un diametro $D = 60$ mm, sono riportate in figura 11.

Le curve lentamente discendenti corrispondono a bassi valori di ff , cioè a diffusioni dirette preferenzialmente lungo l'asse ottico, mentre le curve rapidamente discendenti corrispondono a valori di ff prossimi all'unità, cioè a diffusioni di tipo lambertiano.

Il flusso integrale sperimentale $I_{in}(x)$, misurato con un campione testurizzato a piramidi inverse, è riportato come esempio in figura 12 insieme alle curve teoriche di $I_{in}(x)$ di alcuni ellissoidi prolati. La curva sperimentale di $I_{in}(x)$ è caratterizzata dalle inevitabili fluttuazioni prodotte dalla fuoriuscita discontinua dalla sfera degli spot luminosi per valori crescenti della distanza (vedi ad esempio la figura 5b), ed è prossima alla curva con $ff = 0.2$. Un valore più accurato di ff , mediato sull'intero intervallo delle distanze esaminato, si ottiene calcolando l'integrale delle funzioni teoriche $I_{in}(x)$ in funzione di ff , tracciando con questi valori una curva di calibrazione e interpolando su questa curva l'integrale della curva sperimentale e il corrispondente fattore di forma del campione. Il fattore di forma trovato per il campione IP è risultato pari a $ff = 0.18$.

Lo scatterometro oggetto della presente invenzione è mostrato in dettaglio in figura 13 nella configurazione per la misura in riflessione con campioni di piccole dimensioni. La configurazione dello

scatterometro per le misure in trasmissione cambia semplicemente nel fatto che il campione deve essere posta tra sorgente e sfera, ed è mostrata in figura 14.

La procedura generale di misura è stata descritta precedentemente commentando la figura 8. Qui descriviamo più dettagliatamente l'apparato sperimentale per la misura in riflessione.

La sorgente I è preferibilmente un laser, ma anche sorgenti a lampada si possono usare con un'opportuna ottica di collimazione, purché le dimensioni trasversali del fascio siano limitate per limitare le dimensioni dell'apertura o della sfera integratrice.

Il fascio luminoso è modulato alla frequenza f_1 dal modulatore meccanico mo , che fornisce anche il sincronismo ai radiometri $ra1$ e $ra2$, è selezionato dal diaframma di e diviso in due componenti dal divisore di fascio df . Qui una porzione del fascio è monitorata per controllare la stabilità della sorgente: la luce è attenuata dal filtro ft , convertita in segnale elettrico dal fotorivelatore $fr1$ e misurata dal radiometro $ra1$ come segnale di riferimento ref . La seconda componente del fascio li in uscita da df , dopo un'ulteriore selezione col diaframma dj , entra nella sfera attraverso una piccola apertura o , attraversa indisturbata la sfera ed incide perpendicolarmente sul campione c .

La luce ld diffusa indietro dal campione in parte lp è dispersa nell'ambiente, in parte lr è raccolta dalla finestra f della sfera integratrice si , e viene riflessa dalle pareti diffuse e altamente riflettenti della parete interna p . La luce intercettata da f è integrata dalla sfera si e

produce un irraggiamento uniforme della sua parete interna p , con irradianza indiretta complessiva d'intensità E_λ .

L'intensità E_λ è una funzione lineare del flusso in ingresso, Φ_{in} , ma dipende anche dalla geometria della sfera, in particolare dalle dimensioni dell'apertura f , e dalle proprietà riflessive della sua parete interna. All'aumentare delle dimensioni di f , a parità di flusso in ingresso alla sfera, l'irradianza E_λ diminuisce perché aumentano le dispersioni di luce verso l'esterno.

L'irradianza E_λ è misurata dalla testa di misura $tm1$, costituita dal fotorivelatore $fr2$, dal diffusore d , che omogeneizza la distribuzione della luce su $fr2$, e dal filtro ft . Per una sorgente monocromatica, ft è un filtro neutro, mentre per una sorgente bianca esso può essere un filtro interferenziale qualora si volesse selezionare una particolare lunghezza d'onda.

La luce che perviene al fotorivelatore $fr2$ nella testa $tm1$ deve essere stata preventivamente integrata dalla sfera. A tale scopo, si utilizza lo schermo sc tra la finestra f e il fotorivelatore per impedire che i raggi provenienti dal campione c arrivino direttamente al fotorivelatore senza essere stati integrati per riflessione multipla nella sfera si . Il segnale elettrico prodotto da $fr2$ è mandato in ingresso al radiometro $ra2$ come segnale $sign$ del flusso in ingresso alla sfera. I segnali $sign$ e ref sono letti rispettivamente da $ra1$ e $ra2$ alla frequenza di modulazione f_1 impostata sul modulatore mo . In alternativa all'uso di due radiometri, si può usare un solo radiometro a due canali.

La distanza lungo l'asse ottico z della superficie testurizzata

dalla finestra f può essere variata traslando il portacampioni pc sul tavolo ottico t lungo z e mantenendo fissa la sfera, o viceversa. Nel primo caso si può operare se la zona testurizzata del campione è abbastanza omogenea, in quanto la traslazione di esso può spostare lievemente la regione illuminata. In alternativa, spostando la sfera rispetto al campione, si deve essere certi di non intercettare il fascio in ingresso li con la piccola apertura o , altrimenti verrebbe alterata l'intensità del fascio incidente sul campione.

La misura su piccoli campioni è fatta ponendo il campione su un'asta sottile, possibilmente lunga e posta orizzontalmente sul portacampioni pc . Le dimensioni trasversali del campione debbono essere piccole rispetto alle dimensioni della finestra f , in modo che, quando il campione c è molto ravvicinato alla sfera, al limite quando per $x = 0$ la sua superficie si sovrappone a quella della finestra, la sua presenza non alteri apprezzabilmente le perdite ottiche della sfera. In caso contrario il campione c agirà come un tappo per la finestra e l'intensità d'illuminazione interna E_λ crescerà sovradimensionando i valori del flusso raccolto ad alti angoli θ (vedi figura 8). E' stato verificato sperimentalmente (vedi sezione successiva) che, per campioni di silicio testurizzato con dimensioni laterali dell'ordine di 1 cm, si può usare una finestra f con diametro superiore ai 5 cm per rendere trascurabili (poche unità percentuali di incremento) le variazioni dell'irradianza indiretta complessiva E_λ . La sfera dovrà poi essere dimensionata rispetto alla finestra f tenendo conto che l'apertura complessiva di una sfera integratrice non deve superare il 4% della sua

superficie interna totale, se si vogliono mantenere le sue proprietà integranti, come è ben noto agli esperti del settore. Per una finestra di ~ 6 cm di diametro, è allora necessario operare con una sfera di almeno ~15 cm di diametro.

La misura del flusso radiante della luce diffusa dal campione e raccolta dalla sfera alla distanza x è misurata come grandezza relativa al flusso totale raccolto a distanza $x = 0$. Riferendoci all'apparato di misura di figura 13, esso sarà dato dalla relazione:

$$\frac{rel}{in}(x) = \frac{in(x)}{in(0)} = \left(\frac{sign(x)}{ref(x)} \right) // \left(\frac{sign(0)}{ref(0)} \right) \quad (6)$$

Per campioni di grosse dimensioni, otticamente omogenei, l'apparato descritto è inadeguato, perché comporta una sovrastima del flusso raccolto ad alti angoli, ovvero a piccole distanze x . In questo caso è necessario modificare l'apparato di figura 13 o 14 aggiungendovi un sistema di monitoraggio delle perdite ottiche secondo il principio descritto nel seguito. Le modifiche apportate a tal fine allo scatterometro costituiscono un aspetto fondamentale della presente invenzione.

La figura 15 mostra lo schema generale dello scatterometro configurato per misure in riflessione su grandi campioni. La differenza rispetto allo schema di figura 13 sta nell'aggiunta della testa di misura $tm2$, costituita da una sorgente *led* e da un fotorivelatore *fr3* supplementari. La misura viene condotta come precedentemente, con la variante che ora, per ogni valore della distanza tra campione e sfera, occorre effettuare una misura con il fotorivelatore *fr3*.

Come detto precedentemente, la presenza di un campione di grandi dimensioni di fronte alla sfera *si* altera le proprietà integranti di quest'ultima, in maniera diversa a seconda della sua posizione e delle sue proprietà ottiche. Si tratta allora di monitorare le perdite ottiche della sfera, in modo da correggere opportunamente le letture effettuate con il fotorivelatore *fr2*. Le perdite ottiche debbono essere monitorate alla stessa lunghezza d'onda della radiazione principale *li*. Inoltre, tale monitoraggio deve essere indipendente dall'intensità della radiazione diffusa dal campione. Si è allora predisposta una nuova sorgente di radiazione, ad esempio un LED *led* operante alla stessa lunghezza d'onda λ del laser *l*, che illumina la parete interna della sfera, dall'interno della sfera stessa, per mezzo di una radiazione di test *lt*, il cui flusso integrato viene misurato dal fotorivelatore indipendente *fr3*. Per evitare l'interferenza tra la radiazione *lr* diffusa dal campione e raccolta dalla sfera e la radiazione *lt* introdotta dalla sorgente *led*, entrambe alla stessa lunghezza d'onda λ , occorre modulare il segnale luminoso di *led* ad una frequenza f_2 diversa da f_1 , attraverso l'alimentatore o generatore di segnali *gs*. Il segnale elettrico a frequenza f_2 prodotto da *fr3* viene poi letto come segnale *sign2* dal radiometro *ra3*, il quale riceve il segnale di sincronismo *sync* dal generatore di segnali *gs*. La sorgente *led* e il fotorivelatore *fr3* sono alloggiati all'interno della testa di misura *tm2*.

Risulta chiaro da quanto appena esposto, agli esperti del settore, che la misura dell'intensità della radiazione presente nella sfera a lunghezza d'onda λ e alla frequenza di modulazione f_2 costituisce un

parametro direttamente legato alle perdite ottiche della sfera. In altre parole, la radiazione a lunghezza d'onda λ e alla frequenza di modulazione f_2 subisce, per effetto della presenza del campione di grandi dimensioni c davanti alla finestra f , la stessa alterazione artificiosa cui è soggetta la radiazione di test a lunghezza d'onda λ e alla frequenza di modulazione f_1 . Quindi risulta chiaro che la misura di $fr3$ rappresenta una funzione di correzione per le misure di $fr2$. Tenendo conto che il segnale di $fr2$ deve essere a sua volta normalizzato per mezzo del segnale di riferimento ref per tener conto delle fluttuazioni della luce in ingresso li , possiamo scrivere in definitiva per il flusso radiante relativo della luce diffusa dal campione e raccolta dalla sfera alla distanza x :

$$\Phi_{in}^{rel}(x) = \frac{\Phi_{in}(x)}{\Phi_{in}(0)} = \left(\frac{sign1(x)}{ref(x) \cdot sign2(x)} \right) \Bigg/ \left(\frac{sign1(0)}{ref(0) \cdot sign2(0)} \right) \quad (7)$$

Il dettaglio costruttivo della testa di misura $tm2$ è mostrato in figura 16. La $tm2$ è divisa in due sezioni. La prima sezione contiene la sorgente di luce led , il filtro neutro o interferenziale ft e la lente convergente le . La luce della sorgente led è focalizzata dalla lente le sulla parete interna della sfera integratrice. La luce di test lt , integrata dalla sfera, perviene alla seconda sezione di $tm2$, dove essa viene diffusa dal diffusore d , filtrata dal filtro neutro o interferenziale ft e convertita in segnale elettrico dal fotorivelatore $fr3$.

Misure di intensità radiante di luce diffusa, ovvero di FDA, col metodo proposto nella seguente invenzione, o metodo BASALT, sono

state fatte in riflessione su campioni standard di riflettanza Labsphere[®], caratterizzati da buone proprietà lambertiane, e su campioni di silicio testurizzato secondo uno degli schemi descritti precedentemente.

Misure di intensità radiante in trasmissione sono state fatte inoltre su campioni commerciali di vetro/TCO, con caratteristiche note di rugosità ("haze"). Per validare il metodo proposto, le misure suddette sono state poi confrontate con quelle eseguite con il metodo del fotorivelatore angolare (figura 3). Tutte le misure con tecnica BASALT riportate in questo brevetto sono state eseguite adoperando una sfera integratrice di 15 cm di diametro, realizzata con una finestra di raccolta della luce di 6 cm di diametro corrispondenti esattamente al limite del 4% dell'area totale della superficie interna della sfera.

La figura 17 mostra il flusso diffuso dai campioni Labsphere[®] SRS-99-010 e SRS-99-020, rispettivamente di uno e due pollici di diametro, misurato attraverso il segnale $sign1(x)$ (vedi figura 15). I due campioni, diversi di diametro, presentano uguali caratteristiche ottiche e quindi dovrebbero fornire la stessa curva di flusso diffuso. La discrepanza tra le due curve è dovuta al diverso effetto di chiusura ("capping") che i due campioni esercitano sulla finestra f della sfera integratrice, a piccole distanze dalla stessa. L'effetto di "capping" è stato misurato attraverso la funzione $sign2(x)/sign2(0)$, vedi equazione (7), ed è riportato per i due campioni in figura 18.

Come si nota dalla figura 18, il campione da 2" di diametro, una volta poggiato sulla finestra f da 50 mm di diametro, determina un innalzamento dell'illuminazione della sfera pari al 30%, mentre il

corrispondente effetto da parte del campione da 1" di diametro risulta di circa il 10%.

La figura 19 mostra le curve di flusso diffuso normalizzato per i due campioni Labsphere[®], dopo l'applicazione della funzione di correzione $sign2(x)/sign2(0)$. Come si può notare, la correzione apportata attraverso le misure di $sign2(x)$ riproduce molto bene le proprietà diffusive del campione Labsphere[®] indipendentemente dalle sue dimensioni reali. La stessa procedura per la correzione delle misure è stata adottata con tutti i campioni fotovoltaici testurizzati analizzati.

Ricaviamo ora la funzione FDA dello standard Labsphere[®] a partire da una delle curve di figura 19 (SRS-99-020), applicando sia il modello dell'ellissoide di rivoluzione (vedi figura 10) che quello della derivata del flusso (vedi equazione (2)). I due modelli saranno poi confrontati con i dati sperimentali ricavati col metodo del fotorivelatore angolare.

Per applicare il metodo dell'ellissoide di rivoluzione, è stato necessario calcolare il flusso per diversi modelli di ellissoide, partendo dalle equazioni (4)-(5b). La figura 20 mostra le curve di flusso relativo calcolato per alcuni ellissoidi prolatti, confrontate con la curva di flusso sperimentale misurato sul campione Labsphere[®] SRS-99-020. Il campione Labsphere[®] si accorda bene con l'ellissoide avente fattore di forma aa/cc prossimo a 1.0, come ci si aspetta per essere il campione un diffusore quasi-lambertiano. Il calcolo fatto partendo dall'andamento dell'integrale delle curve modello e interpolandovi il risultato dell'integrale della curva sperimentale porta al valore $ff = aa/cc = 1.05$,

corrispondente ad un ellissoide lievemente oblato. La sorprendente corrispondenza tra la curva sperimentale di flusso e quella calcolata per un ellissoide di rivoluzione, come si può osservare in figura 20, è un caso molto particolare che si è verificato a causa del carattere di quasi-lambertianità del campione Labsphere[®] esaminato.

Per applicare il metodo della derivata del flusso, le curve sperimentali di figura 19 sono state dapprima filtrate con una funzione sigmoideale, quindi derivate rispetto all'angolo θ (vedi equazione (2)). Il metodo della derivata fornisce per il fattore di forma il valore $ff = aa/cc \sim 1.05$, risultato identico a quello ottenuto col modello ellissoidale, il che dimostra l'equivalenza dei due metodi. Il metodo della derivata, però, comporta la necessità di eliminare alcuni punti a causa della deformazione che la funzione di filtraggio determina su alcune parti della curva. La FDA ricavata dalle misure con il fotorivelatore angolare nell'intervallo tra -90° e $+90^\circ$, fornisce il fattore di forma $ff = aa/cc = 0.95$, corrispondente ad un ellissoide lievemente prolato. Considerando il carattere di isotropia azimutale del campione Labsphere[®], la misura angolare della FDA su un solo piano azimutale è sufficiente a caratterizzare completamente il campione. La funzione di distribuzione angolare (FDA) ricavata per il campione SRS-99-020 con i tre metodi illustrati è riportata in figura 21. In conclusione, il metodo BASALT, applicato a campioni quasi-lambertiani, si è dimostrato molto soddisfacente, essendo che la FDA trovata con tale metodo corrisponde abbastanza bene a quella ottenuta col metodo del fotorivelatore angolare.

Applichiamo ora il metodo BASALT proposto ad un altro tipo di campioni diffusivi. Esaminiamo la figura di diffusione in riflessione del campione HW1, formato da silicio testurizzato secondo uno schema a buche. Diversamente da quanto mostrato in figura 6, dove le buche sono perfettamente semisferiche, qui le buche presentano una forma a tazza, con un fondo piatto, inoltre non ricoprono pienamente la superficie (vedi figura 22). La figura di diffrazione (FDD) (vedi figura 6b) di questo campione mostra una forte componente speculare formata da spot luminosi distribuiti su una struttura esagonale. La componente speculare può essere esclusa considerando solo le misure per $|\theta| \geq 6^\circ$ (ovvero nel caso in cui il raggio speculare centrale dista da quelli laterali più vicini di 6°). Con il fotorivelatore angolare si ottiene, sul campione HW1 di piccole dimensioni, una FDA di forma ellittica avente un fattore di forma medio $ff = aa/cc = 0.045$ (vedi figura 23). L'analisi dei dati con i metodi proposti nella presente invenzione ha richiesto dapprima la correzione dei dati sperimentali di flusso tramite la funzione di correzione $sign2(x)/sign2(0)$, come discusso precedentemente per i campioni Labsphere[®]. Anche in questo caso sono stati esaminati due parti dello stesso campione HW1, strutturalmente identiche ma di diverse dimensioni, e per ciascuna di esse è stata calcolata la corrispondente funzione $sign2(x)/sign2(0)$ (vedi figura 24). Le curve di flusso sperimentale dei due campioni HW1, dopo l'applicazione della funzione di correzione, sono riportate in figura 25. Le due curve non sono perfettamente coincidenti. Bisogna tener conto che la misura sul campione piccolo è stata fatta traslando la sfera, mentre quella sul

campione grande è stata fatta traslando il campione. In quest'ultimo caso la regione illuminata può cambiare, e ciò può dar luogo a una lieve differenza tra le due curve di flusso se esiste una disomogeneità ottica del campione. Un altro motivo per spiegare la differenza tra le due curve, può essere il diverso allineamento dei due campioni rispetto all'asse ottico, condizione che diventa più critica a grandi distanze campione-sfera.

Le curve sperimentali di figura 25 sono confrontate con quelle calcolate per alcuni ellissoidi prolatti applicando le equazioni (4)-(5b). Se si considera la situazione media lungo tutto il tratto esaminato, si trova che le due curve sperimentali di HW1 si adattano ad un fattore di forma compreso tra ≈ 0.01 e ≈ 0.1 , in accordo con quanto trovato con le misure angolari. Il calcolo fatto a partire dagli integrali delle curve sperimentali e di quelle modello, fornisce i seguenti valori del fattore di forma per il campione HW1: $ff = 0.046$ per il campione piccolo e $ff = 0.02$ per quello grande. Il valore di $ff = 0.046$ trovato per il campione piccolo concorda perfettamente con quello $ff = 0.045$ trovato con le misure angolari realizzate sullo stesso campione piccolo, a conferma della validità del metodo BASALT. La FDA in trasmissione misurata con il fotorivelatore angolare su un campione di vetro/TCO (haze 20%) è mostrata in figura 26. Sui dati sperimentali è stata tracciata un'ellisse con fattore di forma $ff = aa/cc \approx 0.83$ che dimostra come la distribuzione media dell'intensità radiante sia simulata bene da un ellissoide di rivoluzione. La curva di flusso intercettato con la sfera BASALT è mostrata invece in figura 27 insieme ad alcune curve calcolate per gli ellissoidi prolatti con ff

=1(sfera), 0.8, 0.6 e 0.4. Come si può notare, la curva sperimentale del campione vetro/TCO è compresa tra le curve con $ff = 1$ e 0.6, pur non essendo perfettamente sovrapposta ad una di esse. L'andamento della curva è tale che, al crescere di x , la FDA passa da un andamento sferico ad uno di tipo ellissoidale prolato. Questo andamento è percettibile anche osservando l'andamento dei punti sperimentali di figura 26. La misura accurata di ff , fatta a partire dagli integrali delle curve teoriche della figura 27, porta al valore $ff = 0.86$, in buon accordo con il risultato del fotorivelatore.

Mostriamo ora in maniera inequivocabile i vantaggi che il metodo BASALT presenta su quello del fotorivelatore angolare quando si tratti di campioni testurizzati fortemente anisotropi. Prendiamo in considerazione la classe di campioni al silicio policristallino con testurizzazione randomica piramidale. Questa testurizzazione produce figure di diffrazione (FDD) simili a quella illustrata in figura 7b, con la differenza che i riflessi che nella figura 7b sono centrati sull'asse ottico, nel caso del silicio policristallino essi sono deviati a seconda dell'orientazione particolare che ha il grano specifico su cui viene fatta la misura.

Le misure BASALT sul campione PSEUR1 hanno dato la curva di flusso mostrata in figura 28, insieme ad alcune curve di ellissoidi prolati. La curva sperimentale mostra a grandi distanze (piccoli valori di θ) un fattore di forma $ff \approx 0.4$, che gradualmente diminuisce all'aumentare di θ fino ad assumere il valore $ff \approx 0.01$. La curva di flusso mostra quindi che la forma della FDA è del tipo a deltoide

capovolto, ovvero stretta alla base (alti valori di θ , bassi valori di ff) e larga alla cima (piccoli valori di θ , alti valori di ff).

Le misure al fotorivelatore angolare sono state eseguite tra -90° e $+90^\circ$ (angolo zenitale) per quattro diversi valori dell'angolo azimutale, 0° , -90° , -135° e -225° . In figura 29 sono riportati i quattro profili d'intensità, molto diversi uno dall'altro, come atteso per un campione molto anisotropo, e coincidenti soltanto in prossimità di 0° . In figura 30 gli stessi profili sono mostrati in una rappresentazione polare come funzione di distribuzione angolare (FDA). Come si può notare, le quattro curve di FDA sono molto diverse, e inoltre, anche se si tenta di accordarle tra loro, esse risultano insufficienti per ricostruire il profilo reale della FDA del campione, pur avendo effettuato circa 300 misure per ottenere questi risultati. Al contrario, le misure BASALT sullo stesso campione, mostrate con la curva di flusso di figura 28, sono state circa 70 e sintetizzano molto bene il comportamento medio della FDA del campione. La previsione data dalle misure BASALT sulla forma media della FDA, di forma a deltoide capovolto, è confermata da tutti e quattro i profili FDA ottenuti con le misure angolari (figura 30). In aggiunta, il calcolo della derivata del flusso BASALT, secondo l'equazione (2) fornisce esattamente il valore medio dell'intensità radiante in corrispondenza a qualsiasi angolo di diffusione θ . Da quanto esposto si dimostra che il metodo BASALT costituisce un modo molto elegante per estrarre le informazioni sulla FDA del campione, quando si tratti di campioni fortemente anisotropi, e inoltre impiegando un numero di misure molto limitato.

Si è anche verificata l'influenza del campione sulla misura. Ogni campione produce un disturbo diverso a seconda delle sue proprietà ottiche. Si è scelto come rappresentativo un campione diffusivo bianco lambertiano, tipo il SRS-99-010 o il SRS-99-020 che si sono impiegati nel brevetto. Si è calcolato il disturbo sulla misura quando il campione è posto direttamente sulla finestra della sfera e quindi a distanza zero. Si è verificato che il disturbo del campione sulla misura è dell'ordine del 5% per un rapporto dimensionale tra campione e finestra della sfera (d_1/d_2) pari a circa 0.2 (vedi figura 31). Il disturbo naturalmente diminuisce al diminuire delle dimensioni relative del campione. Altri campioni, più assorbenti, produrrebbero un disturbo inferiore e quindi quello riportato rappresenterebbe un limite superiore.

La configurazione dello scatterometro secondo l'invenzione è stata sinora discussa per il caso più semplice, anche se il più comune, nel quale il fascio incidente sia diretto ortogonalmente alla superficie del campione e l'asse lungo il quale si effettua l'analisi con la sfera sia diretto lungo la stessa direzione.

In effetti, la coincidenza tra le due direzioni, di illuminazione e di osservazione, presenta il vantaggio notevole che il movimento della sfera può essere effettuato senza interferire con il fascio incidente, purché si provveda a praticare il piccolo foro o sul retro della sfera (vedi figura 13 e 15). Volendo configurare lo scatterometro per altre condizioni di illuminazione e di osservazione, bisognerà prevedere che sia possibile illuminare il campione ad un angolo generico δ , rispetto alla direzione normale, e che la sfera integratrice si muova su un asse ζ

orientato ad un angolo generico ψ , anch'esso rispetto alla direzione normale al campione, come mostrato in figura 32.

Per evitare che la sfera, nel suo movimento lungo l'asse ζ disturbi il fascio incidente, si può praticare sul piano della figura 32 una fenditura sufficiente a non intercettare il fascio, ottenuta per intersezione della sfera con la direzione della sorgente l . La stessa fenditura, se estesa dalla parte opposta del fascio, risulterebbe utile ad estrarre dalla sfera la componente speculare.

Per ultimo sottolineiamo il fatto che la tecnica BASALT della presente invenzione può essere efficacemente utilizzata per un altro tipo di applicazioni, non meno utile di quello fotovoltaico, e cioè per la caratterizzazione ottica di sorgenti puntiformi, o comunque di limitata estensione spaziale rispetto alla sfera, che emettano luce diffusa.

La figura 33 mostra uno schema dell'apparato BASALT per la caratterizzazione di una piccola sorgente, del tipo LED. Quando la lampada la si trova esternamente alla sfera ($x > 0$, $\theta < 90^\circ$, $\Omega < 2\pi$ steradiani), si può caratterizzare l'irraggiamento frontale della sorgente; quando invece la lampada (la) si trova all'interno della sfera ($x < 0$, $\theta > 90^\circ$, $\Omega > 2\pi$ steradiani), si può caratterizzare anche l'irraggiamento posteriore. In tal modo la FDA della lampada può essere caratterizzata entro l'angolo lineare da 0° a $\theta = \pi - \tan^{-1}(D/2|x_{lim}|)$ dove x_{lim} è il valore limite di x quando la lampada si trova all'interno della sfera.

Come discusso per il caso dei campioni testurizzati, si può presentare la necessità di caratterizzare sorgenti luminose che non siano isotrope rispetto all'asse ottico. In questo caso, la tecnica

BASALT proposta diventa non solo un'alternativa possibile al metodo del fotorivelatore angolare, ma soprattutto una tecnica preferibile per la sua semplicità di esecuzione e per il limitato numero di misure richieste per completarla.

Inoltre, con un opportuno sistema di trascinamento del campione o della sfera, è possibile velocizzare e automatizzare le misure, sincronizzando il movimento con l'acquisizione dei segnali tramite un programma generale di acquisizione.

Quanto mostrato nella precedente descrizione ha messo in evidenza il fatto che il metodo BASALT è in grado di fornire le stesse informazioni del fotorivelatore angolare in termini di intensità radiante in funzione dell'angolo di diffusione, ovvero la funzione di distribuzione angolare (FDA), quando si tratti di campioni otticamente isotropi o quasi-isotropi rispetto all'angolo azimutale. In questo caso il metodo BASALT può essere considerato equivalente o alternativo al metodo del fotorivelatore angolare, in quanto metodo di misura diretta del flusso luminoso emesso da una superficie illuminata o da una sorgente luminosa. Quando si tratti invece di campioni la cui distribuzione azimutale dell'intensità radiante non sia isotropa, il metodo BASALT si dimostra in grado di fornire direttamente il valor medio di tale distribuzione, per ogni angolo di diffusione, laddove il fotorivelatore angolare richiederebbe un numero elevato di misure sia sull'angolo zenitale che su quello azimutale, tanto più numerose quanto più asimmetrica si dimostri tale distribuzione. In tutti i casi nei quali la conoscenza della distribuzione azimutale dell'intensità radiante non sia

necessaria, o a maggior ragione nei casi nei quali sia richiesto il valor medio di tale intensità, come nella caratterizzazione delle proprietà ottiche di campioni fotovoltaici testurizzati, il metodo BASALT diventa particolarmente vantaggioso rispetto al fotorivelatore angolare, in quanto consente un risparmio notevole di misure sperimentali. Da un punto di vista operativo, il metodo BASALT è più semplice di quello angolare perché richiede una semplice traslazione della sfera integrante rispetto al campione, e non già i più complessi sistemi goniometrici per l'orientazione del fotorivelatore rispetto alla sorgente di luce diffusa. È stato inoltre dimostrato che la tecnica BASALT fornisce risultati attendibili di FDA sia su piccoli che su grandi campioni, rispetto alle dimensioni della finestra di raccolta della luce, purché sia mantenuta la condizione che i campioni di grandi dimensioni siano otticamente omogenei.

Il metodo BASALT della presente invenzione è stato estensivamente applicato alla caratterizzazione ottica di campioni fotovoltaici testurizzati, sia nel modo in trasmissione che in riflessione. Per questo tipo di campioni, il metodo BASALT si è dimostrato particolarmente adatto e preferibile a quello del fotorivelatore angolare. I parametri estratti col metodo BASALT sono, oltre alla distribuzione media dell'intensità radiante della superficie ad un particolare angolo di diffusione compreso tra $\approx 0^\circ$ e 90° , anche il cosiddetto fattore di forma, che descrive in maniera estremamente sintetica la forma della funzione FDA, vista come solido di rivoluzione.

Per completare il quadro delle applicazioni del metodo

BASALT, è utile accennare alla determinazione della funzione FDA di sorgenti luminose, di piccole dimensioni rispetto alla sfera integratrice, a partire dalla misura del flusso irradiato dalla sorgente e raccolto dalla sfera in funzione della distanza sorgente-sfera. Pur non essendo stato trattato estesamente nella presente descrizione, questa applicazione può risultare altrettanto utile di quella della caratterizzazione ottica di superfici diffuse, e fa quindi parte integrante della presente invenzione. Le considerazioni svolte commentando le misure sui campioni diffusivi possono, in tal caso, essere estese al caso di sorgenti luminose diffuse, senza modificare la validità di tutti i concetti sviluppati.

Riferendosi in particolare al settore fotovoltaico, il metodo proposto si applica sia a misure in trasmissione adatte per celle con struttura a superstrato, che a misure in riflessione adatte per celle con struttura a substrato. Per entrambi i tipi di celle, il metodo proposto fornisce una funzione di distribuzione angolare (FDA), correlata all'effettiva distribuzione della radiazione trasmessa al dispositivo e all'efficienza di raccolta della luce.

Infine, l'apparato secondo l'invenzione può essere utilizzato anche come sensore di distanza e/o colore e/o dimensioni e/o velocità di un campione di materiale, nella configurazione della figura 15.

La testa di misura secondo la figura 16 diventa così essenziale affinché si possa utilizzare lo scatterometro come sensore, mentre la testa di misura primaria può essere evitata.

L'apparato BASALT, nella configurazione per la misura della

luce diffusa da campioni di grandi dimensioni, misura, per mezzo della testa di misura supplementare $tm2$, l'effetto di "capping" prodotto dal campione c posto in prossimità della finestra f della sfera si .

E' stato verificato sperimentalmente che l'effetto "capping" è funzione della distanza del campione, delle sue dimensioni e delle sue proprietà ottiche. Se quindi si isolano, dall'apparato BASALT della figura 15, le parti: sfera integratrice si , testa di misura $tm2$, generatore di segnali gs e radiometro $ra3$, è possibile individuare un dispositivo con caratteristiche di sensore ottico (di prossimità, di colore, di dimensione, di velocità degli oggetti che passano davanti alla sfera, anche trasversalmente, poiché la luce emessa dalla sfera è diffusa).

Il sensore ottico è disegnato nella figura 34 e comprende le parti principali già individuate.

La sorgente led , contenuta in una sezione della testa di misura tm , emette un segnale luminoso quasi-collimato che incide sulla parete interna p della sfera integratrice si . Il segnale luminoso è prodotto alimentando, tramite il generatore di segnali gs , una sorgente del tipo LED, con un segnale elettrico modulato alla frequenza f . Il segnale luminoso emesso dalla sorgente led è quindi modulato alla stessa frequenza f . L'intensità d'illuminazione della sfera si è misurata tramite un fotorivelatore fr , posto in una sezione separata della testa di misura tm , dal radiometro ra , collegato al generatore gs attraverso il segnale di sincronismo $sync$.

La sfera integratrice si è dotata di una finestra f , la quale costituisce la parte otticamente sensibile del sensore, ovvero la finestra

di test, secondo le modalità descritte nel seguito.

L'intensità d'illuminazione della sfera s_i , misurata da fr è una funzione complessa delle perdite ottiche della sfera. Le perdite ottiche riguardano tutte le parti poste all'interno della sfera e che determinano l'assorbimento, parziale o totale, della radiazione incidente al suo interno. Esse sono: la testa di misura tm stessa, con una specifica assorbanza, la parete interna della sfera p , la quale ha proprietà riflesse note in quanto misurabili, tipicamente dell'ordine del 99%, la finestra di test f aperta, la quale, in condizioni di oscurità dell'ambiente, assorbe completamente la radiazione l_{out} emessa dalla sfera e quindi presenta una riflettanza nulla.

L'azione del sensore ottico so della figura 34 si esplica nel momento in cui un oggetto c è posto nelle vicinanze della finestra di test f . In conseguenza di ciò, una parte della radiazione uscente dalla sfera, l_{in} , è riflessa dal campione e introdotta nuovamente al suo interno, il che equivale ad una riflettanza della finestra di test non nulla. La radiazione netta uscente dalla sfera diminuisce e si produce un incremento dell'intensità d'illuminazione media della sfera, misurata dal fotorivelatore fr . La presenza del campione c , perciò, determina un'alterazione delle perdite ottiche della sfera, ed è proprio il monitoraggio tramite fr di queste perdite ottiche che le caratteristiche di posizione, di dimensione, cinetiche ed ottiche dell'oggetto posto di fronte ad f possono essere determinate.

Per uno stesso campione c , il segnale di fr aumenta all'avvicinarsi di c alla finestra f , perché in tal modo si realizza in

maniera più efficace l'effetto di "capping". In maniera equivalente, a parità di distanza dell'oggetto, il segnale di fr aumenta all'aumentare delle dimensioni di c trasversali all'asse ottico z . In entrambi i casi, avvicinamento del campione o sua espansione spaziale bidimensionale, l'effetto è un aumento dell'angolo solido entro il quale il campione è visto dalla finestra, e ciò determina l'innalzamento del segnale $sign$ di fr .

Oltre ai parametri distanza e dimensioni del campione, il sensore so è sensibile alle sue proprietà ottiche, ovvero alla natura della sua superficie. Un campione altamente riflettente produce naturalmente, a parità di altre condizioni, un segnale di fr maggiore di un campione meno riflettente. La condizione di maggiore o minore riflettività va naturalmente collegata alla lunghezza d'onda λ della sorgente led se questa è monocromatica, oppure all'intensità spettrale $I(\lambda)$ della stessa se essa è una sorgente luminosa a banda larga.

Le misure sperimentali effettuate forniscono una serie di risultati che sono sufficienti per confermare l'efficacia del dispositivo in questione come sensore ottico di un oggetto planare.

La figura 18 riassume il comportamento del sensore so rispetto alla posizione e dimensioni di un campione bianco lambertiano in luce monocromatica ($\lambda = 633$ nm). La curva nera del campione SRS-99-010, con diametro da 1", mostra che il segnale $sign(x)$ cresce, al diminuire della distanza, secondo un andamento di tipo esponenziale, fino a portarsi ad un livello del $\approx 12\%$ superiore a quello misurato in assenza del campione (campione all'infinito). L'incremento del segnale è significativo e avviene per un campione con diametro metà circa del

diametro della finestra f . Un campione con diametro 2", come il SRS-99-020, produce un effetto "capping" molto intenso, come si vede dalla curva rossa della figura 18, essendo il segnale $sign(0)$ superiore del 32% rispetto a $sign(\infty)$. Anche in questo caso il segnale $sign(x)$ manifesta un andamento di tipo esponenziale.

Da questi risultati possiamo aspettarci che, operando con il sensore so di fronte ad un oggetto con superficie otticamente diffusiva con riflettanza R , il segnale $sign(0)$ sia dell'ordine di $\approx R*10\%$ per un campione di 1" di diametro e dell'ordine di $\approx R*30\%$ per un campione di 2" di diametro. Quindi ci aspettiamo che, anche operando con campioni diffusivi poco riflettenti, il segnale $sign(x)$ sia sensibile alla presenza del campione.

In entrambi gli esempi riportati, il sensore ottico so è sensibile alla presenza del campione entro un intervallo spaziale intorno ai ≈ 6 cm.

Anche in figura 24 sono riportati due esempi di misure del fattore di forma ff effettuate con due campioni, HW, dalle stesse proprietà ottiche ma di diverse dimensioni. Anche qui si trova un andamento esponenziale con la distanza di $sign(x)$. Si trova che il campione con area $S \approx 1 \text{ cm}^2$ produce un effetto di "capping" inferiore a quello del campione di $S \approx 10 \text{ cm}^2$. La minore riflettività del campione HW rispetto a quello SRS-99-XX fa sì che l'effetto di "capping" per $x=0$, $sign(0)$ sia solo del $\approx 3\%$ per il campione piccolo e del $\approx 6\%$ per il campione grande. Ma il risultato interessante che si trova operando con i campioni HW è che il segnale $sign(x)$ è di tipo "long range", in quanto

la sensibilità di misura si estende fino a ≈ 10 cm per il campione piccolo e $\approx 20-30$ cm per il campione grande. Questo risultato è strettamente legato alle proprietà riflesse del campione HW che riflette la luce secondo una distribuzione estremamente direzionale, del tipo ellissoide prolato con $ff \approx 0.01$ (vedi figura 25).

Questo risultato permette un uso del sensore *so* nel quale la sfera integratrice e gli accessori connessi (*tm*, *gs* e *ra*) siano associati stabilmente ad un campione di test *ct* di tipo HW, distinto dall'oggetto da esaminare. Per meglio chiarire questo punto, si può dire che, limitatamente all'uso del sensore come dispositivo sensibile alla distanza di un oggetto, si può pensare all'uso di un campione specifico, tipo HW, accoppiato all'oggetto da esaminare di cui si vuole determinare la distanza. Questo concetto è illustrato in figura 35.

Sfruttando le proprietà estremamente direzionali di HW, si può pensare di operare a una distanza alla quale l'oggetto *c* sia indifferente alla sfera, mentre il campione di test *ct* sia in interazione con essa.

Un altro aspetto da considerare è l'uso del dispositivo *so* come sensore di colore. Va premesso a tal fine che l'interazione tra sfera *si* e campione *c* avviene per le lunghezze d'onda alle quali il campione manifesta una certa riflettività. Un campione completamente nero, ad esempio, di qualunque dimensione, non avrebbe nessuna influenza sulla misura dovunque sia posto rispetto alla sfera. Un campione bianco diffusivo, tipo il SRS-99-XX, con riflettanza spettrale piatta nel Vis-NIR, al contrario, può entrare in interazione col sensore a qualsiasi lunghezza d'onda del Vis-NIR, ovvero il sensore può operare a

qualsiasi lunghezza d'onda con un campione di questo tipo. Nel caso più generale, il campione c mostrerà una curva di riflettanza spettrale differente alle diverse lunghezze d'onda. La sua interazione con la sfera, e quindi il segnale $sign(x)$, sarà diverso alle diverse lunghezze d'onda. La conseguenza di ciò è che il sensore, operando selettivamente su diverse lunghezze d'onda è in grado di distinguere i diversi colori dello spettro e quindi individuare le caratteristiche di colore di un particolare oggetto.

Per trasformare il dispositivo di figura 34 in un sensore di colore, è necessario modificare la testa di misura tm . Una possibilità è di usare un certo numero di sorgenti monocromatiche, o a banda limitata a un particolare intervallo di frequenza, nella sezione led , ad esempio tre sorgenti LED di tipo RGB (Red, Green, Blue). Le tre sorgenti saranno associate a tre diversi fotorivelatori nella sezione fr sensibili rispettivamente alla radiazione di colore rosso, verde e blu. Uno schema di questo tipo per la testa di misura è illustrato in figura 36.

I tre fotorivelatori fr potranno essere tre fotodiodi al silicio identici, filtrati con tre diversi filtri ft in modo da essere sensibili soltanto alla luce del corrispondente LED della sezione sorgenti. Un sensore so di questo tipo può lavorare in due modi:

- i) con luce modulata da gs a frequenza f , identica per i tre LED. In tal modo si usa un solo radiometro sincronizzato alla stessa frequenza, provvisto di tre canali R, G e B, per l'ingresso dei tre fotodiodi, o di un solo canale collegato a un "multiplexer"; e
- ii) con luce stazionaria, alimentando in c.c. i tre LED: si usa un solo

radiometro, o voltmetro, provvisto di tre canali R, G e B, per l'ingresso dei tre fotodiodi, o di un solo canale collegato a un "multiplexer".

Esistono diverse alternative allo schema di figura 36, che semplificano il numero di componenti usati. Si può usare una sola sorgente bianca e tre fotodiodi. In tal modo la sorgente coprirà lo spettro del visibile, e ciascuno dei tre fotodiodi selezionerà, attraverso il corrispondente filtro, la radiazione di un particolare colore.

Si possono usare i tre LED ed un solo fotodiodo senza necessità di filtri. In tal modo i tre LED saranno alimentati in sequenza e l'unico fotodiodo misurerà l'intensità della luce corrispondente al LED acceso.

Un sensore come quelli descritti dovrà essere calibrato opportunamente per ottenere informazioni quantitative sulle caratteristiche di colore del campione in esame.

In quel che precede sono state descritte le preferite forme di realizzazione e sono state suggerite delle varianti della presente invenzione, ma è da intendersi che gli esperti del ramo potranno apportare modificazioni e cambiamenti senza con ciò uscire dal relativo ambito di protezione, come definito dalle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Scatterometro a sfera integratrice per la caratterizzazione superficiale di campioni (c) di materiale o la caratterizzazione di diffusione di sorgenti luminose (la) di tipo puntiforme, comprendente:

- nel caso della caratterizzazione superficiale di campioni (c) di materiale, una sorgente di luce (l) che produce un fascio di luce collimato (ll) modulato ad una frequenza f_1 che incide sul campione (c) sotto analisi ad un angolo δ rispetto alla direzione normale z,
- una testa di misura (tm1) comprendente un fotorivelatore (fr2) per la rivelazione di una parte (lr) di luce (ld) diffusa indietro dal campione (c) in risposta a detto fascio di luce collimato (ll), in trasmissione o in riflessione, oppure diffusa dalla sorgente luminosa (la) di tipo puntiforme,

caratterizzato dal fatto che detta parte (lr) di luce è raccolta da una sfera integratrice (si) presentante una finestra (f), posta su un asse ζ orientato ad un angolo ψ rispetto a detta direzione normale z e a distanza x dal campione (c) o dalla sorgente luminosa (la) di tipo puntiforme, la distanza x potendo assumere anche valori negativi per i quali il campione (c) o la sorgente (la) di tipo puntiforme risulta all'interno della sfera integratrice (si), detta parte (lr) di luce essendo raccolta entro un angolo solido Ω attorno a detto asse ζ , ovvero entro un semiangolo lineare θ , il fotorilevatore (fr2) misurando la luce integrata dalla sfera a partire dalla luce (lr) raccolta dalla sfera, l'angolo solido Ω essendo funzione della distanza x.

2. Scatterometro secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che, per evitare che la sfera integratrice (s_i), al variare della distanza x lungo l'asse ζ disturbi il fascio incidente (l_i), la sfera integratrice (s_i) presenta una fenditura atta a far passare il fascio luminoso, nel caso di detta caratterizzazione superficiale, durante il movimento, la fenditura essendo ottenuta per intersezione della sfera con la direzione del fascio di luce collimato (l_i).

3. Scatterometro secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che z coincide con ζ , il fascio di luce collimato (l_i), nel caso di detta caratterizzazione superficiale, incidendo perpendicolarmente al campione (c).

4. Scatterometro secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto di comprendere un foro (o), praticato sulla parte della sfera integratrice (s_i) opposta alla finestra (f), tale che, quando la luce è emessa in riflessione dal campione (c), la luce collimata (l_i) proveniente da detta sorgente di luce (l) attraversa indisturbata la sfera integratrice (s_i) passando dapprima attraverso il foro (o), dimensionato in modo da non disturbare il funzionamento della sfera integratrice (s_i), ed arriva al campione (c) posto sull'asse ottico z .

5. Scatterometro secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 4, caratterizzato dal fatto che, quando la luce è emessa in trasmissione dal campione (c), il campione (c) è posto tra la sorgente di luce (l) e la sfera integratrice (s_i).

6. Scatterometro secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 5, caratterizzato dal fatto che detta finestra (f) è circolare e ha

diametro D .

7. Scatterometro secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 6, caratterizzato dal fatto che il fotorivelatore ($fr2$) è un fotodiode, in particolare quando la sorgente di luce (l), nel caso di detta caratterizzazione superficiale, è un laser.

8. Scatterometro secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 7, caratterizzato dal fatto che il fotorivelatore è collegato ad almeno un radiometro ($ra1$, $ra2$).

9. Scatterometro secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 8, caratterizzato dal fatto di comprendere un meccanismo di traslazione automatica del campione (c) o di detta sorgente luminosa (la) di tipo puntiforme o della sfera integratrice (si) per variarne la distanza reciproca x in modo da raccogliere la luce emessa dal campione (c) in modo continuo, con differenti valori dell'angolo solido Ω , sincronizzando il movimento con l'acquisizione dei segnali tramite un opportuno dispositivo di elaborazione dati.

10. Scatterometro secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 9, caratterizzato dal fatto che, nel caso di detta caratterizzazione superficiale, le dimensioni della finestra (f) sono grandi rispetto alle dimensioni trasversali del campione (c), in modo che, quando il campione (c) è molto ravvicinato alla sfera integratrice (si), al limite quando per $x = 0$ la sua superficie si sovrappone a quella della finestra (f), la sua presenza non alteri apprezzabilmente le perdite ottiche della sfera integratrice (si).

11. Scatterometro secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da

1 a 10, caratterizzato dal fatto di comprendere un'ulteriore testa di misura (*tm2*) comprendente una sorgente di luce supplementare (*led*) e un fotorivelatore supplementare (*fr3*), il fotorivelatore supplementare (*fr3*) essendo atto ad effettuare, per ogni valore scelto della distanza x tra campione e sfera, una misura della luce supplementare (*led*) integrata dalla sfera integratrice (*si*), la luce supplementare (*led*) essendo operante alla stessa lunghezza d'onda λ della sorgente di luce (*l*) o della sorgente luminosa (*la*) di tipo puntiforme ed illuminando la parete interna della sfera integratrice (*si*) dall'interno della sfera stessa per mezzo di una radiazione di test (*lt*) il cui flusso integrato viene misurato dal fotorivelatore supplementare (*fr3*), il segnale luminoso emesso dalla luce supplementare (*led*) essendo modulato ad una frequenza f_2 diversa da f_1 attraverso un alimentatore o generatore di segnali (*gs*).

12. Scatterometro secondo la rivendicazione 11, caratterizzato dal fatto che l'ulteriore testa di misura (*tm2*) è divisa in due sezioni, la prima sezione contenendo la sorgente di luce supplementare (*led*), un filtro neutro o interferenziale (*ft*) e una lente convergente (*le*), la luce della sorgente di luce supplementare (*led*) essendo focalizzata dalla lente (*le*) sulla parete interna della sfera integratrice (*si*), la luce di test (*lt*), integrata dalla sfera integratrice (*si*), pervenendo alla seconda sezione della ulteriore testa di misura (*tm2*), dove essa viene diffusa da un diffusore (*d*), filtrata dal filtro neutro o interferenziale (*ft*) e convertita in segnale elettrico dal fotorivelatore (*fr3*).

13. Scatterometro secondo la rivendicazione 11 o 12,

caratterizzato dal fatto che detta ulteriore sorgente di luce (*led*) è una sorgente di luce LED.

14. Metodo di misura della funzione di distribuzione angolare di una luce diffusa, utilizzando lo scatterometro a sfera integratrice secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 13, caratterizzato dal fatto che luce diffusa è raccolta entro un intervallo di θ compreso tra circa 0° per $x \gg D$ e 90° esatti per $x = 0$, ottenendo così il flusso radiante raccolto o intercettato dalla sfera, espresso in funzione della distanza x , dal quale si ricava il profilo dell'intensità della luce diffusa, ovvero la funzione di distribuzione angolare della luce diffusa o FDA.

15. Metodo di misura secondo 14, caratterizzato dal fatto che la FDA, mediata rispetto all'angolo ϕ , è ricavata a partire dal flusso integrale $\Phi_{in}(\theta)$ della luce raccolta dalla sfera entro l'angolo solido $\Omega(\theta)$ e dall'intensità $I(\theta, \phi)$ della luce diffusa verso la direzione di osservazione (θ, ϕ) , $\Phi_{in}(\theta)$ esprimendosi come:

$$\Phi_{in}(\theta) = \int_{\phi=0}^{2\pi} d\phi \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha, \phi)$$

e l'intensità media della luce diffusa ad angolo θ , $\bar{I}(\theta)$, ottenendosi differenziando $\Phi_{in}(\theta)$:

$$\bar{I}(\theta) = \frac{1}{2\pi \sin \theta} \cdot \frac{d}{d\theta} \Phi_{in}(\theta)$$

16. Metodo di misura secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che il rumore che accompagna l'intensità $\bar{I}(\theta)$ è diminuito adottando una modalità di interpolazione dei dati o di

filtraggio della funzione $i_n(\theta)$, prima di procedere al calcolo del differenziale.

17. Metodo di misura secondo la rivendicazione 14, caratterizzato dal fatto di interpolare la FDA sperimentale del campione (c) con un ellissoide di rivoluzione teorico con un semiasse trasversale (aa) ed un semiasse longitudinale (cc) orientati rispetto all'asse ottico z, e determinando così il fattore di forma $ff = aa/cc$ proprio dell'ellissoide.

18. Metodo di misura secondo la rivendicazione 17, caratterizzato dal fatto che, per ottenere un valore più accurato di ff , mediato sull'intero intervallo delle distanze esaminato, si calcola l'integrale degli ellissoidi di rivoluzione teorici in funzione di ff , tracciando con questi valori una curva di calibrazione e interpolando su questa curva l'integrale della curva sperimentale FDA ed ottenendo così il corrispondente fattore di forma ff relativo alla luce diffusa.

19. Sensore di posizione, dimensione, colore e velocità di oggetti (c), comprendente una sfera integratrice (si) presentante una finestra (f), caratterizzato dal fatto che la sfera integratrice (si) comprende una testa di misura (tm) comprendente almeno una sorgente di luce (led) e almeno un rispettivo fotorivelatore (fr), detta almeno una sorgente di luce (led) emettendo almeno una luce di test (lt), una parte (lout) di detta almeno luce di test (lt) uscendo dalla sfera attraverso la finestra (f), detto almeno un rispettivo fotorivelatore (fr) essendo atto ad effettuare una misura della luce (lin) che rientra attraverso la finestra (f) in seguito alla riflessione da parte dell'oggetto (c) esterno alla sfera ed integrata nuovamente dalla sfera integratrice

(*si*).

20. Sensore secondo la rivendicazione 19, caratterizzato dal fatto che la testa di misura (*tm*) è divisa in due sezioni, la prima sezione contenendo almeno una sorgente di luce (*led*), almeno un rispettivo filtro neutro o interferenziale (*ft*) e almeno una rispettiva lente convergente (*le*), la luce di detta almeno una sorgente di luce (*led*) essendo focalizzata da detta almeno una lente (*le*) sulla parete interna della sfera integratrice (*si*), almeno una luce di test (*lt*), integrata dalla sfera integratrice (*si*), pervenendo alla seconda sezione della testa di misura (*tm*), dove essa viene diffusa da almeno un rispettivo diffusore (*d*), filtrata da almeno un rispettivo filtro neutro o interferenziale (*ft*) e convertita in segnale elettrico da almeno un rispettivo fotorivelatore (*fr*).

21. Sensore secondo la rivendicazione 19 o 20, caratterizzato dal fatto che detta almeno una sorgente di luce (*led*) è una sorgente di luce LED.

22. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 19 a 21, caratterizzato dal fatto che detta prima sezione contiene tre sorgenti di luce (*led*), tre rispettivi filtri neutri o interferenziali (*ft*) e tre lenti convergenti (*le*), corrispondenti ai colori RGB, detta seconda sezione contenendo tre rispettivi diffusori (*d*), tre rispettivi filtri neutri o interferenziali (*ft*) e tre rispettivi fotorivelatori (*fr*).

23. Metodo di misura di posizione, dimensione, colore e velocità di oggetti (*c*), caratterizzato dal fatto di utilizzare la risposta fornita dal sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 19 a 22.

24. Metodo di misura secondo la rivendicazione 23,

caratterizzato dal fatto di utilizzare un campione di test (*ct*) a superficie testurizzata, distinto dall'oggetto da esaminare, ma ad esso accoppiato, operando a una distanza alla quale l'oggetto (*c*) è indifferente alla sfera, mentre il campione di test (*ct*) è in interazione con essa.