

A. RICHIEDENTE(I)  
 1) Denominazione **ENEA, ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE**  
 2) Denominazione

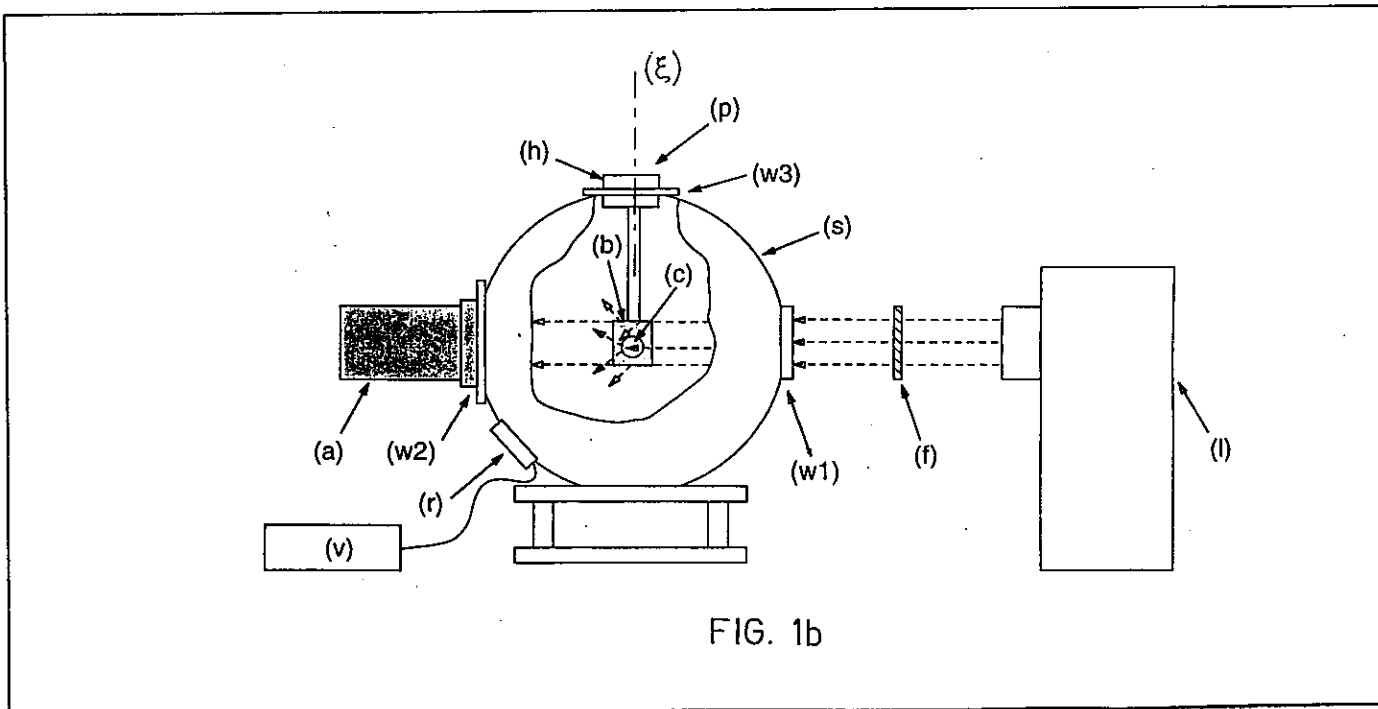
D. TITOLO  
**APPARECCHIO E METODO PER LA MISURA DIFFERENZIALE DELLA RIFLETTANZA DI UNA SUPERFICIE**

Classe proposta (sez./cl./scif) / (gruppo/sottogruppo)

L. RIASSUNTO

Apparecchio per la misura della riflettanza direzionale/emisferica di campioni piani (c) comprendente una sfera integratrice (s) avente una finestra di ingresso (w1) ed una finestra di uscita (w2) diametralmente opposte fra di loro, una sorgente di luce (l) che invia un fascio di luce attraverso un filtro interferenziale (f) alla sfera integratrice attraverso la sua finestra di ingresso (w1), un cilindro assorbitore (a) fissato alla finestra di uscita (w2) della sfera integratrice lungo la direzione del fascio, in modo da raccogliere tutta la luce che dalla lampada passa attraverso la detta sfera senza essere riflessa, una scatola (b) di supporto del campione (c) portata da un alberino (p) passante attraverso la parete della sfera in direzione radiale, girevole intorno al suo asse ( $\xi$ ) e traslabile lungo di esso in modo da portare detta scatola (b) di supporto del campione (c) dentro e fuori di detto fascio di luce, nonché un complesso di rivelazione e misura consistente di un fotodiodo (r) inserito nella parete della sfera integratrice (s) e collegato ad un voltmetro (v) per misurare la luce riflessa all'interno della sfera dal detto campione.

M. DISEGNO



DESCRIZIONE

a corredo di una domanda di Brevetto d'Invenzione  
avente per titolo:

" APPARECCHIO E METODO PER LA MISURA DIFFERENZIALE  
DELLA RIFLETTANZA DI UNA SUPERFICIE "

a nome: ENEA, ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA  
E L'AMBIENTE

Inventori: PARRETTA Antonio, SARNO Angelo, TORTORA  
Pierpasquale

\* \* \* \* \*

La presente invenzione si riferisce in linea  
generale agli apparati ed ai metodi per la misura  
della riflettanza di superfici e concerne in modo  
particolare un apparato ed un metodo per la misura  
della riflettanza direzionale/emisferica di un cam-  
pione piano, che consente di variare con continuità  
l'angolo di incidenza del fascio di luce da 0° a 90°  
e di illuminare il campione in maniera omogenea su  
tutta la sua superficie. Essendo il metodo di misura  
di tipo differenziale, esso può essere denominato MDR  
(Metodo Differenziale per la determinazione della Ri-  
flettanza).

STATO DELLA TECNICA PER IL SETTORE DELL'INVENZIONE

La misura tradizionale della riflettanza dire-  
zionale/emisferica di un campione piano richiede

l'uso di una sfera integratrice per raccogliere tutta la luce riflessa dal campione nel semispazio corrispondente alla faccia illuminata [1]. Il campione potrà essere posizionato al centro della sfera (Fig. 2a) oppure in corrispondenza di una sua finestra (w2) (vedi Fig. 2b). Nel primo caso, la sorgente di luce rimarrà ferma e puntata verso la stessa finestra d'ingresso (w1) ed il campione verrà ruotato attorno all'asse  $\xi$  di un angolo  $\theta$ ; nel secondo caso, invece, il campione verrà mantenuto fisso sulla finestra (w2) e la sorgente verrà posizionata ogni volta su una diversa finestra d'ingresso (wi), in maniera da cambiare l'angolo di incidenza  $\theta$ . In entrambi i casi, il fascio incidente illumina soltanto una porzione del campione. Tale porzione, inoltre, aumenterà, all'aumentare dell'angolo di incidenza del fascio, fino ad un angolo  $\theta_m$ , oltre il quale il fascio di luce uscirebbe dal campione (vedi Fig. 3). L'angolo limite  $\theta_m$  dipende dalle dimensioni lineari, l, del campione e dal diametro, d, del fascio. Si trova facilmente che  $l \cdot \cos(\theta_m) = d$  e che quindi  $\theta_m = \arccos(d/l)$ . Per poter raggiungere valori di angolo limite,  $\theta_m$ , più alti possibile, occorrerà lavorare con un fascio di luce molto collimato, possibilmente con un laser, e con un campione sufficientemente

grande. Lavorando con un fascio di luce laser ( $d \approx 1$  mm) e con un campione avente  $l \approx 20$  mm, sarà possibile raggiungere gli  $85^\circ$  di angolo di incidenza. Queste, però, sono condizioni limite che si presentano raramente in pratica, perché le misure di riflettanza, particolarmente quelle spettrali, vengono generalmente fatte a partire da una sorgente luminosa ad arco o a filamento, la cui luce dovrà essere filtrata e focalizzata sul campione. Nelle condizioni migliori, e senza richiedere ottiche troppo sofisticate, si riuscirà ad illuminare un'area del campione di 3-4 mm lineari circa, ad incidenza normale, il che significa non poter raggiungere gli  $80^\circ$  con un campione di 20 mm di dimensioni lineari. A proposito della misura della riflettanza, la letteratura riporta testualmente [1]: "... un sostegno rimovibile, con un portacampioni, permette di posizionare il campione esattamente al centro della sfera per consentire misure assolute di riflettanza. La riflettanza alla luce solare può essere determinata in funzione dell'angolo di incidenza fino a  $60^\circ$  dalla normale. ... ". Oltre alla limitazione sull'angolo limite di incidenza, i metodi tradizionali presentano un altro svantaggio che si manifesta per un particolare tipo di campioni, come è spiegato nel seguito. Essendo l'area illuminata del

campione variabile con l'angolo di incidenza  $\theta$ , la superficie del campione dovrà essere otticamente omogenea, altrimenti i valori di  $R(\theta)$  ottenuti ad angoli diversi non saranno omogenei, o confrontabili, tra loro, ma rispecchieranno la diversa riflettività media della superficie ad ogni particolare angolo considerato.

Questa limitazione non esiste nel metodo differenziale, MDR, relativo alla presente invenzione. Il campione da misurare, infatti, verrà illuminato completamente dal fascio incidente, o meglio, tutta l'area selezionata del campione verrà illuminata, e la stessa area rimarrà costantemente illuminata ai diversi angoli di incidenza, facendo sì che i valori di riflettanza ottenuti ai vari angoli siano tra loro perfettamente omogenei.

Un ulteriore vantaggio di tipo pratico che presenta il metodo qui proposto è che il fascio di luce incidente non dovrà essere focalizzato in un punto specifico della superficie del campione, ma dovrà essere semplicemente un fascio parallelo di sezione sufficientemente grande da contenere tutta l'area utile del campione, ad incidenza normale, e sufficientemente piccolo da poter attraversare, senza essere intercettato, le due finestre ( $w_1$ ) e ( $w_2$ ) diame-

tralmente opposte. Queste condizioni sono facilmente realizzabili nella pratica, non richiedendo un'ottica particolarmente sofisticata, al massimo due lenti di distanza focale diversa per poter regolare la sezione del fascio parallelo in ingresso alla sfera. La possibilità di lavorare con un fascio di luce parallelo di grande sezione, inoltre, rende particolarmente semplici le misure di riflettanza fatte in funzione della lunghezza d'onda (misure di riflettanza spettrale). Seguendo il metodo tradizionale, e volendo raggiungere elevati valori dell'angolo di incidenza, è indispensabile, come già sottolineato, servirsi di sorgenti altamente collimate, come lo sono le sorgenti laser. In questo caso, però, risulta particolarmente dispendioso disporre di sorgenti laser che permettano di coprire un ampio intervallo di lunghezze d'onda. Con il metodo differenziale qui descritto si può, invece, usare una lampada ad arco o a filamento e, servendosi di filtri interferenziali, selezionare con facilità un fascio di luce quasi monocromatico.

Ulteriori particolarità e vantaggi della presente invenzione appariranno evidenti dal seguito della descrizione con riferimento ai disegni allegati, in cui è rappresentata a titolo illustrativo e non restrittivo la preferita forma di realizzazione.

Nei disegni:

la Figura 1a rappresenta schematicamente l'apparato per la misura della riflettanza con il metodo differenziale ed evidenzia il cammino ottico del fascio di luce con il campione sollevato, in cui il fascio parallelo attraversa la sfera e viene completamente assorbito dall'assorbitore (a);

la Figura 1b rappresenta schematicamente l'apparato per la misura della riflettanza con il metodo differenziale ed evidenzia l'interazione tra il fascio ed il campione, in cui il fascio colpisce sia il campione (c) che la scatola (b) e la luce riflessa da entrambi è raccolta dalla sfera (s) e misurata dal sistema rivelatore (r) + voltmetro (v);

la Figura 2a rappresenta schematicamente l'apparato per la misura della riflettanza col metodo tradizionale, in cui il campione (c) è posto al centro della sfera (s) e viene ruotato attorno all'asse  $\xi$  e la sorgente (l) è mantenuta fissa, orientata verso la finestra (w1);

la Figura 2b rappresenta schematicamente l'apparato per la misura della riflettanza applicando il metodo tradizionale, nel quale il campione (c) è posto sulla finestra (w2) e la sorgente (l) è porta-

ta, di volta in volta, sulle finestre d'ingresso (wi);

la Figura 3 mostra il campione (c) e lo "spot" di luce che illumina una regione ellissoidale di esso quando il fascio incidente è molto inclinato, nella misura tradizionale della riflettanza;

la Figura 4 mostra l'illuminazione del campione nel metodo differenziale, in cui il fascio di luce è parallelo e omogeneo ed incide sul campione ad un angolo  $\theta$ ;

la Figura 5 rappresenta la scatola portacampioni (b), con il campione (c) che si affaccia sulla finestra (d) esponendo l'area  $S_0$  ed è ruotato attorno all'asse  $\xi$ ;

la Figura 6 illustra la sfera (s) con all'interno il campione (c) ruotato dell'angolo  $\theta_L$  : a partire da quest'angolo, una piccola parte della luce riflessa viene assorbita dal cilindro assorbitore (b);

la Figura 7 mostra le curve di riflettanza ottenute al laser sui tre standard di riflettanza S02, S05 e S10;

la Figura 8 mostra le curve di corrente ottenute, in funzione dell'angolo di incidenza, con il me-



todo differenziale della presente invenzione sui tre standard S02, S05 e S10;

la Figura 9 espone un confronto tra le curve di riflettanza del campione S05, ottenute con il laser e col metodo differenziale della presente invenzione;

la Figura 10 mostra le curve di corrente ottenute, in funzione dell'angolo di incidenza, con il metodo differenziale della presente invenzione sui due standard S02 e S10 e su una cella solare di tipo Honeycomb;

la Figura 11 mostra la curva di riflettanza ottenute col metodo differenziale della presente invenzione sulla cella solare di tipo Honeycomb.

#### DESCRIZIONE TECNICA DELL'INVENZIONE

Con riferimento ora alle Figure, si può osservare che un fascio di luce parallelo emesso dalla sorgente (1) viene orientato in modo tale da attraversare, senza colpirle, due finestre (w1) e (w2) di una sfera integratrice (s), diametralmente opposte una rispetto all'altra (Fig. 1a). Il fascio di luce attraversa quindi la sfera senza illuminarla e raggiunge il cilindro assorbitore (a) dove viene completamente assorbito. In queste condizioni, il portacampioni (p), inserito nella sfera (s) attraverso la finestra (w3) e portante alla sua estremità il campione

in misura (c), posto all'interno della scatola (b), viene mantenuto sollevato per non intercettare il fascio di luce incidente. Il portacampioni (p) è formato da un'asta altamente riflettente la luce e da una scatola (b), contenente il campione (c), altamente assorbente la luce.

Nella configurazione di Fig. 1b il portacampioni (p) viene inserito nella sfera (s) in modo tale che il campione (c) si trovi al centro della sfera e che tutta la sua superficie sia illuminata dal fascio di luce quando essa si trovi ortogonale al fascio stesso. In queste condizioni, il portacampioni (p) può essere ruotato con continuità attorno all'asse  $\xi$ , in modo tale che l'angolo di incidenza  $\theta$ , formato dalla normale al campione e dalla direzione del fascio di luce, vari da  $0^\circ$  (fascio ortogonale alla superficie) a  $90^\circ$  (fascio parallelo alla superficie), assicurando che tutta la superficie del campione sia costantemente illuminata durante la sua escursione.

Nella configurazione di Fig. 1b il campione (c) e parte della scatola (b) verranno investiti dal fascio di luce incidente e rifletteranno parte di esso all'interno della sfera. Data la bassa riflettività della scatola, comunque, la maggior parte della luce riflessa all'interno della sfera proverrà dal campio-

ne (c). L'illuminazione della sfera verrà misurata, tramite il fotodiode (r), dal voltmetro (v), che fornirà un valore di tensione proporzionale all'illuminazione stessa, essendo la sfera un dispositivo lineare rispetto alla potenza luminosa in ingresso. Confrontando il valore di illuminazione misurato sul campione di prova, in funzione dell'angolo di incidenza  $\theta$ , con quello misurato su uno o più campioni di riferimento, dei quali sia nota la riflettanza in funzione di  $\theta$ , si ricaverà infine, con le modalità descritte nel seguito, il valore della riflettanza incognita  $R(\theta)$ . Il metodo così descritto fornisce il valore della riflettanza di un campione piano, al variare con continuità dell'angolo di incidenza da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . La regione del campione illuminata ai vari angoli di incidenza rimarrà sempre la stessa, in modo tale che la misura fornirà sempre il valore della riflettanza della stessa regione del campione. Questa misura si dimostra quindi particolarmente utile per quei campioni otticamente disomogenei per i quali sia indispensabile che l'area illuminata ai vari angoli sia sempre la stessa al fine di rendere omogenee tra loro le diverse misure. Il perfezionamento apportato dal presente metodo è quindi quello di consentire la misura della riflettanza  $R(\theta)$  con

continuità da  $0^\circ$  a  $90^\circ$  e di poterla applicare con precisione anche a campioni otticamente disomogenei.

Il principio su cui si basa il metodo di misura della riflettanza qui proposto è illustrato in maniera schematica in Fig. 4. Il campione (c), di area  $S$ , qui raffigurato come una lamina bidimensionale avente una faccia otticamente attiva, "A", è immaginato sospeso nello spazio con possibilità di ruotarlo con continuità attorno all'asse  $\xi$ . Il campione è investito da un fascio parallelo di luce, monocromatica con lunghezza d'onda  $\lambda$  e irradianza  $G_0$ , oppure distribuita sullo spettro "s" con irradianza  $G_s(\lambda)$ . Il fascio di luce parallelo, diretto lungo l'asse "z", è omogeneo su un piano ortogonale ad esso su una regione di spazio maggiore delle dimensioni del campione. Se  $G_0$  è l'irradianza del fascio, misurata nella sua direzione di propagazione, l'irradianza incidente sul campione ad un angolo di incidenza  $\theta$ , sarà:

$$G(\theta) = G_0 * \cos(\theta) \quad (1)$$

e l'intensità luminosa,  $I_I(\theta)$ , incidente su tutto il campione, sarà:

$$I_I(\theta) = G(\theta) * S = G_0 * \cos(\theta) * S \quad (2)$$

Se  $R(\theta)$  è la riflettanza del campione a quel particolare tipo di luce incidente, allora il campione ri-

fletterà nello spazio circostante un'intensità luminosa pari a:

$$I_R(\theta) = R(\theta) * I_I(\theta) = R(\theta) * G_0 * \cos(\beta) * S \quad (3)$$

Nella situazione idealizzata di Fig. 4, misurando  $I_R(\theta)$ , e nota l'irradianza incidente  $G_0$ , dalla (3) si ricaverebbe il valore di  $R(\theta)$ . La situazione è complicata, nella realtà, dalla presenza del portacampioni, necessario a sostenere il campione e a ruotarlo. Essendo il fascio non focalizzato in un punto del campione, ma distribuito su un'area più grande del campione stesso, o meglio della regione del campione esposta alla luce, esso illuminerà anche una parte della scatola (b) entro la quale il campione verrà alloggiato (vedi Fig. 5). Anche la scatola, allora, rifletterà parte della luce, anche se minima, in quanto essa sarà ricoperta esternamente con uno strato nero assorbitore. Non potendo distinguere tra luce riflessa dalla scatola e luce riflessa dal campione, per misurare quest'ultima, occorrerà ricorrere ad un metodo differenziale. Da qui il nome assegnato al metodo: MDR (Metodo Differenziale per la determinazione della Riflettanza), che in lingua inglese figura come DRM (Differential Reflectance Method). Il metodo differenziale consiste allora nel misurare la luce riflessa nella sfera quando nella scatola sia

posto il campione e uno o più riferimenti (standard) a riflettanza nota e nell'effettuare un confronto tra le diverse misure. In tutti i casi descritti, la scatola rifletterà la stessa quantità di luce e quindi, differenziando tra le intensità luminose riflesse, si potrà eliminare il contributo da parte della scatola e risalire alla riflettanza del campione. Nel caso del campione in misura, la (3) diventa:

$$I_R(\theta) = R_C(\theta) * I_{IC}(\theta) + R_B(\theta) * I_{IB}(\theta) \quad (4')$$

dove l'indice "C" sta per "campione" e l'indice "B" sta per "scatola". Misurando invece lo standard, "S", avremo:

$$I'_R(\theta) = R_S(\theta) * I_{IC}(\theta) + R_B(\theta) * I_{IB}(\theta) \quad (4'')$$

Differenziando le (4') e (4'') avremo:

$$\Delta I_R(\theta) = I_R(\theta) - I'_R(\theta) = I_{IC}(\theta) * [R_C(\theta) - R_S(\theta)] \quad (5)$$

Essendo noto  $I_{IC}(\theta) = I_I(\theta) = G_0 * \cos(\theta) * S$ , insieme alla  $R_S(\theta)$ , dalla (5) si può ricavare facilmente la  $R(\theta)$  del campione:

$$R_C(\theta) = R_S(\theta) + [I_R(\theta) - I'_R(\theta)] / I_{IC}(\theta) = R_S(\theta) + \Delta I_R(\theta) / [G_0 * \cos(\theta) * S] \quad (5')$$

Nella pratica, la misura viene effettuata, come descriveremo in seguito, impiegando due, anziché uno, standard di riflettanza e la  $R(\theta)$  incognita è ricavata più accuratamente da una semplice ope-

razione di interpolazione. Descritto nelle sue linee di principio il metodo di misura differenziale MDR, descriviamo ora l'apparato di misura, riferendoci alle Figure 1a e 1b. Esso consiste di una sorgente luminosa (l), di una sfera integratrice (s) e di un sistema di rivelazione della luce (r) + (v). La sorgente (l) sarà tipicamente una lampada a filamento del tipo QTH (Quartz Tungsten Halogen) oppure ad arco del tipo Xe, Hg, o Xe-Hg. Una lampada del tipo Xe è preferita per misure in luce bianca su celle solari, in quanto il suo spettro è molto simile a quello della luce solare esterna. La sorgente (l) emette un fascio parallelo di luce. Esso, nelle misure spettrali, attraverserà un filtro interferenziale (f) che selezionerà una ristretta banda di lunghezze d'onda, tipicamente 50-100 nm. Il fascio viene poi diretto all'interno della sfera integratrice (s) attraverso la finestra (w1). La sfera (s) serve a raccogliere e misurare tutta la luce riflessa dal campione (c) e dalla scatola (b) e quindi a determinare le grandezze  $I_R(\theta)$  e  $I'_R(\theta)$  delle (4') e (4''). Per evitare di misurare anche la luce non riflessa né da (c), né da (b), un assorbitore (a), fissato sulla finestra (w2), è posizionato lungo la direzione del fascio in modo da raccogliere tutta la luce che dalla lampada

passa attraverso la sfera senza essere riflessa. La presenza dell'assorbitore può introdurre un piccolo errore nella misura a valori alti di  $\theta$ , e precisamente ad iniziare dal valore  $\theta_L$ , in corrispondenza del quale la superficie del campione comincia a vedere l'assorbitore (a). Si trova facilmente che (vedi Fig. 6):

$$\theta_L = \pi/2 - \arctan ( R_A / R_S ) \quad (6)$$

dove  $R_A$  è il raggio della base del cilindro assorbitore ed  $R_S$  è il raggio della sfera. A partire dall'angolo  $\theta_L$ , una piccolissima parte della luce riflessa dal campione, quella riflessa ad angoli vicini a  $90^\circ$ , sarà assorbita dall'assorbitore (a) anziché essere riflessa dalla sfera e quindi non produrrà nessun segnale sul fotodiode. Questo piccolo errore di misura può essere minimizzato riducendo quanto più possibile il diametro dell'assorbitore rispetto al diametro della sfera. Esso, comunque, sarà qui trascurato. Il campione (c) è contenuto nella scatola (b) (vedi Fig. 5) e affacciato verso l'esterno, mostrando soltanto una parte selezionata della sua superficie, che, all'occorrenza, potrà essere l'intera superficie. La scatola viene costruita con la parete anteriore molto sottile, in modo da produrre un trascurabile effetto di ombreggiamento sul campione



stesso in corrispondenza ad alti angoli di incidenza. Il portacampioni (p) è ruotato attorno all'asse  $\xi$ , agendo sulla testa (h), quando si debba variare l'angolo di incidenza  $\theta$ . La luce riflessa dal campione (c) e dalla scatola (b) illumina la sfera (s). L'irradianza all'interno della sfera, proporzionale all'intensità di luce riflessa da (c) + (b), è misurata dal fotodiodo (r), collegato al voltmetro (v). Il fotodiodo (r) è caricato su una resistenza di 100-1000 ohm. In alternativa al voltmetro (v), si può usare un "lock-in" collegato anch'esso al fotodiodo (r) e operante, secondo le necessità, in tensione oppure in corrente. Impiegando un "lock-in" come radiometro, occorrerà utilizzare anche un "chopper", che verrà interposto tra il filtro (f) e la sfera (s). Il campione (c) potrà essere il campione a riflettanza incognita oppure uno degli standard di riflettanza. Gli standard di riflettanza sono stati forniti dalla Labsphere (USA), insieme ad una tabella di valori di  $R(\theta, \lambda)$ . Per conoscere la  $R(\theta, \lambda)$ , necessaria in questa circostanza, come si deduce osservando la (5'), occorrerà effettuare sugli standard stessi misure in luce laser, a lunghezze d'onda diverse. Il procedimento di questa misura è quello tradizionale per la misura della riflettanza direzionale/emisferica, cui

si è accennato nel paragrafo sullo stato dell'arte per il settore dell'invenzione e, a tal fine, si può usare uno dei metodi riportati nelle Figure 2a e 2b. La misura di  $R(\theta, \lambda)$  su un numero selezionato di standard, sarà effettuata una volta per tutte.

Descriviamo ora nel dettaglio il procedimento di misura della riflettanza col metodo differenziale MDR proposto. Sia:

$R_s(\theta)$  la riflettanza di un campione standard;

$R_x(\theta)$  la riflettanza del campione in misura;

$R_B(\theta)$  la riflettanza della scatola;

$V(\theta)$  la misura sul voltmetro (v) dell'irraggiamento nella sfera in corrispondenza ad un generico campione;

$G_0$  l'irradianza del fascio nella direzione di propagazione, z.

La misura su uno standard generico sarà:

$$V(\theta) = k * G_0 [R_B(\theta) * S_B(\theta) + R_s(\theta) * S_s(\theta)] \quad (7)$$

dove:

k è una costante che esprime la proporzionalità tra potenza luminosa in ingresso alla sfera e tensione (o corrente) misurata, tramite il rivelatore (r), con il voltmetro (v) (o con il "lock-in");

$S_B(\theta)$  è la sezione della scatola (b), ovvero la proiezione della sua superficie su un piano ortogonale al fascio incidente. Essendo non piana la superficie della scatola, la  $S_B(\theta)$  sarà una funzione complessa di  $\theta$ , ma questo non ha importanza in quanto questa grandezza non dovrà essere misurata. Avendo invece il campione in misura una superficie piana, la grandezza  $S_S(\theta)$  sarà semplicemente:  $S_S(\theta) = S_S(0^\circ) * \cos(\theta)$ , dove  $S_S(0^\circ) = S_0$  è l'area illuminata del campione, ovvero l'area della finestra (d) della scatola (vedi Fig. 5). Effettuiamo ora due misure di irradianza con i due standard, S1 e S2. Avremo:

$$V_{S1}(\theta) = k * G_0 [R_B(\theta) * S_B(\theta) + R_{S1}(\theta) * S_{S1}(\theta)] \quad (7')$$

$$V_{S2}(\theta) = k * G_0 [R_B(\theta) * S_B(\theta) + R_{S2}(\theta) * S_{S2}(\theta)] \quad (7'')$$

Differenziando, avremo:

$$\Delta V_S = V_{S2}(\theta) - V_{S1}(\theta) = k * G_0 [R_{S2}(\theta) * S_{S2}(\theta) - R_{S1}(\theta) * S_{S1}(\theta)] \quad (8)$$

Abbiamo così eliminato le grandezze  $R_B(\theta)$  e  $S_B(\theta)$  che non conoscevamo.

Effettuando ora la misura sul campione incognito avremo:

$$V_X(\theta) = k * G_0 [R_B(\theta) * S_B(\theta) + R_X(\theta) * S_X(\theta)] \quad (7''')$$

$$V_X(\theta) - V_{S1}(\theta) = k * G_0 [R_X(\theta) * S_X(\theta) - R_{S1}(\theta) * S_{S1}(\theta)] \quad (8')$$

Dividendo la (8') con la (8), avremo:

$$\frac{V_x(\theta) - V_{s1}(\theta)}{V_{s2}(\theta) - V_{s1}(\theta)} = \frac{R_x(\theta) \cdot S_x(\theta) - R_{s1}(\theta) \cdot S_{s1}(\theta)}{R_{s2}(\theta) \cdot S_{s2}(\theta) - R_{s1}(\theta) \cdot S_{s1}(\theta)} \quad (9)$$

Essendo la scatola (b) fatta in modo tale da esporre alla luce sempre la stessa superficie per qualunque campione in misura, avremo allora semplicemente:

$$S_x(\theta) = S_{s1}(\theta) = S_{s2}(\theta) = S_0 \cdot \cos(\theta), \text{ da cui:}$$

$$\frac{V_x(\theta) - V_{s1}(\theta)}{V_{s2}(\theta) - V_{s1}(\theta)} = \frac{\Delta V'}{\Delta V''} = \frac{R_x(\theta) - R_{s1}(\theta)}{R_{s2}(\theta) - R_{s1}(\theta)} \quad (9')$$

Ed infine:

$$R_x(\theta) = (\Delta V' / \Delta V'') \cdot [R_{s2}(\theta) - R_{s1}(\theta)] + R_{s1}(\theta) \quad (9'')$$

Se quindi si conosce la  $R_s(\theta)$  dei due standard, si può ricavare la  $R_x(\theta)$  del campione incognito dalla (9''). Generalmente, come già accennato, si conosce solo la  $R_s(8^\circ)$  degli standard. Per standard ideali (diffusori ideali) ci si aspetterebbe che sia  $R_s(\theta) = R_s(8^\circ) = \text{costante}$  [2]. In realtà, la  $R_s(\theta)$  non è costante, e quindi occorre misurarla con precisione adottando il metodo tradizionale per la misura della riflettanza direzionale/emisferica descritto nello stato dell'arte per il settore dell'invenzione [1]. Per raggiungere valori elevati di angolo di incidenza nella misura sugli standard col metodo tradizionale, si potranno adottare procedimenti tradizionali [3], usando sorgenti di tipo laser che consentono facil-

mente di collimare il fascio di luce su aree inferiori al millimetro.

Da quanto detto sinora, il procedimento di misura differenziale della riflettanza risulta alquanto semplice e precisamente consiste nella misura dell'irraggiamento nella sfera, ai vari angoli  $\theta$  per il campione incognito e per due standard le cui riflettanze si approssimino a quella incognita prevista, meglio se uno con riflettanza leggermente inferiore e l'altro con riflettanza leggermente superiore, in modo tale che l'operazione di interpolazione, riassunta dalla (9''), risulti la più precisa possibile.

Una prima verifica della validità del metodo è stata effettuata impiegando tre campioni standard della Labsphere, SRS-02-010, SRS-05-010 e SRS-10-010, le cui riflettanze nominali sono, rispettivamente, del 2, 5 e 10%. Essi saranno indicati brevemente come S02, S05 e S10. La riflettanza di questi campioni è stata misurata, con il metodo innovativo riportato in [3], impiegando un laser He-Ne operante sul rosso,  $\lambda = 633 \text{ nm}$  (vedi Fig. 7). Le curve sono state riferite ai rispettivi valori reali di  $R(8^\circ, 633 \text{ nm})$ , ricavati dal certificato di calibrazione allegato agli standard. Gli stessi campioni sono stati poi misurati

con l'apparato delle Figure 1a e 1b, relativo al nuovo metodo differenziale, impiegando una sorgente QTH filtrata a 650 nm (larghezza di banda 70 nm). La Fig. 8 riporta le curve di corrente ottenute dalle misure con il "lock-in" sui tre standard. La corrente, in questo caso, svolge la stessa funzione della tensione riportata nell'equazione (7) e successive. A partire dalle curve di corrente degli standard S02 e S10, e adoperando la (9''), è stata poi ricavata la curva di riflettanza dello standard S05, col metodo MDR. Essa è stata poi confrontata con la curva ottenuta a luce laser seguendo il metodo tradizionale. Le due curve sono mostrate in Fig. 9, dalla quale si può ragionevolmente dedurre la validità del metodo MDR, riservandoci, comunque, in un futuro lavoro una accurata analisi degli errori di misura.

Il metodo MDR è stato poi applicato ad un campione di cella solare al silicio policristallino, testurizzata secondo uno schema a nido d'ape (Honeycomb) [4]. La Fig. 10 mostra le curve di corrente dei due riferimenti S02 e S10 e della cella solare. La Fig. 11 riporta, infine, la curva di riflettanza MDR della cella solare.

La presente invenzione è stata descritta a titolo illustrativo, ma non limitativo, secondo sue

forme preferite di realizzazione, ma è da intendersi che variazioni e/o modifiche potranno essere apportate dagli esperti nel ramo senza per questo uscire dal relativo ambito di protezione, come definito dalle rivendicazioni allegate.

## RIFERIMENTI

- [1] ASTM, Designation E 1175 - 87 (Reapproved 1996), "Standard Test Method for Determining Solar or Photopic Reflectance, Transmittance, and Absorptance of Materials Using a Large Diameter Integrating Sphere"
- [2] G. Kortum, "Reflectance Spectroscopy, Principles, Methods, Applications", Springer-Verlag, 1969, p. 28.
- [3] A. Parretta, "Dispositivo per la esecuzione non distruttiva di misure di riflettanza spettrale, globale, speculare e diffusa, ad angolo di incidenza variabile, nonché di trasmittanza, per celle solari e moduli fotovoltaici", Domanda di brevetto n. RM97A000676, 5 Novembre 1997.
- [4] J. Zhao, A. Wang and M.A. Green, "19.8% Efficient Multicrystalline Silicon Solar Cells with Honeycomb Textured Front Surface", Proc. of the 2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, Austria, 6-10 July 1998, ed. Joint Research Centre, European Commission, 1998, p. 1681.



RIVENDICAZIONI

1.- Apparecchio per la misura della riflettanza direzionale/emisferica di campioni piani (c) comprendente una sfera integratrice (s) avente una finestra di ingresso (w1) ed una finestra di uscita (w2) diametralmente opposte fra di loro, una sorgente di luce (l) che invia un fascio di luce attraverso un filtro interferenziale (f) alla sfera integratrice attraverso la sua finestra di ingresso (w1), un cilindro assorbitore (a) fissato alla finestra di uscita (w2) della sfera integratrice lungo la direzione del fascio, in modo da raccogliere tutta la luce che dalla lampada passa attraverso la detta sfera senza essere riflessa, una scatola (b) di supporto del campione (c) portata da un alberino (p) passante attraverso la parete della sfera in direzione radiale, girevole intorno al suo asse ( $\xi$ ) e traslabile lungo di esso in modo da portare detta scatola (b) di supporto del campione (c) dentro e fuori di detto fascio di luce, nonché un complesso di rivelazione e misura consistente di un fotodiodo (r) inserito nella parete della sfera integratrice (s) e collegato ad un voltmetro (v) per misurare la luce riflessa all'interno della sfera dal detto campione.

2.- Apparecchio di misura di riflettanza secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che la scatola di supporto del campione è girevole intorno all'asse ( $\xi$ ) della sua asta di supporto in modo da permettere di effettuare la misura della riflettanza del campione in funzione dell'angolo di incidenza ( $\theta$ ).

3.- Apparecchio di misura di riflettanza secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che il fascio di luce emesso da detta sorgente di luce (1) è monocromatico parallelo, con sezione sufficientemente grande per contenere tutta l'area del campione ad incidenza normale e sufficientemente piccolo per attraversare senza essere intercettato le dette due finestre diametralmente opposte ( $w_1, w_2$ ) della sfera integratrice (s), nonché omogeneo su un piano ortogonale.

4.- Apparecchio di misura di riflettanza secondo una qualsiasi delle precedenti rivendicazioni, caratterizzato dal fatto che detta scatola (b) di supporto del campione (c) è altamente assorbente la luce, mentre la sua asta di supporto girevole e traslabile ((p) è altamente riflettente la luce.

5.- Apparecchio di misura di riflettanza secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che

detta sorgente di luce (1) è una lampada a filamento di tipo QTH (quarzo tungsteno alogeno) oppure ad arco del tipo Xe, Hg oppure Xe-Hg.

6.- Apparecchio di misura di riflettanza secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che il campione (c) da misurare è alloggiato all'interno della scatola e quest'ultima ha parete anteriore molto sottile in modo da minimizzare l'effetto di ombreggiamento sul campione in corrispondenza di alti angoli di incidenza.

7.- Metodo per la misura differenziale della riflettanza di un campione o di una superficie piana con l'impiego di un apparecchio secondo una qualsiasi delle precedenti rivendicazioni 1 - 6, caratterizzato dal fatto che consiste nel misurare la luce riflessa in una sfera integratrice quando nella scatola (b) sia posto il campione o la superficie piana da misurare (c) ed uno o più riferimenti standard a riflettanza nota e nell'effettuare il confronto tra le diverse misure, per cui differenziando tra le intensità luminose riflesse si elimina l'eventuale contributo da parte della scatola (b) e si risale alla riflettanza del campione o della superficie piana.

Roma, 25 OTT. 1999

p.p.: ENEA, ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E  
L'AMBIENTE

ING. BARZANÒ & ZANARDO ROMA S.p.A.

TA

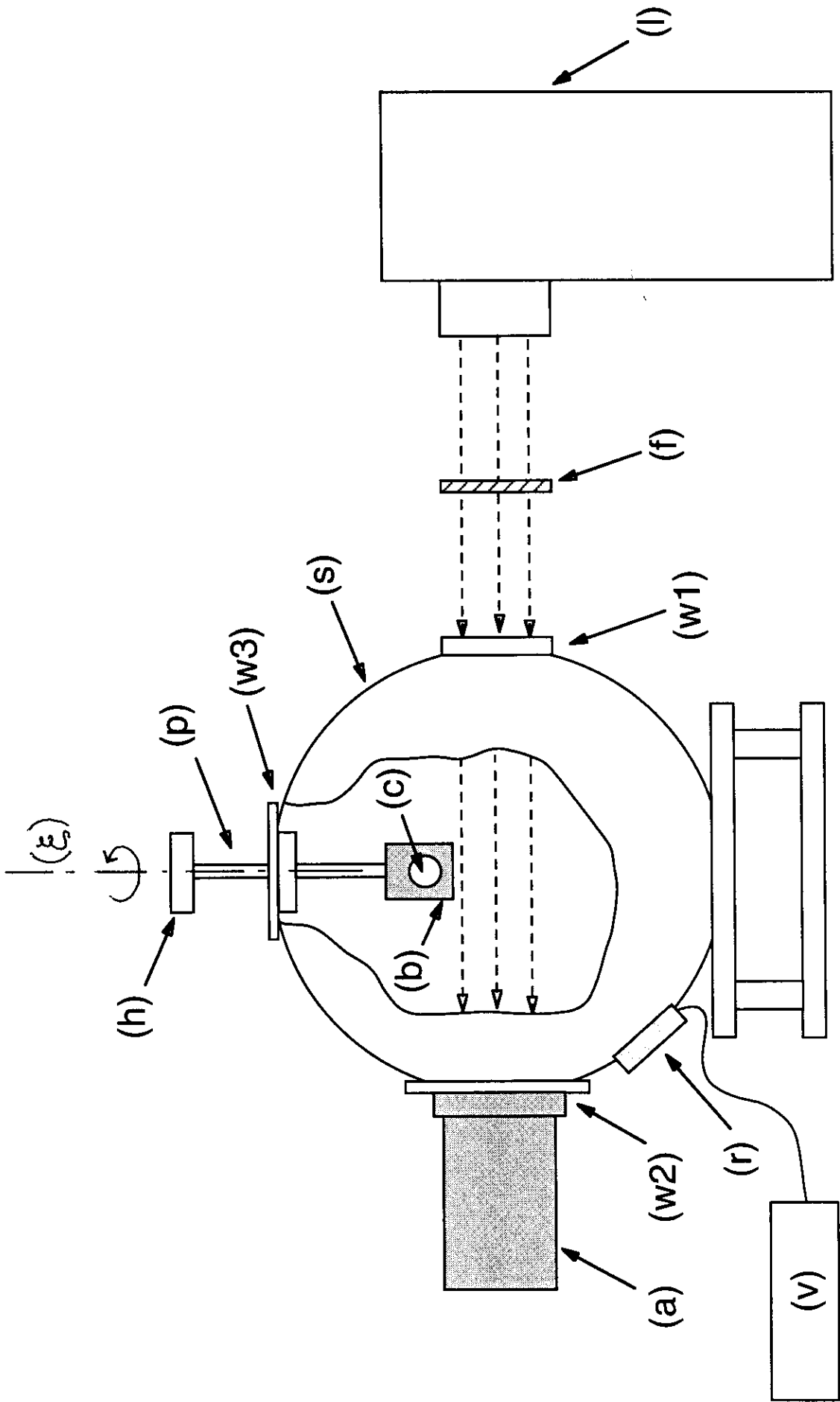


FIG. 1a

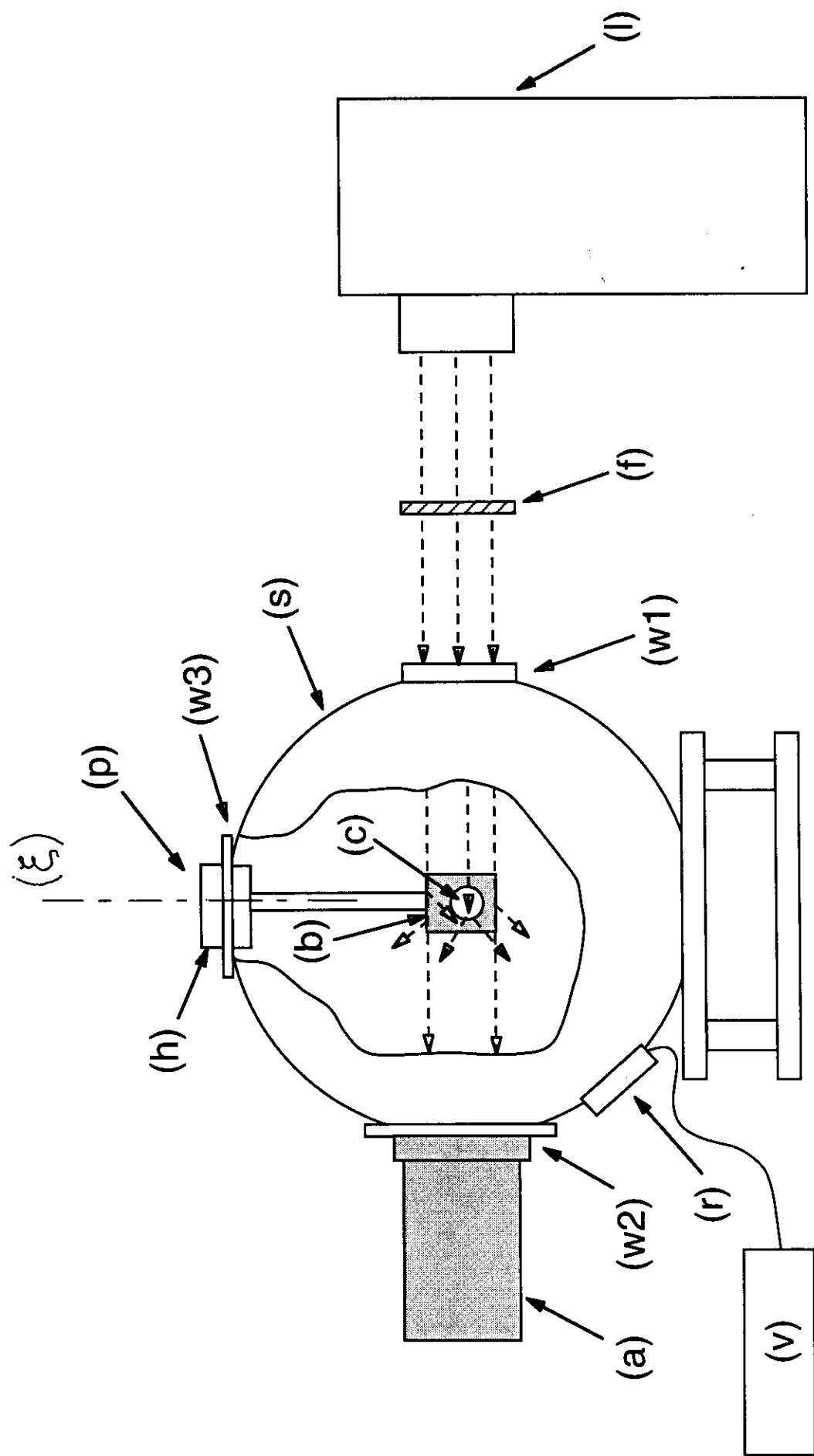


FIG. 1b

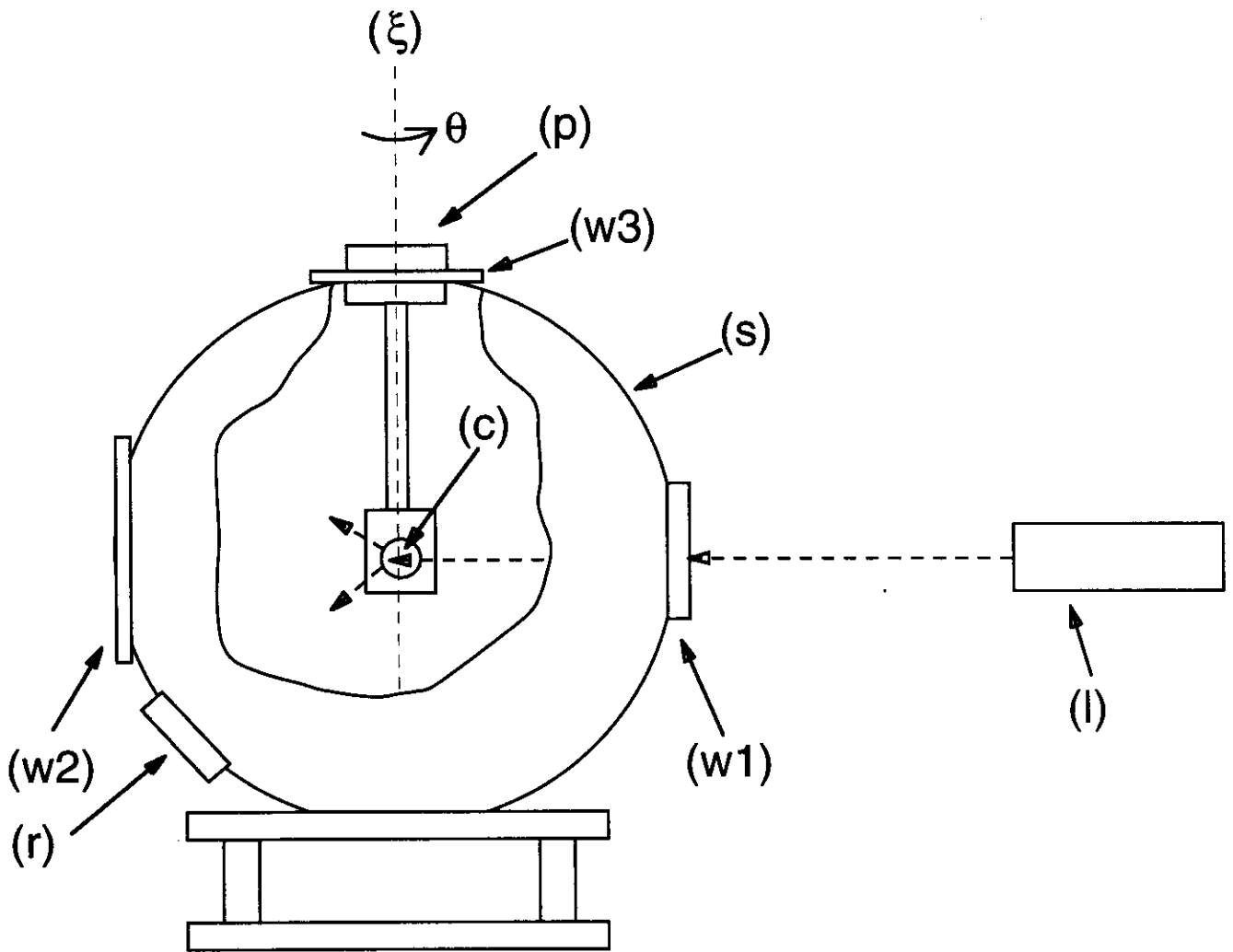


FIG. 2a

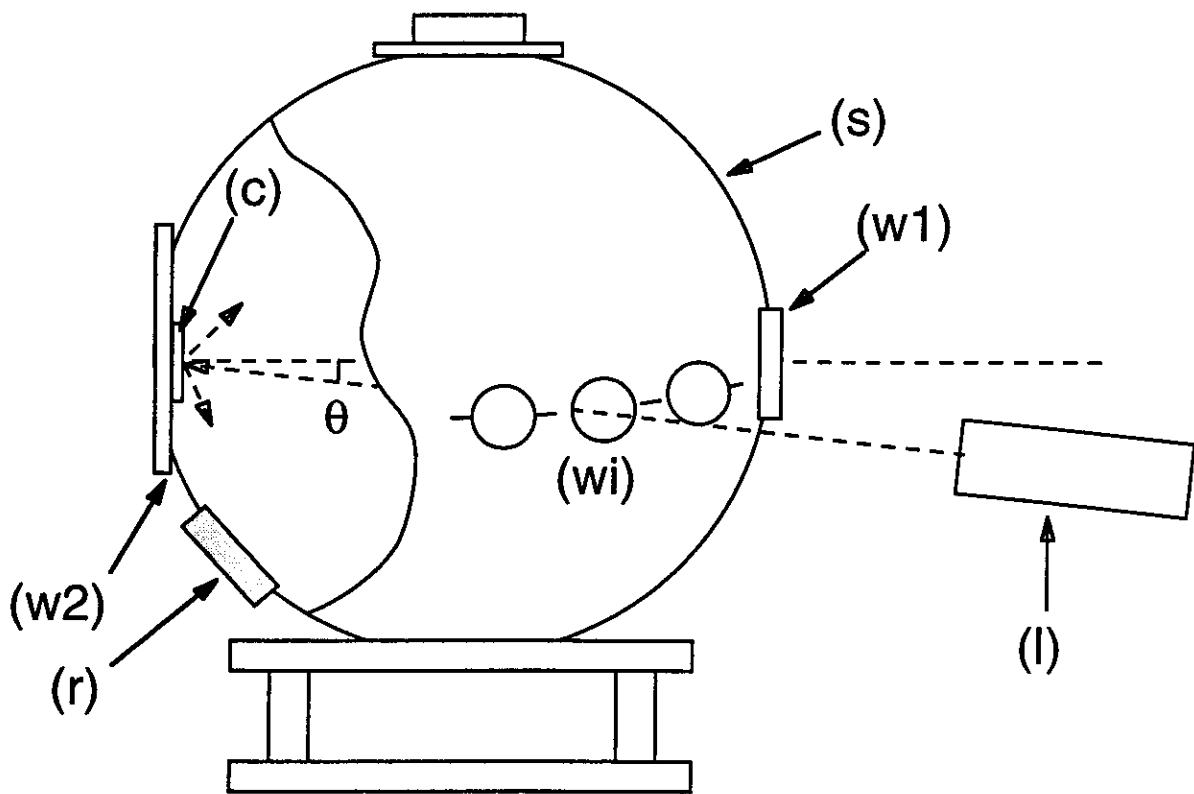


FIG. 2b



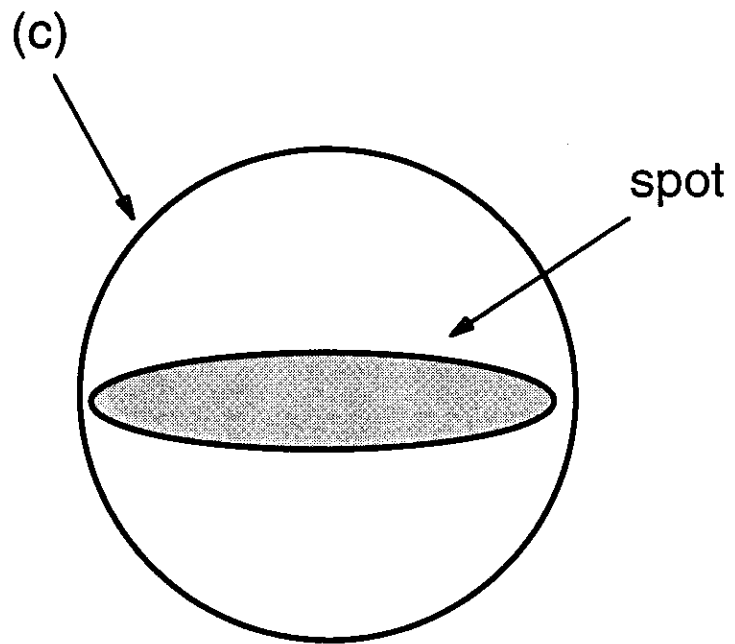


FIG. 3

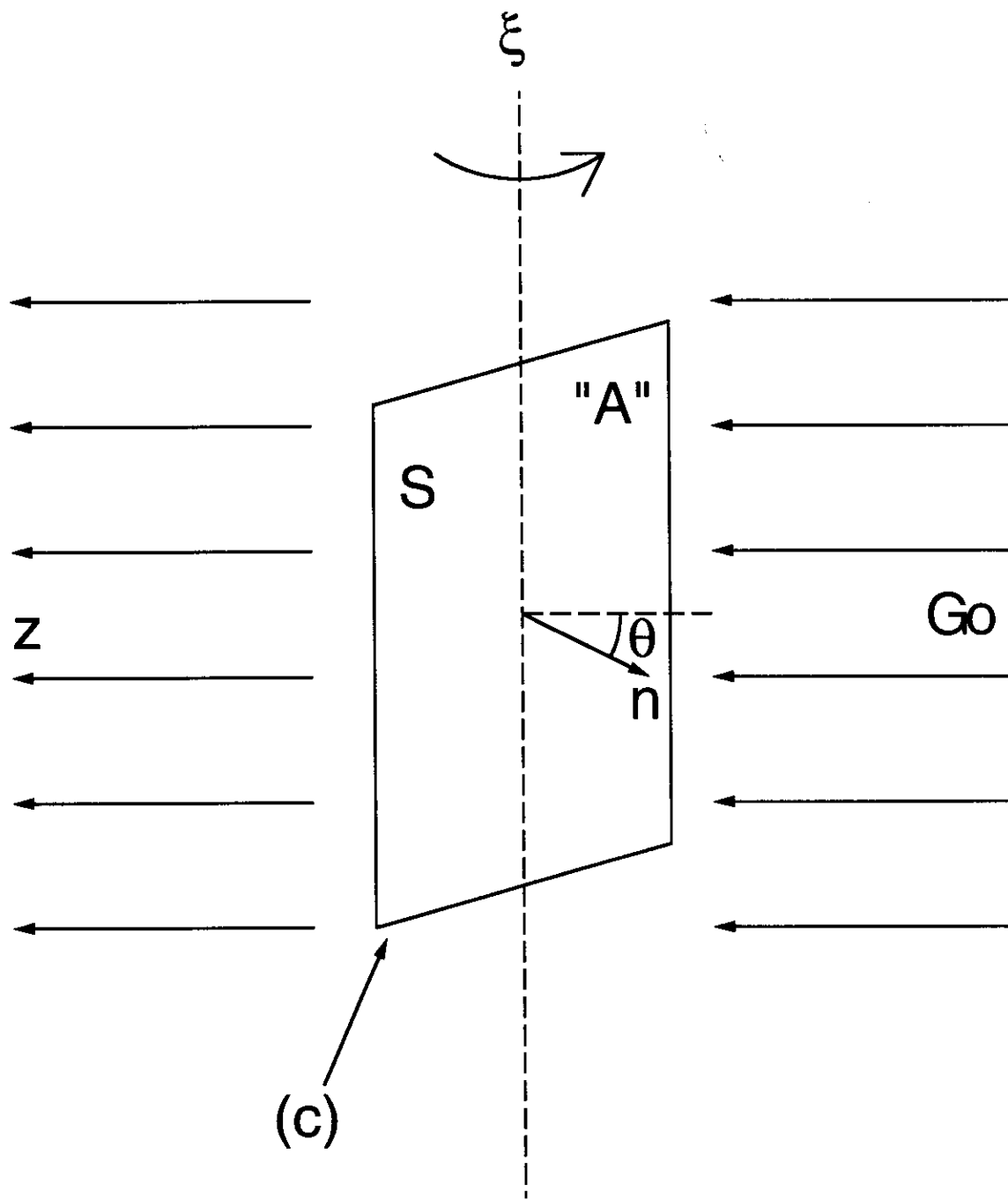


FIG. 4

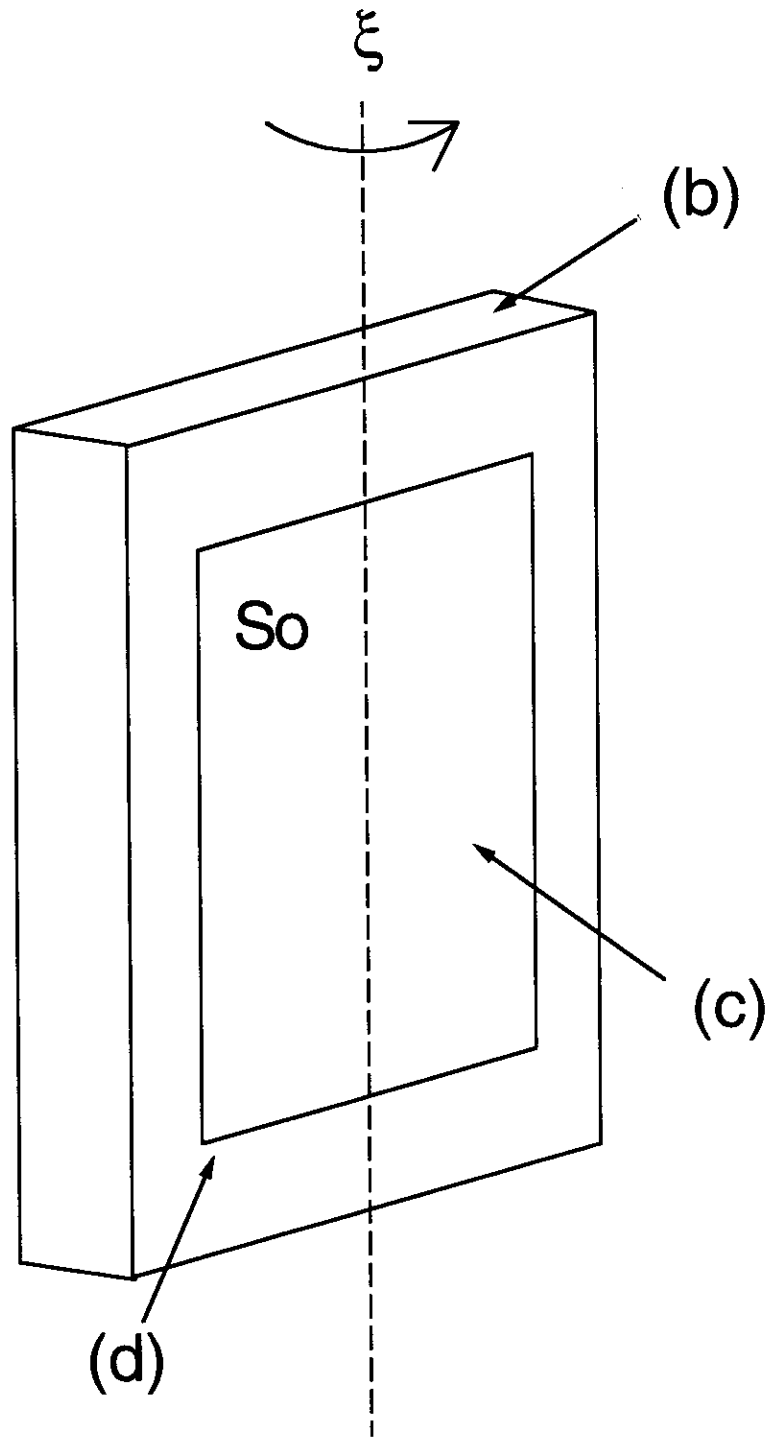


FIG. 5

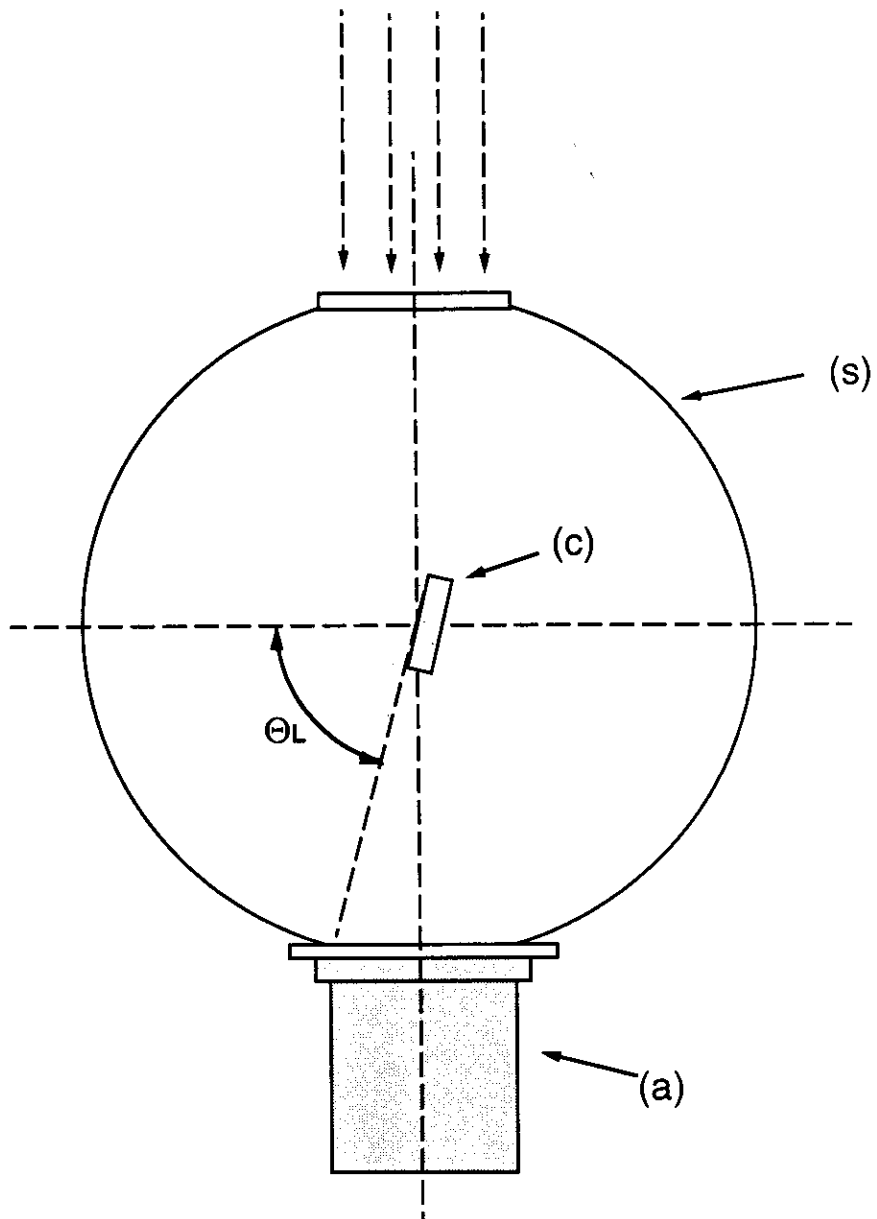


FIG. 6

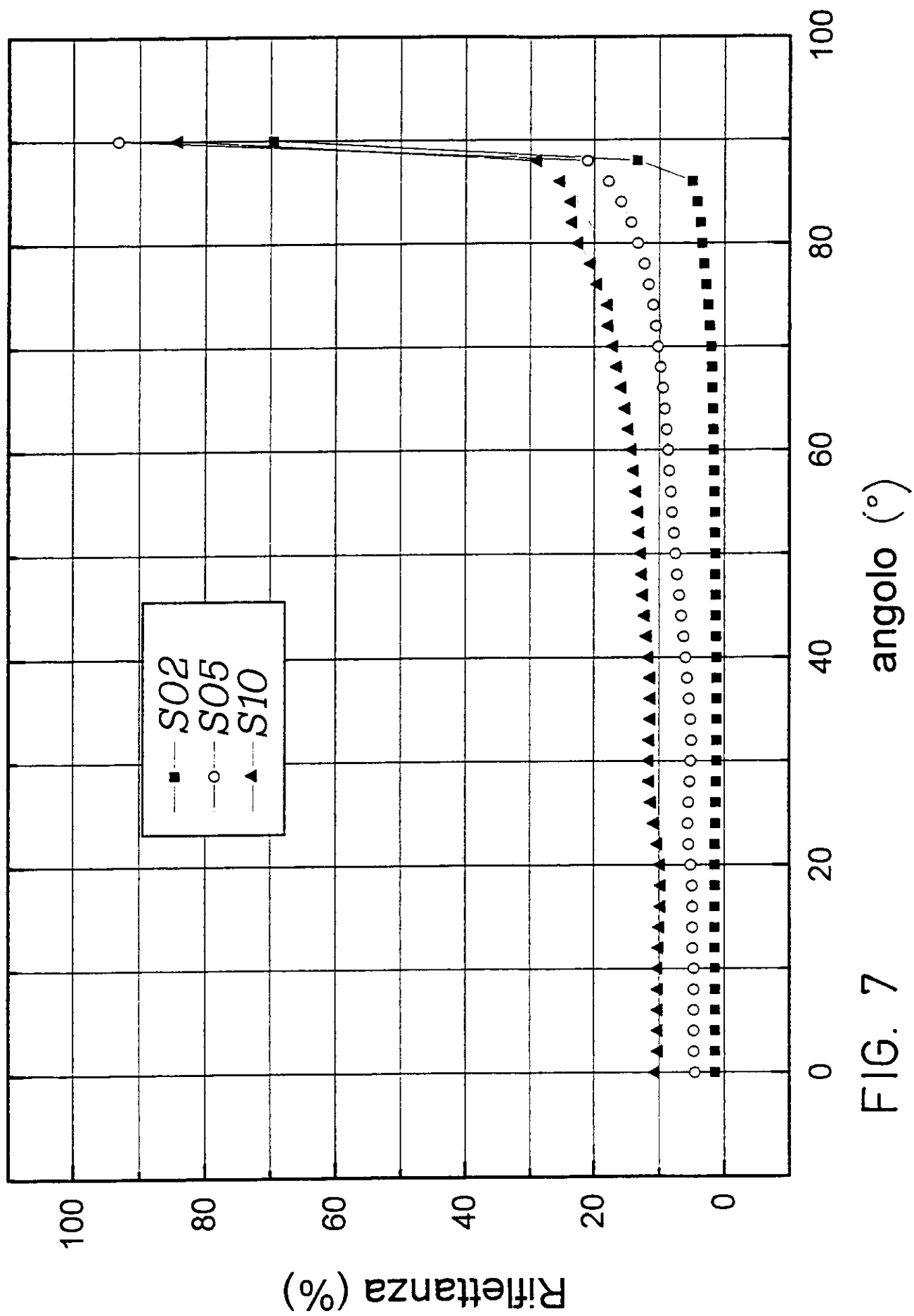


FIG. 7

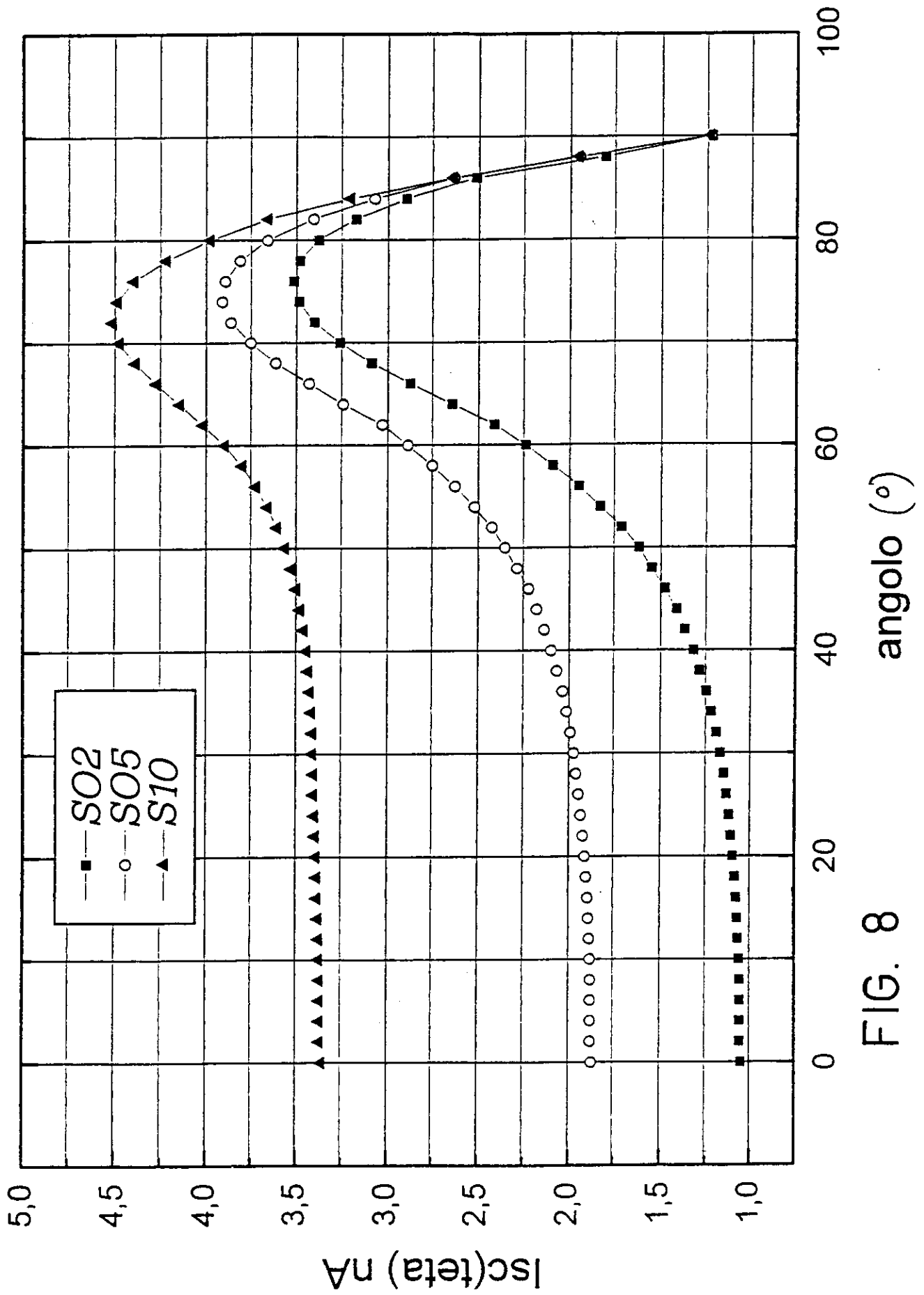
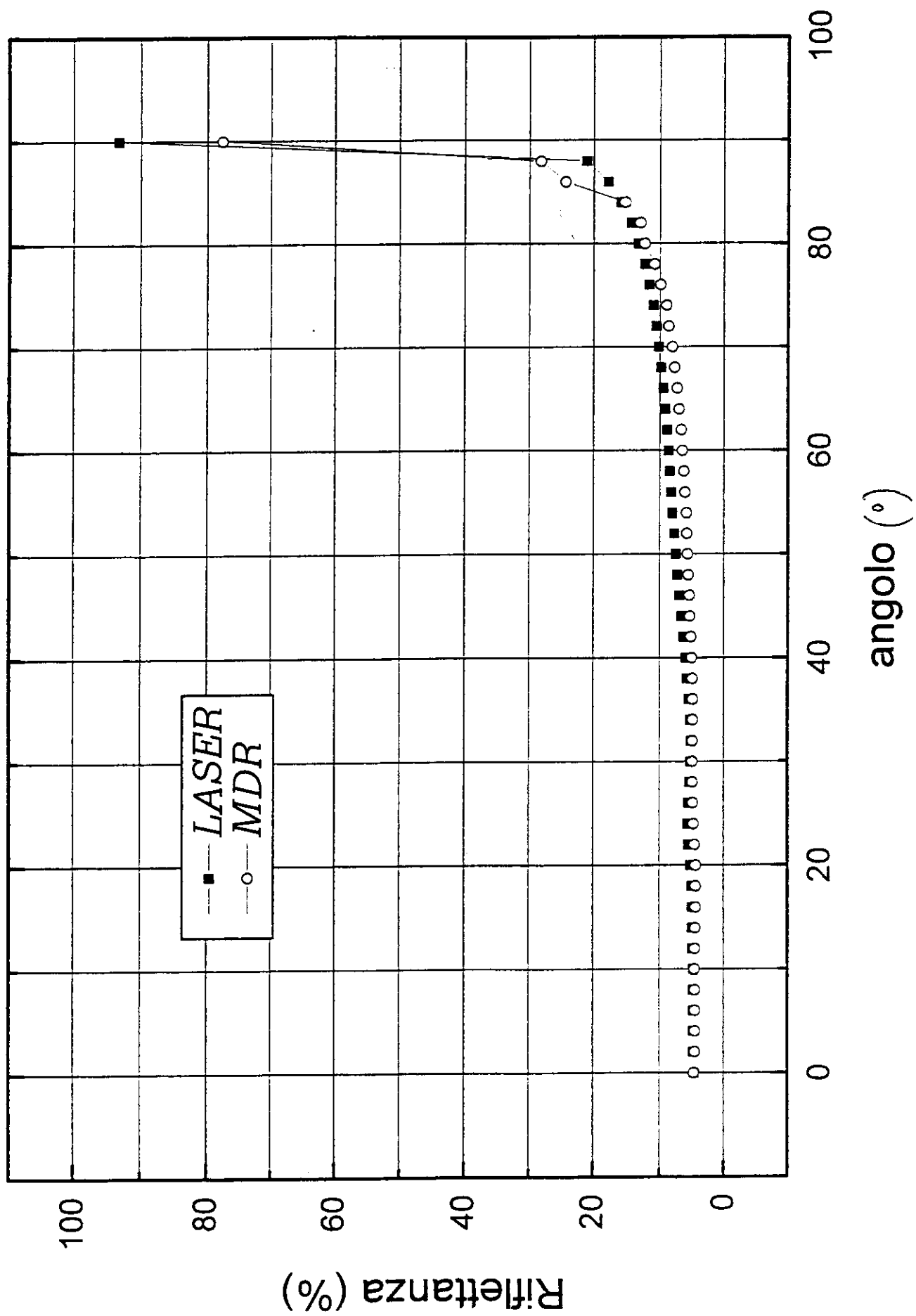


FIG. 8

FIG. 9



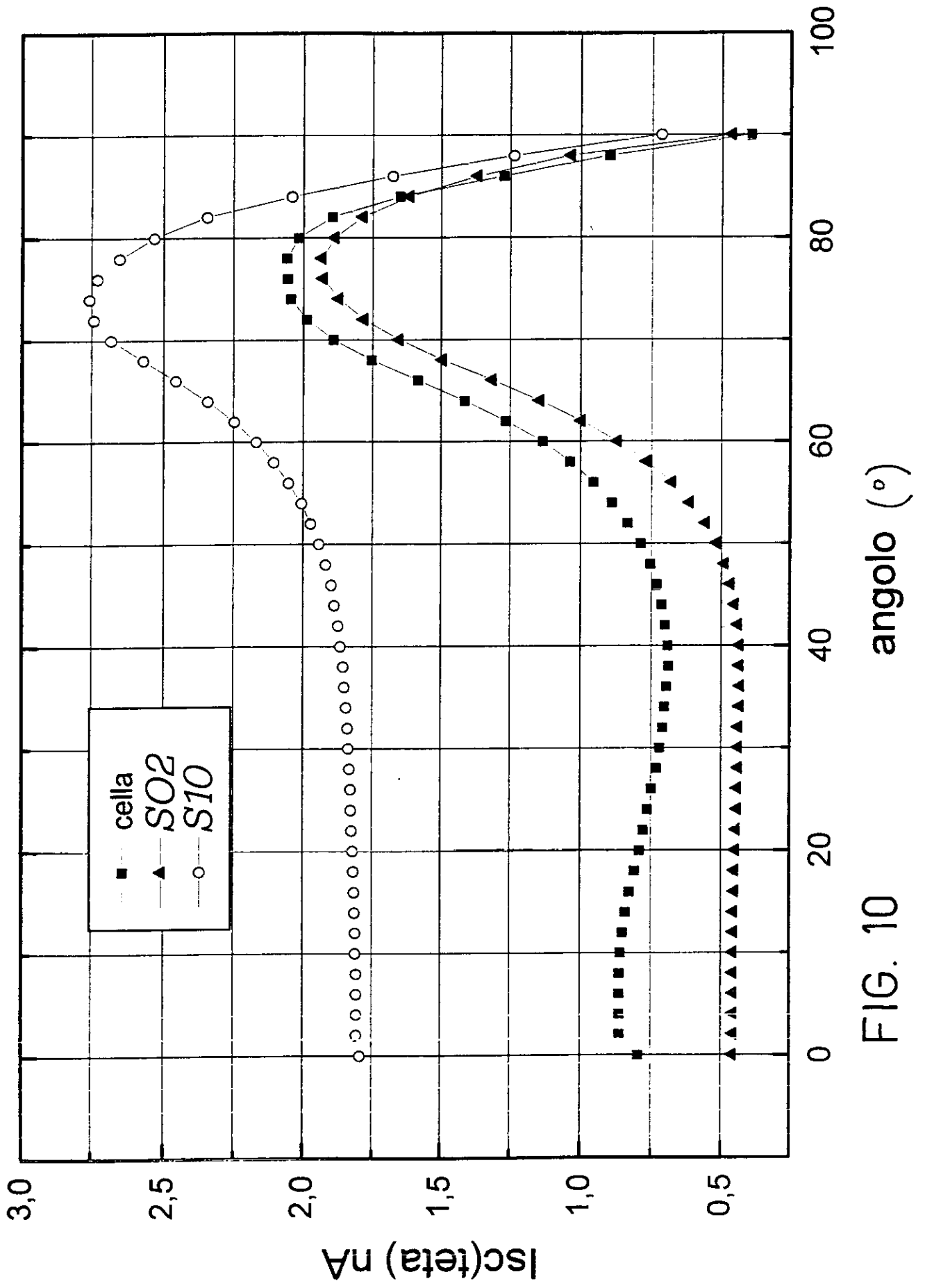


FIG. 10



Riflettanza cella HONEYCOMB (griglia orizzontale)  
metodo differenziale.

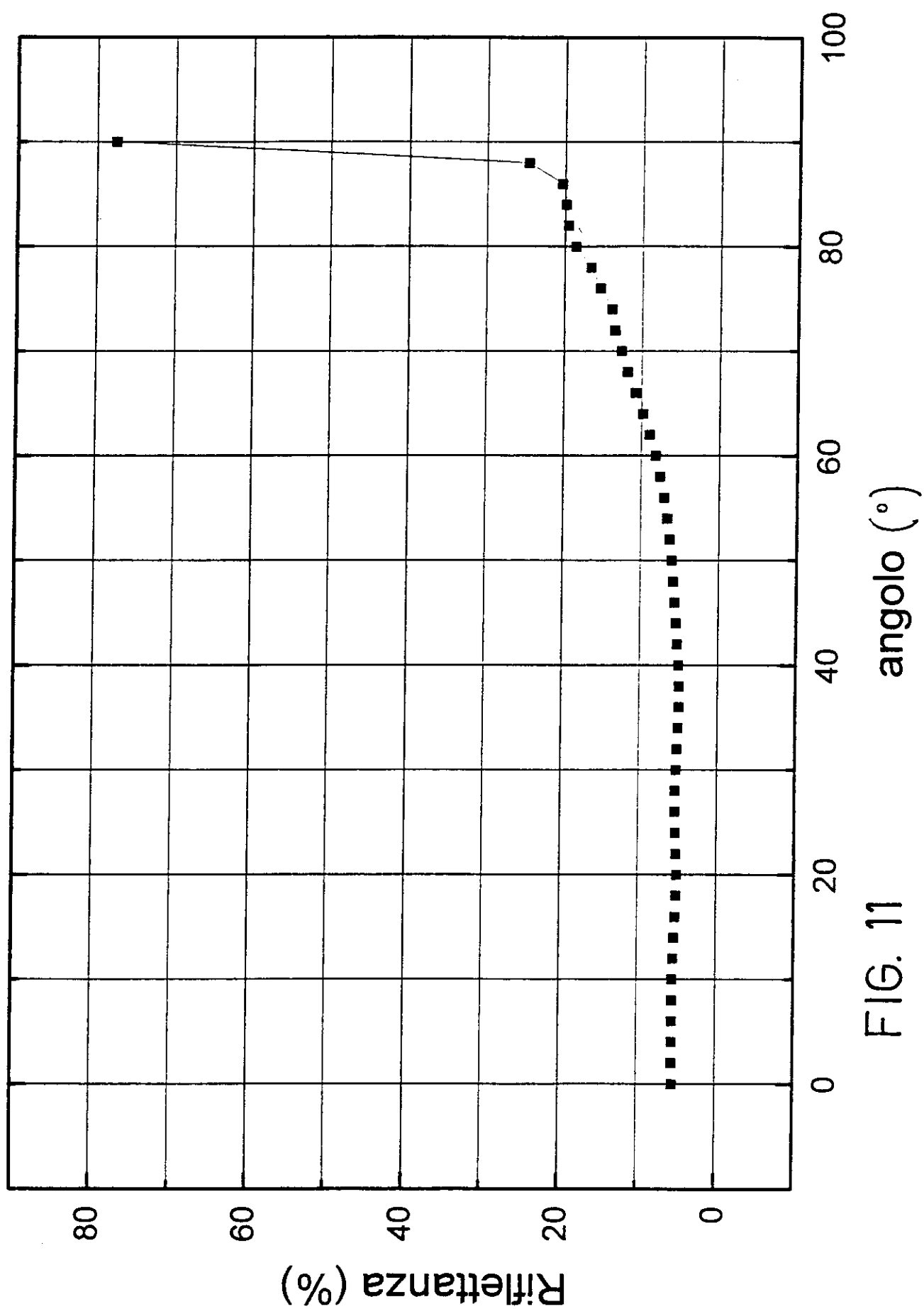


FIG. 11