

**RM 2000.000634**

RIASSUNTO INVENZIONE CON DISEGNO PRINCIPALE

PROSPETTO A

NUMERO DOMANDA

REG. A

DATA DI DEPOSITO / /

NUMERO BREVETTO

DATA DI RILASCIO / /

A. RICHIEDENTE(I)

1) Denominazione

2) Denominazione

D. TITOLO

Classe proposta (sez./cl./scl/)

(gruppo/sottogruppo)

L. RIASSUNTO

L'invenzione concerne una metodologia ed un apparato combinato per eseguire misure di riflettanza/trasmittanza emisferica/emisferica  $R^{hh} / T^{hh}$  comprendente una sorgente di luce (l); una sfera integratrice (s;s1) a cui è connesso un primo fotodiodo di misura (f1) collegabile ad un radiometro multicanale (ra), detta sfera integratrice (s;s1) avendo un diffusore di luce interno (d), una prima finestra di ingresso (w1), un oblò (o) che serve ad osservare l' interno della sfera ed una seconda finestra (w2) di interfacciamento con una sfera supplementare (s2) di dimensioni più piccole di quelle della sfera integratrice (s;s1), a cui è connesso un secondo fotodiodo di misura (f2) collegabile a detto radiometro multicanale (ra), detta sfera supplementare (s2) essendo anche fornita di un oblò (o2) che serve a trsguardare all' interno di essa.

M. DISEGNO

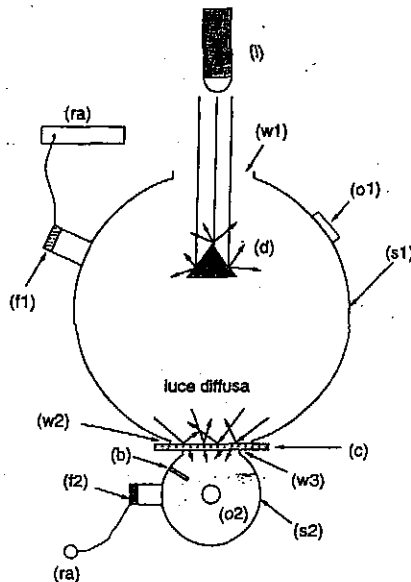


Fig. 2

Caso C-00/10

DESCRIZIONE

a corredo di una domanda di brevetto per Invenzione Industriale avente per titolo:

“APPARECCHIO E METODO PER LA CARATTERIZZAZIONE OTTICA IN LUCE DIFFUSA DI MATERIALI E DISPOSITIVI FOTOVOLTAICI “

a nome: i) ENEA – ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE e

ii) EUROSOLARE S.r.l.

Inventori: PARRETTA Antonio, SARNO Angelo, MACCARI Augusto, PETRUCCIOLI Sergio e FERRAZZA Francesca

oooooooo

La presente invenzione si riferisce in linea generale ad una tecnica ottica non distruttiva e concerne in particolare un dispositivo per la misura della riflettanza spettrale emisferica/emisferica, nonché di trasmittanza, per materiali e dispositivi impiegati nel campo dell'energia solare fotovoltaica. La tecnica descritta può essere applicata, in generale, alla misura su qualsiasi campione piano.

La conoscenza delle proprietà ottiche di riflettanza, assorbanza e trasmittanza di materiali e dispositivi fotovoltaici sotto irraggiamento di luce diffusa è fondamentale per definire con precisione il comportamento di questi stessi materiali e dispositivi alla radiazione solare reale ed in particolare per quantificare le perdite ottiche di un modulo fotovoltaico, che costituiscono uno dei cinque meccanismi di

perdita energetica, rispetto alle condizioni nominali STC [1]. Anche l'ottimizzazione delle proprietà di confinamento ottico da parte di questi materiali e dispositivi richiede la conoscenza del comportamento (riflettività e trasmissività) degli stessi ad un irraggiamento luminoso di tipo diffuso.

La grandezza ottica che esprime la riflettanza (o trasmittanza) di una superficie alla radiazione diffusa è la riflettanza (o trasmittanza) emisferica/emisferica, ovvero il rapporto tra l'intensità della radiazione riflessa (o trasmessa) dal campione e quella della radiazione incidente quando la sorgente di luce incidente, vista dal campione in misura, si estenda ad un angolo solido di  $2\pi$  steradiani e la luce riflessa (o trasmessa) sia misurata entro un angolo solido di  $2\pi$  steradiani. Tale grandezza viene indicata con il termine  $R^{hh}$  (o  $T^{hh}$ ), dove l'apice "hh" indica il termine inglese hemispherical/hemispherical.

### STATO ATTUALE DELLA TECNICA DEL SETTORE

Il metodo che si può tradizionalmente seguire per conoscere la riflettanza (o trasmittanza) emisferica/emisferica è piuttosto complesso. Esso richiede molte misure sperimentali di riflettanza (o trasmittanza) di tipo direzionale/emisferica, soprattutto nel caso di celle solari anisotrope, e un'integrazione numerica dei dati sui due angoli (azimutale e di incidenza).

Pertanto, lo stato attuale della tecnica non consente la misura diretta della riflettanza (trasmittanza) emisferica/emisferica di un dispositivo fotovoltaico (cella solare o modulo fotovoltaico). Per risalire a tale grandezza occorre impiegare un dispositivo che misuri la

riflettanza direzionale/emisferica,  $R^{dh}(\theta, \phi)$ , per vari angoli di incidenza  $\theta$  e di azimuth  $\phi$  del fascio di luce primario [2-4]. In un tale apparato il campione viene inserito all'interno di una sfera integratrice, oppure affacciato ad una finestra della stessa qualora esso sia di grosse dimensioni (quale un modulo fotovoltaico) ed irraggiato con un fascio di luce parallelo proveniente da una sorgente esterna alla sfera. La radiazione riflessa dal campione è raccolta dalla sfera e misurata da un sensore radiometrico posto al suo interno. Dal confronto di questa misura radiometrica con quella eseguita su un campione a riflettanza nota, o standard, si risale al valore della riflettanza del campione. Le misure possono essere fatte variando l'angolo di incidenza  $\theta$  del fascio luminoso da circa  $0^\circ$  (fascio ortogonale alla superficie del campione) fino ad un angolo massimo che dipende strettamente dal metodo di misura adottato [4], con intervalli che non superano  $5^\circ$ - $10^\circ$  (per un minimo di 10-20 misure in tutto). Se la superficie del campione non è isotropa rispetto all'orientazione del piano di incidenza del fascio, come nel caso delle celle al silicio cristallino testurizzato, allora è necessario ripetere le stesse misure per varie orientazioni azimutali del campione al fine di giungere ad una determinazione precisa della grandezza  $R^{dh}(\theta, \phi)$ , dove  $\phi$  è l'angolo di azimuth del fascio incidente [3]. In definitiva, per completare la serie di misure sperimentali su una sola regione del campione, è necessario effettuare da un minimo di 8-10 a un massimo di 30-60 misure a seconda delle caratteristiche del campione e della precisione che si vuole raggiungere. Le misure di  $R^{dh}(\theta, \phi)$  potranno essere effettuate con luce monocromatica o con una

sorgente di spettro noto. Nel primo caso si utilizzerà una lampada (tipicamente tungsteno-alogena o ad arco) e un monocromatore o dei filtri interferenziali passa-banda, ottenendo in tal caso la grandezza  $R^{dh}(\lambda, \theta, \phi)$ . Qualora invece si effettui la misura direttamente con una sorgente a spettro "s" noto, si otterrà la grandezza  $R^{dh}(s, \theta, \phi)$ . Per giungere infine alla grandezza  $R^{hh}(\lambda)$ , oppure  $R^{hh}(s)$ , i dati di  $R^{dh}(\lambda, \theta, \phi)$ , o  $R^{dh}(s, \theta, \phi)$ , dovranno essere integrati rispetto agli angoli  $\theta, \phi$  utilizzando le seguenti espressioni:

$$R_{hh}(\lambda) = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta R_{dh}(\lambda, \vartheta, \varphi)}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta} = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta R_{dh}(\lambda, \vartheta, \varphi) \right] \quad (1)$$

$$R_{hh}(s) = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta R_{dh}(s, \vartheta, \varphi)}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta} = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta R_{dh}(s, \vartheta, \varphi) \right] \quad (2)$$

dove:

$$R_{dh}(s, \vartheta, \varphi) = \frac{\int_s d\lambda \cdot G(\lambda) \cdot R_{dh}(\lambda, \vartheta, \varphi)}{\int_s d\lambda \cdot G(\lambda)} \quad (3)$$

e  $G(\lambda)$  è la irradianza spettrale della sorgente luminosa. Le espressioni (1) e (2) saranno poi integrate con metodi numerici. Per un campione isotropo, ovvero con  $R^{dh}$  indipendente da  $\phi$ , le eq. (1) e (2) diventano, rispettivamente:

$$R_{hh}(\lambda) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot R_{dh}(\lambda, \vartheta) \quad (1')$$

$$R_{hh}(s) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot R_{dh}(s, \vartheta) \quad (2')$$

Un procedimento del tutto analogo dovrà essere seguito per la determinazione della trasmittanza  $T^{hh}(\lambda)$  o  $T^{hh}(s)$ , con la differenza che il sistema sperimentale a sfera integratrice sarà configurato per la misura della trasmittanza anziché della riflettanza [3].

Rispetto alla complessità del metodo attualmente disponibile, il metodo oggetto della presente invenzione si presenta estremamente semplice e diretto ed inoltre l'apparecchiatura richiesta è basata sull'uso di due sfere integratrici configurate in maniera molto semplice. Il valore incognito di riflettanza o trasmittanza si ricava da un semplice confronto tra misure radiometriche effettuate sul campione e su un numero limitato e selezionato di campioni di riferimento con proprietà ottiche di riflettanza certificate.

Più particolarmente, il metodo proposto nella presente invenzione è invece diretto, rapido e non richiede ulteriori elaborazioni delle misure sperimentali. Esso consiste nel sottoporre il campione alla radiazione diffusa di una sfera integratrice e nel misurare la variazione dell'irradianza all'interno della sfera stessa prodotta dalla sostituzione del campione con campioni di riferimento a riflettanza  $R^{hh}$  nota. La riflettanza  $R^{hh}$  del campione viene poi ricavata da una interpolazione sui dati relativi agli standards.

Il sistema per la misura della riflettanza, per piccoli o grandi campioni, comprende (vedi Figura 1): una sorgente di luce (l), una sfera integratrice (s) ed un radiometro multicanale (ra). Il fascio di luce parallelo proveniente dalla sorgente (l) entra nella sfera attraverso la finestra (w1) e viene diffuso al suo interno dal diffusore (d). Sulla

finestra (w2) è affacciata una porzione della superficie del campione (c) che sarà irraggiata da una radiazione diffusa con distribuzione angolare di tipo lambertiano (vedi Appendice A). Un oblò (o) serve ad osservare l'interno della sfera e a posizionare correttamente il campione ed un fotodiodo (f), collegato con il radiometro (ra), serve a misurare l'irradianza all'interno della sfera.

Il metodo per determinare la trasmittanza  $T^{hh}$  consiste nell'irraggiare il campione con la radiazione diffusa prodotta da una prima sfera integratrice e nel misurare la radiazione trasmessa dal campione stesso in una seconda sfera integratrice (sfera satellite). Confrontando tale misura con quella ottenuta in assenza del campione, si risale facilmente al valore di trasmittanza  $T^{hh}$ .

Per la misura su piccoli o grandi campioni, il sistema comprende (vedi Figura 2): una sorgente di luce (l), una sfera (s1) configurata come in Figura 1, una sfera supplementare (s2) di dimensioni più piccole di quella principale, ed un radiometro (ra). Il campione (c) è posto tra le due sfere. La radiazione diffusa prodotta nella sfera (s1) e misurata dal fotodiodo (f1) irraggia in modo lambertiano il campione (c); tutta la radiazione trasmessa da (c) viene raccolta dalla sfera (s2) attraverso la finestra (w2) e misurata con il fotodiodo (f2) collegato anch'esso con il radiometro (ra); l'oblò (o2) serve a travedere all'interno della sfera (s2).

#### BREVE DESCRIZIONE DEI DISEGNI

La Figura 1 mostra uno schema dell'apparato della presente invenzione nella configurazione adatta alla misura della riflettanza

emisferica/emisferica,

la Figura 2 mostra uno schema dell'apparato della presente invenzione nella configurazione adatta alla misura della trasmittanza emisferica/emisferica,

la Figura 3a rappresenta un modulo fotovoltaico posto sul piano orizzontale ed irraggiato dalla luce diffusa della semisfera celeste,

la Figura 3b mostra la sfera di irraggiamento che comporta una irradianza sul modulo proporzionale al coseno dell'angolo di incidenza  $\theta$ ,

la Figura 4a mostra una sfera integratrice come sorgente di luce diffusa, a radianza costante con l'angolo di incidenza  $\theta$ , per un campione posto al suo interno,

la Figura 4b mostra un campione posto sulla superficie della sfera integratrice irraggiato, come nel caso della Figura 4a, da una luce diffusa a radianza costante con l'angolo di incidenza  $\theta$ ,

la Figura 5a mostra un sistema sperimentale adottato per mostrare che una sfera integratrice illuminata si comporta come una sorgente di tipo lambertiano: in questo caso, il fotodiodo (f) vede soltanto l'interno della sfera e dà una misura costante,

la Figura 5b mostra un sistema sperimentale adottato per mostrare che una sfera integratrice illuminata si comporta come una sorgente di tipo lambertiano: in questo caso il fotodiodo (f) vede anche la finestra (w) della sfera e dà una misura proporzionale al coseno dell'angolo  $\theta$ ,



la Figura 6 mostra il confronto della misura del fotodiodo di Figura 5b con la funzione  $\cos \theta$ ,

la Figura 7 mostra la curva di irradianza/riflettanza ottenuta ponendo sulla finestra della sfera diversi campioni standard di riflettanza e misurando la corrispondente irradianza nella sfera,

la Figura 8 mostra l'effetto di intrappolamento della luce nell'incapsulante del modulo, che determina una dispersione della luce al di fuori della sfera e quindi una sottostima della riflettanza del campione,

la Figura 9 mostra la configurazione completa dell'apparato per la misura della riflettanza emisferica/emisferica in luce laser secondo la presente invenzione,

la Figura 10 mostra la maschera da apporre sulla finestra della sfera, nella misura della riflettanza, per evitare di illuminare anche i due "bus bar",

la Figura 11 mostra la configurazione dell'apparato per la misura della riflettanza emisferica/emisferica spettrale secondo la presente invenzione,

la Figura 12 mostra la riflettanza  $R^{hh}$  (633) misurata su celle incapsulate Eurosolare senza griglia, di diversa colorazione,

la Figura 13 mostra il confronto tra la riflettanza  $R^{hh}$  (633) di celle incapsulate con griglia e senza griglia,

la Figura 14 mostra la riflettanza  $R^{hh}$  in luce bianca misurata su celle incapsulate Eurosolare senza griglia, di diversa colorazione,

la Figura 15 mostra la curva di  $R^{dh}$  (633,  $\theta$ ) ottenuta interpolando i dati sperimentali di riflettanza ottenuti per una cella Eurosolare, senza griglia, al Si monocristallino,

la Figura 16 mostra la configurazione completa dell'apparato per la misura della trasmittanza emisferica/emisferica in luce laser, secondo la presente invenzione,

la Figura 17 mostra le curve di trasmittanza direzionale/emisferica,  $T^{dh}$  (633,  $\theta$ ), ricavate su diversi campioni di TCO/vetro,

la Figura 18 mostra una schematizzazione dell'irraggiamento diffuso, prodotto dalla semisfera celeste, su un campione posto sul piano orizzontale,

la Figura 19 mostra una schematizzazione dell'irraggiamento diffuso, prodotto da una superficie illuminata qualsiasi su un campione generico (c).

#### DESCRIZIONE TECNICA DELL'INVENZIONE

Il sistema oggetto della presente invenzione ha come finalità principale la misura della riflettanza e/o della trasmittanza alla radiazione diffusa di superfici di materiali e dispositivi impiegati nel campo dell'energia solare fotovoltaica. Lo stesso sistema può essere impiegato per la misura su superfici piane di qualsiasi tipo e finalizzate a qualsiasi altra applicazione. Nell'ambito dell'energia solare fotovoltaica, è importante la conoscenza delle proprietà di riflessione, assorbimento e trasmissione di una superficie, film o dispositivo (cella solare o modulo fotovoltaico) alla radiazione solare diffusa. Nella

pratica, infatti, il dispositivo fotovoltaico opera in condizioni di irraggiamento distribuito su un angolo solido di  $2\pi$  sr. L'irraggiamento solare reale può essere considerato come la somma di una componente diretta di radiazione data dal disco solare, di una componente diffusa data dalla volta celeste e di una componente riflessa data dal terreno circostante (albedo). Quest'ultima può essere trattata alla stessa stregua di una sorgente diffusa isotropa [5].

L'apparato della presente invenzione simula una sorgente diffusa isotropa estesa a  $2\pi$  sr e di lunghezza d'onda o di spettro particolare. La misura di  $R^{hh}(s)$ , fatta col presente apparato su un modulo FV, corrisponde alla riflettanza che detto modulo, se posto sul piano orizzontale, manifesterebbe ad una componente diffusa della luce solare esterna, isotropa e di spettro "s". Essa corrisponde anche alla riflettanza che il modulo, se posto verticalmente, manifesterebbe alla porzione ( $\pi$  sr) di radiazione diffusa dalla volta celeste ed alla porzione ( $\pi$  sr) di radiazione riflessa dal terreno circostante, se l'una o l'altra fossero isotrope e di spettro "s". La grandezza  $R^{hh}$  si delinea come un parametro fondamentale nel confronto tra moduli fotovoltaici per stabilire quale di essi sia più adatto ad operare in condizioni meteorologiche nelle quali la componente diffusa della radiazione solare sia rilevante (moduli per edilizia particolarmente sfavoriti rispetto alla componente diretta del sole per effetto della loro orientazione non ottimale, oppure moduli impiegati nei paesi nordici dove il cielo è generalmente coperto).

La radiazione solare diffusa, considerata per semplicità isotropa, è assimilabile ad una sorgente Lambertiana (di estensione infinita), nel senso che un rivelatore radiometrico puntato su una qualsiasi direzione della sfera celeste per mezzo di un sistema telescopico misurerebbe la stessa intensità. Per semplicità si può dire che la "radianza" [6] della sorgente diffusa, ovvero l'irradianza su una superficie orientata ortogonalmente rispetto alla sorgente e che raccolga la radiazione da una unità di angolo solido ( $1 \text{ sr}$ ), è costante in funzione degli angoli  $\theta$  e  $\phi$ . Se invece la superficie ricevente è mantenuta sempre sul piano orizzontale, essa riceverà dal generico angolo solido unitario della semisfera celeste, una intensità luminosa (irradianza) che sarà massima per lo zenith e nulla per un punto sull'orizzonte. In breve tale irradianza varierà come la funzione  $\cos \theta$ . Tale situazione è rappresentata nelle Figure 3a e 3b.

Una sfera integratrice (o integrante) può essere utilizzata come sorgente di radiazione diffusa. Essa può essere usata come tale per irraggiare un piccolo campione posto al suo interno (Figura 4a) oppure un campione di qualsiasi dimensione affacciato su una finestra praticata sulla sua superficie (Figura 4b). Nella Figura 4a è molto evidente il fatto che, per effetto della distribuzione omogenea della radiazione riflessa dalla superficie interna della sfera, il campione (c) si trova nella stessa situazione del modulo orizzontale sottoposto alla radiazione solare diffusa (Figura 3a), ovvero che la irradianza sul campione è una funzione di  $\cos \theta$  (Figura 3b). In Appendice A è mostrato come anche un campione affacciato alla finestra di una sfera

integratrice (Figura 4b) venga illuminato da una radiazione diffusa che ha una radianza costante con l'angolo  $\theta$  e quindi irraggiato secondo una legge lambertiana del tipo  $\cos \theta$ . Che la sfera integratrice impiegata nel presente sistema sia effettivamente una sorgente lambertiana è stato verificato sperimentalmente (vedi Figura 5a). Un fotorivelatore (f), dotato di un semplice sistema telescopico a tubo (t) che permette di raccogliere la radiazione proveniente da un ristretto angolo solido  $\Delta\Omega$  contenuto all'interno della finestra (w), è stato fatto ruotare attorno all'asse verticale passante per il centro della finestra. Le misure radiometriche in funzione di  $\theta$  hanno dato un valore sempre costante. Se il fotorivelatore (f) vede l'intera finestra (w) (vedi Figura 5b), allora, una conseguenza diretta della misura precedente (vedi Appendice A) è che l'intensità luminosa misurata è ora una funzione di  $\cos \theta$ . Questo risultato è riportato in Figura 6.

Verrà ora descritto nei suoi principi il metodo di misura della riflettanza  $R^{hh}$ , con riferimento alla Figura 1, corrispondente alla configurazione di Figura 4b, ovvero a quella adottata per la misura su campioni sia di piccole che di grandi dimensioni. La radiazione diffusa della sfera incide su una porzione della superficie del campione, la quale riflette, con modalità specifiche della sua struttura, la radiazione all'interno della sfera. Tutta la radiazione riflessa dal campione è raccolta dalla sfera. Considerando che l'irradianza all'interno della sfera, misurata col rivelatore (f), è una funzione della riflettività della sua superficie interna [7], essa sarà anche una funzione della riflettività della superficie del campione affacciato alla finestra (w2). Ora, per

mezzo di campioni a riflettanza nota e certificata, è possibile tarare il sistema, ovvero costruire una curva di irradianza in funzione della riflettanza dalla quale estrarre il valore di riflettanza incognito.

Il metodo di misura della trasmittanza  $T^{hh}$  consiste, invece, nella misura della radiazione trasmessa dal campione semitrasparente ad una seconda sfera integratrice (s2) (vedi Figura 2). Esso è quindi un metodo diretto di misura della radiazione trasmessa, contrariamente al metodo di misura della riflettanza che è indiretto, in quanto misura le variazioni prodotte sulla luminosità della sfera. Valori di  $T^{hh} = 0\%$  e di  $T^{hh} = 100\%$  saranno ottenuti ponendo sulla finestra (w2) dapprima un campione opaco e poi lasciando la finestra stessa aperta e misurando, in corrispondenza, l'irradianza all'interno della sfera satellite (s2). Il valore di trasmittanza del campione in misura sarà ottenuto, come per la riflettanza, attraverso una interpolazione sui dati di irradianza/trasmittanza relativi ai campioni di riferimento.

La misura della riflettanza  $R^{hh}$  sfrutta l'effetto che è alla base del cosiddetto "errore di sostituzione" ("substitution error") [8], che si manifesta in una sfera integratrice quando si effettua una misura di riflettanza direzionale/emisferica, in seguito alla sostituzione del campione in misura con uno standard di riflettanza. Lo scambio tra campione e standard produce una diversa illuminazione della sfera non soltanto per effetto di una diversa riflessione del raggio primario da parte dell'area direttamente illuminata, ma anche perché la sostituzione dei campioni altera la superficie interna della sfera e quindi le sue caratteristiche di integrazione della radiazione. Per fare un esempio, la

sostituzione di un campione a bassa riflettività con uno standard bianco (alta riflettività) favorisce l'illuminazione della sfera in quanto la sua superficie interna è globalmente più riflettente. Questo effetto si tradurrebbe in un errore di misura della riflettanza direzionale/emisferica qualora fosse ignorato. Nell'esempio citato, la riflettanza del campione risulta sottovalutata. Nella misura di  $R^{hh}$  nessun raggio primario incide sul campione, ma la sfera integratrice viene illuminata inviando il raggio primario sulla sua parete o su un qualsiasi altro punto al suo interno, opportunamente scelto allo scopo di illuminarla in maniera uniforme. L'informazione relativa alla direzione ed alla polarizzazione della radiazione incidente è allora scomparsa in quanto il materiale diffusore della sfera, supposto ideale, depolarizza completamente qualunque raggio incidente [9]. Questo significa anche che si può usare, come sorgente, un qualsiasi tipo di radiazione, polarizzata o non, contrariamente alle misure di riflettanza direzionale/emisferica,  $R^{dh}$ , nelle quali è fondamentale conoscere la polarizzazione della radiazione incidente. In Figura 1 è mostrato un diffusore (d) posto all'interno della sfera. Esso ha un ingombro minimo per non interferire sulla integrazione della radiazione. Si effettuano dapprima misure con standards di riflettanza commerciali. Questi vengono forniti come standards di  $R^{dh}(\lambda, 8^\circ)$ . In Appendice B è mostrato come, nell'ipotesi di un loro comportamento come diffusori ideali, si abbia l'eguaglianza:  $R^{dh}(\lambda, 8^\circ) = R^{hh}(\lambda)$ . Se si affacciano, allora, sulla finestra (w2) di volta in volta i diversi standards di riflettanza, l'illuminazione della sfera cambierà corrispondentemente.

Da queste variazioni si può derivare una curva di irradianza/riflettanza  $R^{hh}$  (vedi Figura 7). Misurata l'irradianza all'interno della sfera per il campione incognito, dalla Figura 7 si ricava la riflettanza  $R^{hh}$  incognita. La variazione dell'irradianza all'interno della sfera,  $I_s$ , conseguente alla variazione della riflettanza  $R^{hh}$ , cresce al crescere delle dimensioni della finestra,  $S_C$ . Al fine di rendere più sensibile la misura di  $R^{hh}$ , è necessario quindi operare con valori di  $S_C$  relativamente alti rispetto alla superficie totale della sfera. Questo comporta che il dimensionamento della sfera va fatto rispetto alle dimensioni dei campioni da misurare. Per campioni di celle solari prototipali (qualche  $\text{cm}^2$ ), occorre necessariamente operare con sfere integratrici di piccole dimensioni (10-15 cm di diametro). In linea di principio, tali sfere potrebbero essere impiegate per misure su qualsiasi tipo di cella o modulo, di qualunque dimensioni essi siano, in quanto è sufficiente, ai fini della misura, isolare una porzione rappresentativa della loro superficie. Su celle solari incapsulate di grosse dimensioni e su moduli fotovoltaici, però, si può manifestare un fenomeno d'intrappolamento della radiazione all'interno dell'incapsulante di vetro/EVA, che si può estendere per tratti maggiori delle dimensioni della finestra della sfera dove è posto il campione. Questo fatto fa sì che, con finestre piccole, una parte della luce incidente sia intrappolata nell'incapsulante e fuoriesca dal campione al di là della finestra di raccolta della luce riflessa. In tal caso, la misura della  $R^{hh}$  sarà sottostimata, tanto più quanto più piccole sono le dimensioni della finestra. Questo fenomeno è schematizzato, in forma ingigantita, in Figura 8. Per celle solari incapsulate da 10-12 cm



di lato o per moduli fotovoltaici, allora, è conveniente, se non necessario, operare con sfere integratrici di diametro superiore (40-60 cm).

Un problema che si presenta nella misura della  $R^{hh}$  di celle solari o moduli fotovoltaici, è la presenza della griglia. La griglia riflette anch'essa la radiazione incidente, ma non partecipa, se non in maniera molto limitata e indiretta a determinare le proprietà ottiche del dispositivo. Una piccola parte della radiazione riflessa dalla griglia, infatti, viene riflessa indietro dall'interfaccia vetro/aria verso il materiale otticamente attivo e a volte tale riflessione viene massimizzata sagomando opportunamente la griglia. La griglia riflette una parte della radiazione incidente e quindi determina una sovrastima della riflettanza del materiale otticamente attivo della cella (semiconduttore). Nelle misure di riflettanza direzionale/emisferica,  $R^{dh}$ , tale problema può essere facilmente sormontato impiegando fasci incidenti molto collimati, possibilmente di radiazione laser, che vengono inviati soltanto sulla regione che si trova tra due segmenti ("fingers") adiacenti della griglia [3]. Nel caso attuale, però, in cui la radiazione incidente è di tipo diffuso, non è possibile evitare l'illuminazione della griglia. Si possono allora fabbricare "ad hoc" moduli prototipali con celle senza griglia. Il confronto poi con moduli aventi celle solari equivalenti, ma con griglia, potrà mettere in evidenza il contributo dato alla  $R^{hh}$  da parte della griglia stessa. In tutti quei processi tecnologici nei quali il disegno della griglia viene mantenuto costante, pur variando le caratteristiche del materiale attivo della cella, la conoscenza del contributo fisso della griglia potrà

allora consentire di determinare indirettamente, ma precisamente, il valore di  $R^{hh}$  del materiale attivo anche su celle dotate di griglia.

Nella presente invenzione, l'apparato di misura della  $R^{hh}$  è costituito da due sfere integratrici con diametro di 15 cm e di 40 cm. Le due sfere potranno essere usate separatamente, nella configurazione della Figura 1, per le misure sui diversi tipi di materiali e dispositivi fotovoltaici. L'apparato di misura comprende le due sfere integratrici, costruite dalla ditta MACAM Photometrics (Scozia), diverse sorgenti laser He-Ne ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $P = 1\text{-}20 \text{ mW}$ ), sorgenti di luce bianca tipo QTH (Quartz Tungsten Halogen) e ad arco (Xenon o Mercurio) ( $P = 150\text{-}300 \text{ W}$ ), filtri passa-banda di tipo interferenziale, un radiometro multicanale e svariati diodi al silicio calibrati. Gli standards di riflettanza sono forniti dalla Labsphere (USA). La Figura 9 mostra nel dettaglio l'apparato di misura della riflettanza nel caso particolare d'impiego di una sorgente laser. Per la misura su piccoli campioni o singole celle solari, queste verranno direttamente fissate sulla finestra (w2) della sfera da 15 cm di diametro. Trattandosi invece di misure su moduli, questi verranno posizionati su un telaio mobile che verrà accostato al banco ottico su cui si trova la sfera integratrice [3]. La sorgente laser (l) emette un fascio di luce parallelo che viene inviato al divisore di fascio ("beamsplitter") (b). Una parte del fascio viene inviata al rivelatore (r1), che serve a leggere l'intensità del fascio di radiazione incidente, un'altra parte viene inviata, attraversato il diaframma (g), alla porta d'ingresso (w1) della sfera. Il fascio raggiunge poi il diffusore (d), posto in prossimità del centro della sfera, che provvede a distribuire la

radiazione all'interno di essa. Il diffusore è costituito da un disco o cono ricoperto di solfato di bario. L'irradianza all'interno della sfera viene misurata dal rivelatore ( $r_2$ ), posizionato all'interno di un piccolo cilindro che serve a nascondere al rivelatore la zona del diffusore dove incide il fascio primario. Un diffusore semitrasparente ( $t$ ) è posto poi di fronte al rivelatore ( $r_2$ ) allo scopo di eliminare qualsiasi riflesso accidentale. Un radiometro multicanale ( $r_a$ ) raccoglie i segnali contemporanei dei due rivelatori ed eventualmente ne effettua il rapporto, in modo da avere così il segnale dell'irradianza nella sfera normalizzato rispetto all'intensità del fascio primario. Sulla finestra ( $w_2$ ) vengono dapprima posizionati gli standards di riflettanza, scelti tra quelli di un set completo fornito dalla Labsphere (2%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 99%) in modo da coprire adeguatamente il range di valori di  $R^{hh}$  entro il quale è aspettato il valore del campione. Nel caso di un modulo fotovoltaico al Si cristallino di recente fabbricazione, ad esempio, si aspettano valori di  $R^{hh}$  intorno al 4-10 %. Gli standard usati in questo caso sono allora: 2%, 5%, 10%, 20%, 40%. Successivamente viene misurato il campione prendendo un minimo di cinque letture consecutive. Questa stessa sequenza viene poi ripetuta quattro-cinque volte. Per ognuna delle serie di misure si traccia poi una curva di irradianza/riflettanza dalla quale si ricava, per interpolazione, il valore di riflettanza del campione. Alla fine si estrae il valore medio della riflettanza, col suo errore. La Figura 7 mostra una tipica curva di irradianza/riflettanza, ottenuta con le misure su cinque standards. Essa è stata ottenuta imponendo, come funzione interpolatrice, un polinomio di secondo grado. I punti, infatti,

non si posizionano mai su una retta, se non per piccole variazioni di riflettanza, e polinomi di grado superiore non migliorano lo scarto quadratico medio.

Nella Figura 9, la finestra ( $w_2$ ) è di forma circolare, ma può essere modificata, all'occorrenza, mediante l'uso di una maschera, per adattarla alla particolare configurazione del campione. Nel caso di celle solari con griglia, ad esempio, è necessario evitare di affacciare alla sfera la regione di contatto denominata "bus bar", altamente riflettente (vedi Figura 10). In tal caso la maschera viene sagomata in forma rettangolare per poter esporre alla radiazione soltanto la regione della cella compresa tra i due "bus bars". L'uso dell'oblò (o) è in questi casi molto utile per poter posizionare correttamente il campione sulla finestra ( $w_2$ ).

Nella Figura 9 è stata mostrata una sorgente laser, ma in realtà si potrà operare con sorgenti in luce bianca per simulare il comportamento del campione alla radiazione solare reale. In tal caso è conveniente operare con una lampada ad arco (Xenon) il cui spettro riproduce abbastanza fedelmente quello della radiazione solare. Impiegando una lampada ad arco, lo schema di Figura 9 cambia sensibilmente, perché occorre inserire un'ottica di focalizzazione del fascio uscente dalla lampada, ma il principio di funzionamento rimane lo stesso (vedi Figura 11). Per misure spettrali, verrà interposto un filtro passa-banda (f) sul fascio primario o, in alternativa, si impiegherà un monocromatore. Operando secondo lo schema di Figura 11, in cui il fascio di luce non è così altamente collimato come in un laser, sarà

necessario accertarsi che detto fascio sia tutto compreso all'interno del diffusore (d) ed inoltre non colpisca la finestra di ingresso ( $w_1$ ). In caso contrario, infatti, si manifesteranno effetti d'ombra che renderanno disomogenea la radiazione diffusa all'interno della sfera.

Sono state effettuate misure di  $R^{hh}(\lambda)$  a 633 nm su moduli fotovoltaici prototipali Eurosolare. E' stato realizzato, a tal fine, un modulo (ES18G) contenente complessivamente 18 celle tra monocristalline e policristalline. Tutte le celle sono provviste di griglia, ma non collegate tra loro. Le celle policristalline sono state realizzate con diversi tipi di strato antiriflesso (ARC), che conferiscono alle celle una particolare colorazione (blu, giallo, verde, violetto). Questo tipo di celle è particolarmente richiesto, per motivi estetici, nelle applicazioni fotovoltaiche su edifici. Un modulo prototipale simile, ma con tutte le celle prive di griglia (ES18GL), è stato costruito per le misure dirette di  $R^{hh}(\lambda)$  sul materiale otticamente attivo (semiconduttore).

La Figura 12 mostra i risultati di  $R^{hh}(633)$  ottenuti sulle diverse celle del modulo ES18GL. La cella monocristallina mostra i valori più bassi di riflettanza alla luce rossa. Le celle policristalline presentano una riflettanza diversificata in funzione della loro colorazione. Celle policristalline dello stesso colore mostrano valori di  $R^{hh}$  con una dispersione significativa, dovuta alla diversità cristallografica tra cella e cella, nonostante esse presentino la stessa colorazione media. Le diversità tra cella e cella dello stesso colore rendono difficile la valutazione dell'effetto della griglia. Questo può essere verificato in Figura 13 nella quale sono messe a confronto celle con griglia e celle

senza griglia per i tipi mono-blu e poli-verde. Come si può notare, per le celle mono l'effetto della griglia è praticamente celato dagli errori di misura o dalle piccole differenze tra cella e cella. Per le celle poli-verde si nota una dispersione significativa di valori e si apprezza un leggero incremento nel valore medio di  $R^{hh}$  (dell'ordine di 0.5-1%) per le celle con griglia. La Figura 14 mostra la riflettanza  $R^{hh}$  misurata sulle celle senza griglia in luce bianca. La dipendenza della riflettanza  $R^{hh}$  dalla tipologia di cella è ora profondamente modificata. Le celle monocristalline continuano ad avere i valori più bassi di  $R^{hh}$ , mediamente intorno al 4%, e quindi a manifestare le più basse perdite ottiche a radiazione diffusa, ma le celle policristalline manifestano una riflettanza sensibilmente più alta e poco sensibile alla colorazione delle celle stesse, con valori intorno al 6 - 9 %. Il metodo di misura qui presentato esamina la riflettanza media di una porzione rilevante di una cella solare. Esso è quindi particolarmente adatto alla caratterizzazione di celle policristalline, in quanto queste hanno proprietà locali molto diverse, sia nell'ambito di una cella che tra celle diverse, e solo un metodo di misura su grande area può avere una sua validità. In mancanza di un metodo "integrale" come quello qui descritto, la caratterizzazione ottica di una cella policristallina con fasci collimati e di piccola sezione (1-10 mm<sup>2</sup> circa) darebbe risultati molto diversi da punto a punto e quindi richiederebbe un numero eccessivo di misure per giungere ad un'informazione media.

Per verificare la precisione di misura ottenuta con il sistema della presente invenzione, la riflettanza emisferica/emisferica delle celle

monocristalline, per  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , è stata anche calcolata a partire dalle misure di riflettanza direzionale/emisferica, secondo quanto stabilito dall'Equazione (1'). La Figura 15 mostra i dati di  $R^{dh}(633, \theta)$  ottenuti per una cella monocristallina del modulo ES18GL [3, 10, 11]. I dati sono stati poi interpolati con un polinomio di 5° e 6° grado dopo aver posto  $R^{dh}(633, 0^\circ) = R^{dh}(633, 10^\circ)$  e  $R^{dh}(633, 90^\circ) = 1.0$ . Il valore di  $R^{hh}(633)$  calcolato a partire dalla (1') è riportato in Tabella 1 e confrontato con quello sperimentale.

Tabella 1. Riflettanza  $R^{hh}(633 \text{ nm})$  di una cella monocristallina del modulo ES18GL. E' riportato il valore sperimentale ottenuto dalla presente invenzione e quello calcolato dalla curva sperimentale di  $R^{dh}(633, \theta)$ .

Campione	$R^{hh}_{sper}(633)$	Note	$R^{hh}_{calc}(633)$	Note
Cella n°2 ES18GL	$4.6 \pm 0.5$	12 misure	3.9	Fit con polinomio di 5° o 6° grado.

L'accordo tra il valore sperimentale e quello calcolato si può considerare accettabile. Alcuni piccoli effetti sperimentali hanno determinato complessivamente una leggera sottostima della  $R^{hh}$  calcolata, ovvero: i) la curva di riflettanza  $R^{dh}(633, \theta)$  è stata ottenuta per un angolo di azimuth per il quale essa risulta più bassa della media [12]; ii) la misura di  $R^{dh}(633, \theta)$  [3], per limitare l'errore di sostituzione, l'effetto che è alla base della presente invenzione e che sottostima lievemente la  $R^{dh}(633, \theta)$ , è stata effettuata con una finestra di piccolo

diametro (3 cm), rispetto a quella di 7.5 cm usata per la misura di  $R_{sper}^{hh}(633)$ . La conseguenza di ciò è stata una maggior quantità di radiazione dispersa fuori della finestra da 3 cm, a causa dell'intrappolamento nell'incapsulante, rispetto a quella dispersa fuori della finestra da 7.5 cm, con la conseguenza finale di una sottostima della  $R^{dh}(633, \theta)$ , e quindi della  $R_{calc}^{hh}(633)$ .

In Figura 16 è mostrato l'apparato completo nella configurazione per le misure di trasmittanza emisferica/emisferica,  $T^{hh}$ , con sorgente di luce laser He-Ne. Il campione (c) è posto tra la finestra (w2) della sfera (s1) e la finestra (w3) della sfera (s2). La finestra (w2) ha un diametro di 7.5 cm, mentre la finestra (w3) ha un diametro di 3 cm. La sfera (s1), ha un diametro di 40 cm, mentre la sfera (s2) ha un diametro di 15 cm. L'irradianza all'interno della sfera (s2) è misurata dal rivelatore (r3). Per evitare che riflessi spuri finiscano sul rivelatore, un deflettore ("baffle") (b) è fissato all'interno di (s2) tra la finestra (w3) ed il rivelatore (r3). Un obliò (o2) serve ad osservare l'interno della (s2). Il rivelatore (r3) è collegato, come gli altri rivelatori, al radiometro multicanale (ra).

Per le misure di  $T^{hh}$  non sono stati impiegati campioni standards. La procedura di misura consiste nel registrare la lettura dei rivelatori (r1), (r2) ed (r3) in corrispondenza alle tre condizioni sperimentali seguenti:

- a) campione opaco,  $T^{hh} = 0\%$ , al posto del campione (c);
- b) assenza di campione,  $T^{hh} = 100\%$ ;
- c) campione tra le finestre (w2) e (w3),  $T^{hh}(x)$ .



In prima approssimazione, la trasmittanza incognita è ricavata dalle sole letture sul rivelatore ( $r_3$ ):

$$Thh(x) = \frac{r_3(x) - r_3(0)}{r_3(100) - r_3(0)} \cdot 100\% \quad (4)$$

dove:

$r_3(0) \equiv$  misura di ( $r_3$ ) nella condizione a);

$r_3(100) \equiv$  misura di ( $r_3$ ) nella condizione b);

$r_3(x) \equiv$  misura di ( $r_3$ ) nella condizione c).

Per tener conto delle eventuali fluttuazioni della sorgente (l), la lettura su ( $r_3$ ) è stata normalizzata a quella su ( $r_1$ ):

$$Thh(x) = \frac{(r_3(x)/r_1(x)) - (r_3(0)/r_1(0))}{(r_3(100)/r_1(100)) - (r_3(0)/r_1(0))} \cdot 100\% \quad (4')$$

Il valore di trasmittanza ricavato dalla (4') non corrisponde esattamente alla trasmittanza vera, ma se ne discosta più o meno a seconda delle particolari condizioni sperimentali, come è discusso in Appendice C. Dallo studio effettuato, si trova che le condizioni più favorevoli per una misura precisa della trasmittanza sono qui riassunte:

- 1) campione ad alta trasmissività;
- 2) finestra ( $w_3$ ) piccola rispetto alla superficie della sfera ( $s_1$ );
- 3) sfera ( $s_2$ ) poco riflettente o con molte perdite ottiche attraverso le finestre.

In Appendice C è anche discusso come ricavare l'errore sulla trasmittanza sperimentale quando le condizioni sopraelencate non siano soddisfatte.

Misure di  $T^{hh}$  sono state effettuate su campioni di TCO/vetro, impiegati nella tecnologia dei moduli al silicio amorfo, precedentemente caratterizzati con misure di trasmittanza direzionale/emisferica, in luce laser,  $T^{dh}(\lambda, \theta)$ . I campioni presentano un diverso grado di rugosità ("haze") dello strato di TCO (Ossido Trasparente e Conduttore): 6%, 10%, 20%, e sono denominati, rispettivamente: TCOG06, TCOG10, TCOG20. I risultati delle misure di trasmittanza sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2. Trasmittanza  $T^{hh}(633 \text{ nm})$  di campioni di TCO/vetro. Sono riportati i valori sperimentali, ricavati dalla presente invenzione, e quelli calcolati a partire dalla curva sperimentale di  $T^{dh}(633, \theta)$  (vedi Figura 17).

Campione	$T^{hh}_{\text{per}}(633)$	Note	$T^{hh}_{\text{calc}}(633)$	Note
TCOG06	77.5	12 misure	73.1	Punti sperimentali ogni 5°. Fit con polinomio di 8° grado.
TCOG10	74.9	"	69.5	
TCOG20	76.8	"	72.0	

La trasmittanza  $T^{hh}$  non mostra una sensibile dipendenza dal valore di "haze", per questa lunghezza d'onda, perché i valori di  $T^{hh}_{\text{per}}(633)$  trovati si equivalgono entro il 3%. La trasmittanza emisferica/emisferica,  $T^{hh}$ , come avveniva per la riflettanza, è definita.

come l'integrale della corrispondente trasmittanza direzionale/emisferica,  $T^{dh}$ . Possiamo quindi scrivere:

$$Thh(\lambda) = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta T^{dh}(\lambda, \vartheta, \varphi)}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta} = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta T^{dh}(\lambda, \vartheta, \varphi) \right] \quad (5)$$

$$Thh(s) = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta T^{dh}(s, \vartheta, \varphi)}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta} = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta T^{dh}(s, \vartheta, \varphi) \right] \quad (6)$$

dove:

$$T^{dh}(s, \vartheta, \varphi) = \frac{\int_S d\lambda \cdot G(\lambda) \cdot T^{dh}(\lambda, \vartheta, \varphi)}{\int_S d\lambda \cdot G(\lambda)} \quad (7)$$

Per un campione isotropo, ovvero con  $T^{dh}$  indipendente da  $\varphi$ , le equazioni (5) e (6) diventano, rispettivamente:

$$Thh(\lambda) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot T^{dh}(\lambda, \vartheta) \quad (8)$$

$$Thh(s) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot T^{dh}(s, \vartheta) \quad (9)$$

Dove:

$$T^{dh}(s) = \frac{\int_S d\lambda \cdot G(\lambda) \cdot T^{dh}(\lambda)}{\int_S d\lambda \cdot G(\lambda)} \quad (10)$$

$$Thh(s) = \frac{\int_S d\lambda \cdot G(\lambda) \cdot Thh(\lambda)}{\int_S d\lambda \cdot G(\lambda)} \quad (11)$$

I valori di trasmittanza emisferica/emisferica,  $T_{calc}^{hh}(633)$ , calcolati a partire da quelli sperimentali di trasmittanza direzionale/emisferica,  $T^{dh}(633, \theta)$ , sono riportati, per confronto, in Tabella 2. L'accordo tra dati sperimentali e dati calcolati è buono, essendo la differenza intorno al 5%. I dati calcolati di trasmittanza risentono della linearizzazione della curva di  $T^{dh}(633, \theta)$  fatta dopo i  $70^\circ$  a causa della mancanza di punti sperimentali.

In conclusione, è stato presentato un apparecchio ed un metodo relativo che consentono di misurare in maniera semplice, diretta e non distruttiva, la riflettanza o la trasmittanza emisferica/emisferica di un qualsiasi campione piano. L'applicazione di questo metodo alla caratterizzazione ottica di materiali e dispositivi fotovoltaici risulta particolarmente utile, in quanto fornisce la perdita ottica del campione sotto irraggiamento diffuso, ovvero nelle condizioni che simulano al meglio quelle operative sotto irraggiamento solare. Per ottenere risultati equivalenti con metodi tradizionali, sarebbero richieste decine e decine di misure di riflettanza direzionale/emisferica e programmi di calcolo numerico. Il metodo presentato, inoltre, risulta oltremodo efficace nella caratterizzazione ottica di campioni al silicio policristallino, fortemente disomogenei, in quanto intrinsecamente prevede l'illuminazione di grosse regioni del campione, fornendo così valori medi di riflettanza, difficilmente accessibili con le tecniche tradizionali.

## APPENDICE A

Si dimostra che un campione affacciato ad una finestra praticata sulla superficie di una sfera integratrice viene irradiato con una radiazione diffusa equivalente a quella solare esterna, approssimata come isotropa, e caratterizzata da una radianza costante.

Sia un campione posto sul piano orizzontale e irradiato dalla radiazione diffusa, supposta isotropa, proveniente dalla volta celeste. Si Immagini la volta celeste come la superficie di una grande semisfera (rispetto alle dimensioni del campione), illuminata omogeneamente al suo interno (Figura 18). La radianza di una tale sorgente di radiazione diffusa, ovvero l'irradianza prodotta dalla radiazione, compresa nell'angolo unitario orientato nella direzione generica  $\theta$ , su una superficie posta ortogonalmente alla direzione OP, è costante al variare dell'angolo  $\theta$ . Ne segue che l'irradianza prodotta sul campione, mantenuto sul piano orizzontale, dall'angolo solido unitario orientato nella direzione  $\theta$ , diminuisce con  $\theta$ , secondo la funzione  $\cos \theta$ . La sorgente di radiazione diffusa suddetta viene detta sorgente "Lambertiana".

Si consideri ora il caso generale di una parete illuminata (s) che circonda il campione (c), centrato sul punto (O) (vedi Figura 19). Si consideri l'irradianza incidente in (O), cioè la potenza per unità di superficie che arriva sul campione (c). La Figura 19 mostra, per semplicità, soltanto una sezione della superficie irradiante, ortogonale alla superficie del campione. Tale sezione sarà individuata da un particolare valore dell'angolo di azimuth  $\phi$ . Cambiando l'angolo  $\phi$  il

piano ortogonale ruoterà attorno all'asse z e le stesse considerazioni potranno essere applicate al nuovo valore di azimuth. L'irradianza prodotta in (O) dall'elemento di superficie  $\Delta s$ , irradiante dal punto (P), è espressa dalla relazione seguente:

$$G(\theta, \phi) = \cos t \cdot I_0 \cdot \frac{\Delta s \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta}{r^2} \quad [W/m^2] \quad (A1)$$

$$G(\vartheta, \varphi) = \cos t \cdot I_0 \cdot \frac{\Delta s \cdot \cos \psi \cdot r \cos \vartheta}{r^2} \quad [W/m^2] \quad (A1)$$

dove:  $I_0$  è l'intensità della radiazione emessa (o riflessa) dalla superficie unitaria della parete illuminata (s),  $r$  è il vettore che unisce i punti (O) e (P) e  $\psi$  è l'angolo formato dal vettore  $r$  e dalla normale alla superficie del ricevitore (c).  $I_0$ ,  $\psi$  ed  $r$  sono funzioni degli angoli  $\theta$  e  $\phi$ , che definiscono un punto sulla superficie (s). Essendo inoltre:

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta s \cdot \cos \psi}{r^2} \quad [W/m^2] \quad (A2)$$

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta s \cdot \cos \psi}{r^2} \quad [sr] \quad (A2)$$

l'angolo solido entro il quale il punto (O) vede l'elemento di superficie  $\Delta s$ , possiamo scrivere:

$$G(\theta, \phi) = \cos t \cdot I_0(\theta, \phi) \cdot \Delta\Omega(\theta, \phi) \cdot \cos \theta \quad [W/m^2]^2 \quad (A1')$$

La "radianza" sul punto (O) corrisponde all'irradianza  $G(\theta, \phi)$  quando il ricevitore di luce è collimato con la sorgente ( $\cos \theta = 1$ ) e l'angolo solido è unitario ( $\Delta\Omega = 1$ ):

$$L(\theta, \phi) = \cos t \cdot I_0(\theta, \phi) \quad [W/m^2 \cdot sr] \quad (A3)$$

Se la luce emessa dalla parete illuminata è omogenea, abbiamo  $I_0(\theta, \phi) = \cos t$  e quindi:

$$L(\theta, \phi) = \cos t \quad [W/m^2 \cdot sr] \quad (A3)$$

da cui si ricava che un campione (c), affacciato ad una parete omogeneamente illuminata che lo circonda per un angolo solido di  $2\pi$  sr, è irradiato con radianza costante. In maniera del tutto equivalente,

un campione (c), affacciato alla parete illuminata di una sfera integratrice, all'interno della quale la distribuzione della radiazione sia omogenea, è irradiato con radianza costante, indipendentemente dalla sua posizione ed orientazione rispetto alla parete interna della sfera. L'Equazione (A3') dice naturalmente che la "forma" della superficie illuminata è irrilevante, quando essa irradia in maniera omogenea.

## APPENDICE B

Si dimostra che le riflettanze emisferica/emisferica  $R^{hh}(\lambda)$  e  $R^{hh}(s)$  di un diffusore ideale corrispondono alle riflettanze direzionale/emisferica  $R^{dh}(\theta, \lambda)$  e  $R^{dh}(\theta, s)$  dello stesso campione. Si riprendano le (1') e (2'):

$$R_{hh}(\lambda) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot R_{dh}(\lambda, \vartheta) \quad (B1)$$

$$R_{hh}(s) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot R_{dh}(s, \vartheta) \quad (B2)$$

Un diffusore isotropo di radiazione è detto ideale quando soddisfa la legge di Lambert ("Lambert Cosine Law" [13]): "L'intensità luminosa diffusa dall'unità di superficie e su un angolo solido unitario è: a) proporzionale al coseno dell'angolo di incidenza; b) proporzionale al coseno dell'angolo di osservazione. Dalla condizione a) scaturisce che la riflettanza totale direzionale/emisferica  $R^{dh}(\theta, \lambda)$  è costante con l'angolo di incidenza  $\theta$ , ovvero che  $R^{dh}(\theta, \lambda) = R^{dh}(\theta, s) = R^{dh}(\lambda) = \cos \theta$ . Le (B1) e (B2) diventano allora:

$$R_{hh}(\lambda) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot R_{dh}(\theta, \lambda) = 2 \cdot R_{dh}(\theta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} = R_{dh}(\theta, \lambda) \quad (B1')$$

$$R_{hh}(s) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot R_{dh}(\theta, s) = 2 \cdot R_{dh}(\theta, s) \cdot \frac{1}{2} = R_{dh}(\theta, s) \quad (B2')$$

Ipotizzando quindi un comportamento ideale per i diffusori standard della Labsphere, possiamo concludere che i valori di  $R^{dh}(\theta, \lambda)$  riportati nel certificato di calibrazione corrispondono ai valori di riflettanza emisferica/emisferica  $R^{hh}(\lambda)$ .



### APPENDICE C

Analisi degli errori sulle misure di  $T^{hh}$ .

Si consideri lo schema di Figura 16, immaginando inizialmente di togliere la sfera satellite (s2). La radiazione diffusa prodotta all'interno della sfera (s1) illumina il campione (c) posto di fronte alla finestra (w2), attraversandolo in parte e fuoriuscendo verso l'ambiente esterno (supposto oscurato). Sia  $I_1$  l'irradianza sul campione in queste condizioni. La radiazione trasmessa dall'unità di superficie di (c) sarà allora:

$$I_2 = T^{hh} * I_1 \quad (C1)$$

La  $T^{hh}$  è esattamente la trasmittanza che vogliamo determinare. Immaginiamo ora di porre la sfera (s2) di fronte al campione (c) (vedi Figura 16) e di seguire la trasmissione della radiazione avanti e indietro tra le due sfere. Nello schema riportato di seguito, sono mostrati i diversi passi di questo processo. (A):  $I_1$  è l'irradianza sul campione (c). (B): la potenza all'ingresso di (s2) è proporzionale ad  $I_1$  tramite  $T^{hh}$ . (C): Anche l'irradianza all'interno di (s2), e quindi sulla superficie di (c), è proporzionale ad  $I_1$  tramite un coefficiente che chiamiamo  $k_2$ . (D): La radiazione viene quindi ritrasmessa da (s2) ad (s1) tramite il coefficiente  $T^{hh}$  e produrrà un irraggiamento supplementare sul campione (c), che sarà proporzionale, secondo un coefficiente  $k_1$ , alla radiazione trasmessa da (s2) a (s1) e così via. I singoli passaggi di radiazione da una sfera all'altra sono riportati di seguito per ogni singolo step:

Passo				
1	$I_1$	$T^{hh} * I_1$	$k_2 * T^{hh} * I_1$	$k_2 * (T^{hh})^2 * I_1 = I_1^b$
2	$K_1 * I_1^b = I_2$	$T^{hh} * I_2$	$k_2 * T^{hh} * I_2$	$k_2 * (T^{hh})^2 * I_2 = I_2^b$
3	$k_1 * I_2^b = I_3$	$T^{hh} * I_3$	$k_2 * T^{hh} * I_3$	$k_2 * (T^{hh})^2 * I_3 = I_3^b$
...				
N	$k_1 * I_{n-1}^b = I_n$	$T^{hh} * I_n$	$k_2 * T^{hh} * I_n$	$k_2 * (T^{hh})^{n-1} * I_n = I_n^b$
...				
	A	B	C	D

Dopo un numero infinito di passi, ovvero al raggiungimento dello stato stazionario, l'irradianza incidente sul campione dalla parte della sfera (s1) è data dalla somma dei termini della colonna "A" e l'irradianza della radiazione uscente dal campione verso la sfera (s2) è data dalla somma dei termini della colonna "B". La trasmittanza del campione allo stato stazionario (s.s.) è quindi uguale a:

$$T_{ssh} = \frac{T^{hh} \cdot I_1 + T^{hh} \cdot I_2 + T^{hh} \cdot I_3 + \dots + T^{hh} \cdot I_n + \dots}{I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n + \dots} =$$

$$= \frac{\sum_{n=1}^{inf} T^{hh} \cdot I_n}{\sum_{n=1}^{inf} I_n} = T^{hh} \quad (C2)$$

ovvero equivalente alla trasmittanza  $T^{hh}$  definita per il singolo passo, come era da aspettarsi. La misura sperimentale della riflettanza,  $T_{sper}^{hh}$ , viene fatta, invece, misurando l'irradianza all'interno della sfera (s2) attraverso il rivelatore (r3), in corrispondenza alle tre condizioni a), b), c) descritte nel testo subito prima l'Equazione (4):

$$\begin{aligned}
 T_{hsper} &= \frac{r_3(x) - r_3(0)}{r_3(100) - r_3(0)} = \frac{\cos t \cdot k_2 \cdot T_{hh} \cdot \left( \sum_i I_i \right)^x - \cos t \cdot k_2 \cdot T_{hh} \cdot \left( \sum_i I_i \right)^0}{\cos t \cdot k_2 \cdot 1 \cdot \left( \sum_i I_i \right)^{100} - \cos t \cdot k_2 \cdot T_{hh} \cdot \left( \sum_i I_i \right)^0} = \\
 &= T_{hh} \frac{\left( \sum_i I_i \right)^x}{\left( \sum_i I_i \right)^{100}} = \\
 &= T_{hh} \cdot \left[ \frac{\Pi(x) + k_1(x) \cdot k_2(x) \cdot (T_{hh})^2 \cdot \Pi(x) + (k_1(x) \cdot k_2(x))^2 \cdot (T_{hh})^4 \cdot \Pi(x) + \dots}{\Pi(100) + k_1(100) \cdot k_2(100) \cdot \Pi(100) + (k_1(100) \cdot k_2(100))^2 \cdot \Pi(100) + \dots} \right] \\
 & \hspace{15em} (C3)
 \end{aligned}$$

Come si vede, quindi, la misura sperimentale della trasmittanza,  $T_{hsper}^{hh}$ , non corrisponde esattamente al valore cercato,  $T^{hh}$ , ma ne differisce a causa del fattore tra parentesi. Analizziamo questo fattore. Intanto si ha:

$$I_1 + k_1 k_2 (T^{hh})^2 I_1 + (k_1 k_2)^2 (T^{hh})^4 I_1 + \dots = I_1 [1 + (k_1 k_2) (T^{hh})^2 + (k_1 k_2)^2 (T^{hh})^4 + \dots] = I_1 \cdot S \hspace{15em} (C4)$$

dove:  $1/S = 1 - (k_1 k_2) (T^{hh})^2$

La (C3) diventa allora:

$$T_{hsper} = T_{hh} \left[ \frac{\Pi(x) \cdot [1 - k_1(100) \cdot k_2(100)]}{\Pi(100) \cdot [1 - k_1(x) \cdot k_2(x) \cdot (T_{hh})^2]} \right] \hspace{5em} (C5)$$

Semplifichiamo la (C5) ipotizzando che sia:

$$I_1(x) = I_1(100) = I_1$$

$$k_1(x) = k_1(100) = k_1 \hspace{15em} (C6)$$

$$k_2(x) = k_2(100) = k_2$$

Si discuteranno le condizioni (C6) in seguito. La (C5) diventa allora:

$$T_{hsper} = T_{hh} \left[ \frac{1 - k_1 \cdot k_2}{1 - k_1 \cdot k_2 \cdot (T_{hh})^2} \right] \hspace{5em} (C7)$$

La (C7) dice subito che la  $T_{hsper}^{hh}$  si avvicina tanto più al valore vero  $T^{hh}$  quanto più la  $T^{hh}$  è prossima ad 1, ovvero quanto più il

campione è trasparente. In generale, quindi, la misura di  $T^{hh}$  è sottostimata, di una quantità che dipende dai valori (calcolabili) di  $k_1$  e  $k_2$ . Si considerino ora non più valide le condizioni (C6) e quindi si faccia riferimento alla relazione (C5). Per facilitare la discussione, inoltre si supponga che il campione non assorba. Per esso si avrà che:  $T = 1 - R$ . Se si confronta l'irraggiamento nella (s1) quando c'è il campione con quello quando le finestre (w2) e (w3) sono aperte, si aspetta che tale irraggiamento aumenti in presenza del campione. Questo è stato realmente osservato con un campione avente una trasmittanza  $T \approx 75\%$ . Nella sfera (s1) è stato notato un aumento dell'irraggiamento dell'ordine dell' 1% passando dalla finestra (w2) aperta alla finestra (w2) con il campione. Risulta quindi che  $I_1(x) / I_1(100) > 1$  e quindi la  $T^{hh}$  risulta sovrastimata, compensando l'effetto discusso precedentemente. Per quanto riguarda inoltre l'effetto dei coefficienti  $k_1$  e  $k_2$ , ci aspettiamo valori più alti di  $k$  in presenza, che non in assenza, del campione, e quindi:  $k^{(x)} > k^{(100)}$ , ovvero:

$$\left[ \frac{1 - k_1(100) \cdot k_2(100)}{1 - k_1(x) \cdot k_2(x)} \right] > 1 \quad (C8)$$

e quindi ci aspettiamo una sovrastima di  $T^{hh}$  per effetto dei coefficienti  $k_1$  e  $k_2$ .

Dalle (C5) e (C7) notiamo anche che il termine tra parentesi, contenente i coefficienti  $k_1$  e  $k_2$ , diventa prossimo a 1 quando uno dei due coefficienti,  $k_1$  o  $k_2$ , viene reso molto basso. Naturalmente, ridurre  $k_1$  significherebbe ridurre l'irradianza della sfera che produce la radiazione diffusa, quindi non è conveniente. E' allora sufficiente ridurre

$k_2$  , ad esempio usando la sfera piccola (s2) con una bassa riflettività delle pareti. Se  $k_2 \approx 0$  si avrà dalla (C5):

$$T_{sper}^{hh} = T^{hh} * I_1(x) / I_1(100) \quad (C9)$$

Nel caso generale, la  $T^{hh}$  si può ricavare direttamente risolvendo la (C5). Si ottiene l'equazione di 2° grado:

$$T_{hsper} \cdot \Pi(100) \cdot k_1(x) \cdot k_2(x) \cdot (T_{hh})^2 + \Pi(x) \cdot [1 - k_1(100) \cdot k_2(100)] \cdot T_{hh} - T_{hsper} \cdot \Pi(100) = 0 \quad (C11)$$

In conclusione, la misura di  $T^{hh}$ , per essere precisa, richiede che la finestra (w2) sia piccola rispetto alla sfera (s1) e che la sfera (s2) abbia una bassa riflettività interna o molte perdite ottiche. Una maggiore precisione di misura si ottiene, in generale, con campioni ad alta trasparenza.

## RIFERIMENTI

- [1] IEC Standards 891 and 1215, Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève.
- [2] 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"
- [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", Patent It. a.n. RM 97 A 000676, 5 Nov 1997.
- [4] A. Parretta, A. Sarno and P. Tortora, "Apparecchio e Metodo per la Misura Differenziale della Riflettanza di una Superficie", Patent It. a.n. RM99A000656, 25 Oct 1999.
- [5] E.A. Sjerps-Koomen, E.A. Alsema and W.C. Turkenburg, Solar Energy 57(1996)421-432.
- [6] J.R. Meyer-Arendt, "Introduzione all' ottica classica e moderna", Ed. Zanichelli (1976)p.292.
- [7] Sphere Systems and Instrumentation, Labsphere (1977), Catalogue II.
- [8] A. Maccari, M. Montecchi, F. Treppo and M. Zinzi, "CATRAM: An Apparatus for the Optical Characterization of Advanced Transparent Materials", Applied Optics 37(1998)5156-5161.
- [9] G. Kortum, "Reflectance Spectroscopy, Principles, Methods, Applications". Ed. by Springer Verlag, Berlin, 1967, p. 37.

- [10] A. Parretta, A. Sarno and H. Yakubu, "A Novel Apparatus for the Optical Characterization of solar cells and Photovoltaic Modules", paper presented at the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, Austria, 6-10 July 1998. Ed. by European Commission, Joint Research Centre, 1998, p. 2306.
- [11] A. Parretta, A. Sarno and H. Yakubu, "Non-destructive Optical Characterization of Photovoltaic Modules by an Integrating Sphere. Part I: Mono-Si Modules", *Optics Communications*, 161(1999)297-309.
- [12] A. Parretta, A. Sarno, P. Tortora, H. Yakubu, P. Maddalena, J. Zhao, A. Wang, "Angle-dependent Reflectance of Photovoltaic Materials and Solar Cells", *Optics Communications* 172(1999)139-151.
- [13] G. Kortum, "Reflectance Spectroscopy, Principles, Methods, Applications". Ed. by Springer Verlag, Berlin, 1967, p. 28.

## RIVENDICAZIONI

1.- Metodo per la determinazione della riflettanza emisferica/emisferica  $R^{hh}$  di un campione consistente nel sottoporre il campione alla radiazione diffusa di una sfera integratrice e nel misurare la variazione dell'irradianza all'interno della sfera stessa prodotta dalla sostituzione del campione con campioni di riferimento a riflettanza  $R^{hh}$  nota, la riflettanza  $R^{hh}$  del campione essendo ricavata per interpolazione sui dati relativi a detti campioni di riferimento.

2.- Metodo per determinare la trasmittanza emisferica emisferica  $T^{hh}$  di un campione consistente nell'irraggiare il campione con la radiazione diffusa prodotta da una prima sfera integratrice e nel misurare la radiazione trasmessa dal campione stesso in una seconda sfera integratrice (sfera satellite), il valore della trasmittanza  $T^{hh}$  del campione essendo ottenuta per confronto di tale misura con quella ottenuta a mezzo di campioni di riferimento a trasmittanza  $T^{hh}$  nota.

3.- Apparato combinato per eseguire misure di riflettanza/trasmittanza emisferica/emisferica  $R^{hh} / T^{hh}$  comprendente una sorgente di luce (l); una sfera integratrice (s;s1) a cui è connesso un primo fotodiodo di misura (f1) collegabile ad un radiometro multicanale (ra), detta sfera integratrice (s;s1) avendo un diffusore di luce interno (d), una prima finestra di ingresso (w1), un oblò (o) che serve ad osservare l'interno della sfera ed una seconda finestra (w2) di interfacciamento con una sfera supplementare (s2) di dimensioni più piccole di quelle della sfera integratrice (s;s1), a cui è connesso un secondo fotodiodo di misura (f2) collegabile a detto radiometro



multicanale (ra), detta sfera supplementare (s2) essendo anche fornita di un oblò (o2) che serve a traguardare all' interno di essa.

4.- Apparato secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che, per la misura della riflettanza emisferica/emisferica  $R^{hh}$  per piccoli o grandi campioni, esso è configurato in modo da comprendere: detta sorgente di luce (l), detta sfera integratrice (s), detto primo fotodiode di misura (f1) collegato a detto radiometro multicanale (ra), disposti in modo che il fascio di luce parallelo proveniente dalla sorgente (l) entri nella sfera attraverso detta prima finestra di ingresso (w1) e venga diffuso al suo interno da detto diffusore (d), una porzione della superficie del campione (c) che deve essere sottoposto alla misura essendo affacciata a detta seconda finestra (w2) di detta sfera integratrice (s) in modo che venga irraggiata da una radiazione diffusa con distribuzione angolare di tipo lambertiano; detto oblò (o) che serve ad osservare l' interno della sfera integratrice (s) servendo anche a posizionare correttamente il campione, mentre detto primo fotodiode (f), collegato con il radiometro (ra), serve a misurare l' irradianza all' interno della sfera.

5.- Apparato secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che, per la misura della trasmittanza emisferica/emisferica  $T^{hh}$  per piccoli o grandi campioni, esso è configurato in modo da comprendere: detta sorgente di luce (l) e detta sfera integratrice (s1) disposte in modo che il fascio di luce parallelo proveniente dalla sorgente (l) entri nella sfera attraverso detta prima finestra di ingresso (w1) e venga diffuso al suo interno da detto diffusore (d), una porzione della

superficie del campione (c) che deve essere sottoposto alla misura essendo disposta nell'interfaccia tra detta sfera integratrice (s1) e detta sfera supplementare (s2), in modo che la radiazione diffusa prodotta nella sfera integratrice (s1) e misurata da detto primo fotodiodo (f1) irraggi in modo lambertiano il campione (c) e tutta la radiazione trasmessa da detto campione (c) venga raccolta dalla sfera supplementare (s2) attraverso detta seconda finestra (w2) e venga misurata con detto secondo fotodiodo (f2) collegato a detto radiometro multicanale (ra).

6.- Apparato combinato per eseguire misure di riflettanza/trasmittanza emisferica/emisferica  $R^{hh} / T^{hh}$  per piccoli o grandi campioni secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che detta sorgente di luce (l) è una sorgente laser e detto apparato comprende ulteriormente un divisore di fascio (b), che divide il fascio in una prima porzione, che viene inviata ad un primo rivelatore esterno (r1), il quale legge l'intensità del fascio di radiazione incidente ed è collegato a detto radiometro multicanale (ra), ed una seconda porzione che viene inviata, attraverso un diaframma (g), alla finestra di ingresso (w1) della sfera integratrice (s) per incidere su detto diffusore (d).

7.- Apparato secondo la rivendicazione 6, caratterizzato dal fatto che, per misure di riflettanza, l'irradianza all'interno della sfera integratrice (s) viene misurata a mezzo di un secondo rivelatore (r2) posizionato all'interno di un piccolo cilindro di schermo e fornito di un diffusore semitrasparente (t) per eliminare i riflessi accidentali, anch'esso collegato a detto radiometro multicanale (ra).

8.- Apparato secondo la rivendicazione 6, caratterizzato dal fatto che, per misure di trasmittanza, detta sfera supplementare (s2) è fornita di un terzo rivelatore (r3), collegato a detto radiometro multicanale (ra) ed internamente schermato a mezzo di un deflettore (df) interposto fra il rivelatore (r3) e la finestra (w3) di interfacciamento fra la sfera supplementare (s2) e la sfera integratrice (s1).

9.- Apparato secondo la rivendicazione 7, caratterizzato dal fatto che detto radiometro multicanale (ra) raccoglie i segnali contemporanei di detti primo e secondo rivelatore (r1,r2) e ne effettua eventualmente il rapporto in modo da avere il segnale dell'irradianza della sfera normalizzato rispetto all'intensità del fascio primario.

10.- Apparato secondo la rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che detto radiometro multicanale (ra) raccoglie i segnali contemporanei di detti primo e terzo rivelatore (r1, r3) e ne effettua eventualmente il rapporto in modo da avere il segnale dell'irradianza della sfera supplementare (s2) normalizzato rispetto all'intensità del fascio primario.

11.- Apparato secondo la rivendicazione 7, caratterizzato dal fatto che detto diffusore (d) è costituito da un disco o cono ricoperto di solfato di bario.

12.- Apparato secondo la rivendicazione 7, caratterizzato dal fatto che la finestra di misura (w2) di detta sfera integratrice (s) è di forma circolare, eventualmente modificabile con l'uso di una maschera per adattarla alla configurazione del campione.

13.- Apparato secondo la rivendicazione 12, caratterizzato dal fatto che, nel caso di celle solari con griglia, detta maschera è di forma rettangolare, atta a schermare le regioni di contatto (bus bars) delle celle.

14.- Apparato secondo la rivendicazione 4 per la misura della riflettanza emisferica/emisferica  $R^{hh}$  per piccoli o grandi campioni, caratterizzato dal fatto che detta sorgente di luce (l) è una sorgente di luce bianca, in particolare una lampada ad arco (xenon) e detto apparato comprende una ottica di focalizzazione del fascio uscente dalla lampada.

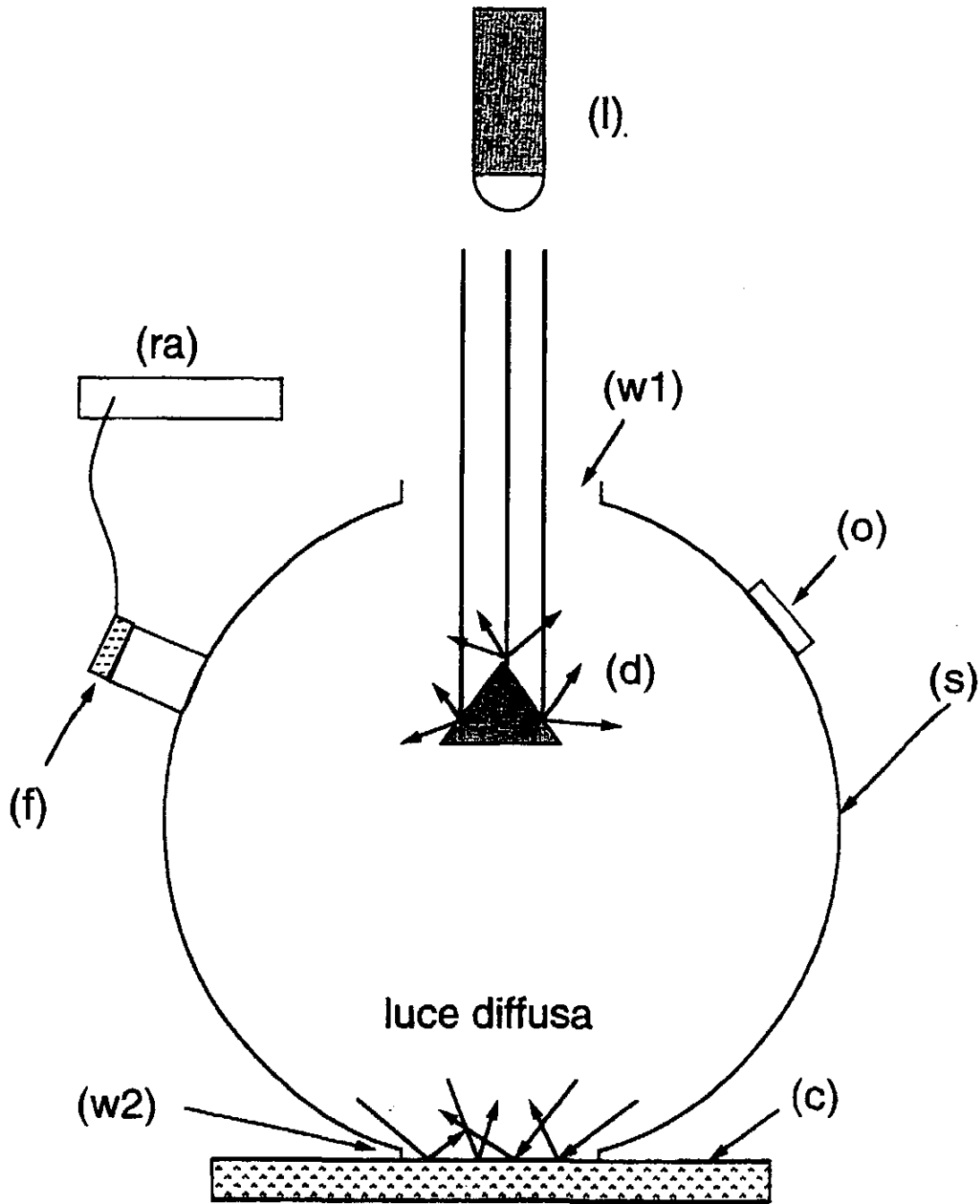
15.- Apparato secondo la rivendicazione 14, caratterizzato dal fatto che, per misure spettrali, sul fascio primario viene interposto un filtro passa-banda (f) oppure viene alternativamente impiegato un monocromatore.

16.- Apparato secondo una qualsiasi delle precedenti rivendicazioni, caratterizzato dal fatto che il diffusore (d) disposto all'interno della sfera integratrice ha dimensioni minime per non interferire con l'integrazione della radiazione.

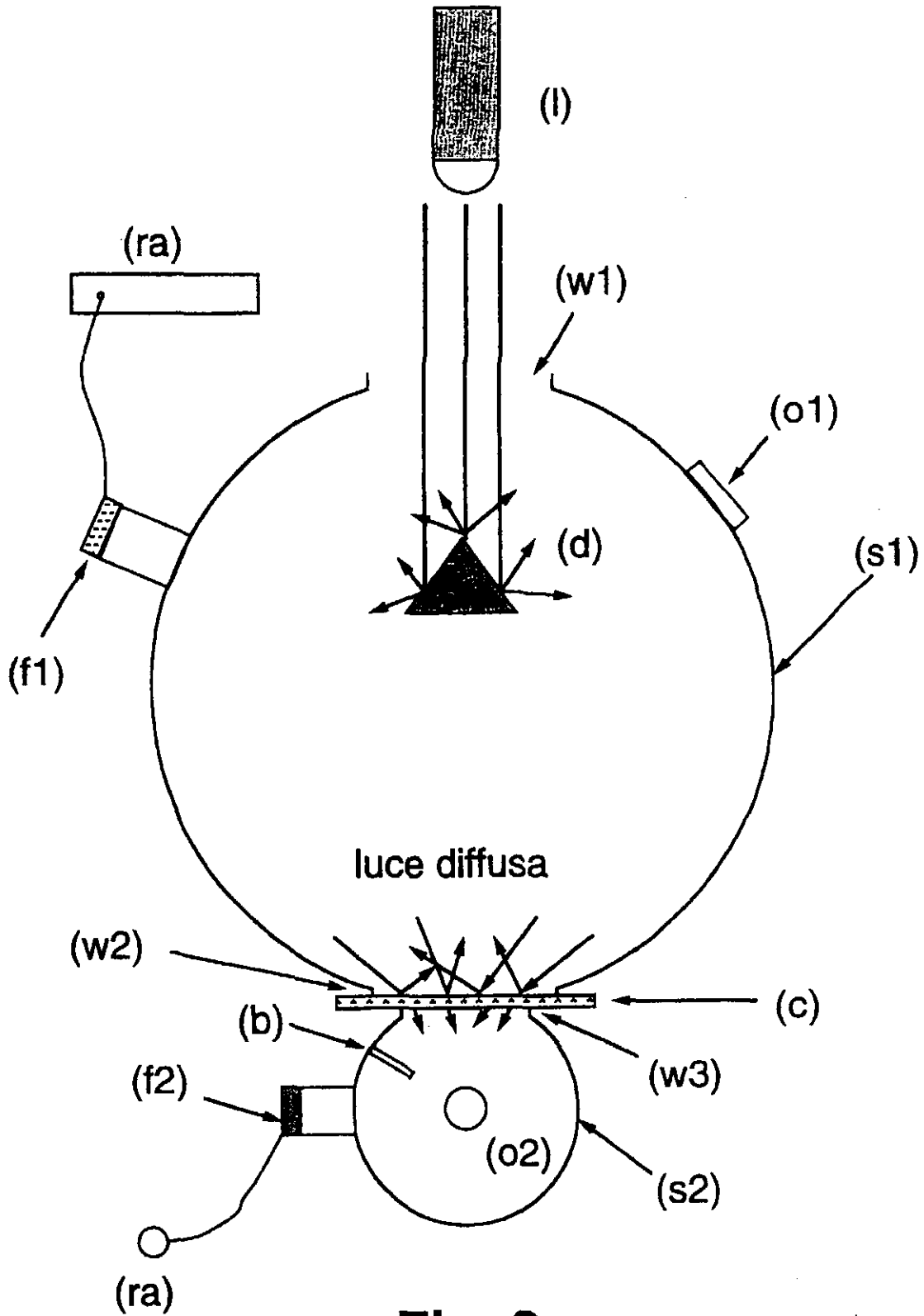
17.- Apparato secondo una qualsiasi delle precedenti rivendicazioni, caratterizzato dal fatto che il dimensionamento delle sfere è effettuato in dipendenza dalle dimensioni dei campioni da sottoporre alla misura.

Roma, - 1 DIC. 2000

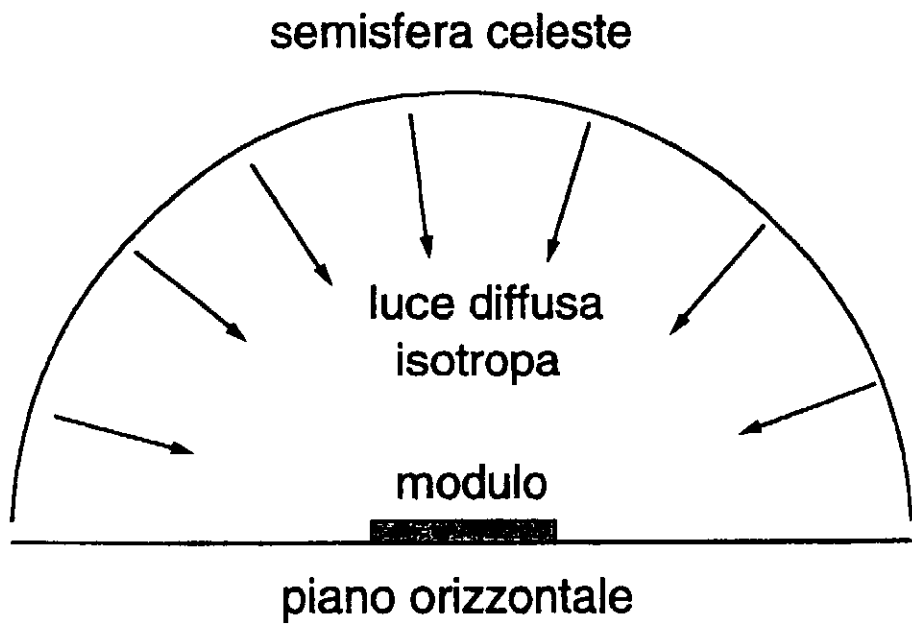
p.p.: i) ENEA – ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE e ii) EUROSOLARE S.r.l. TA



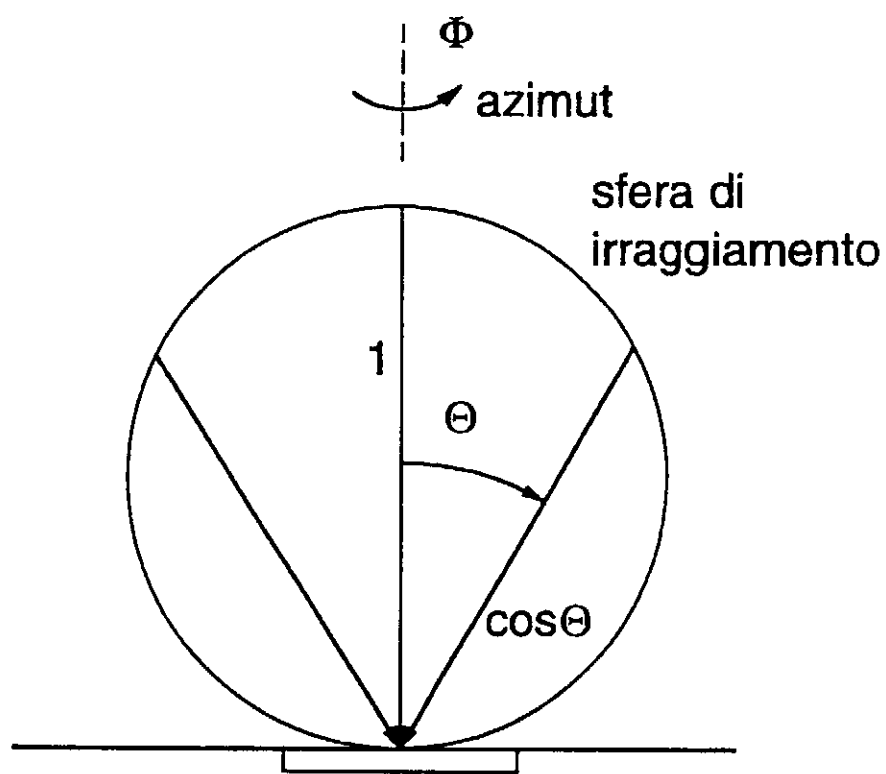
**Fig. 1**



**Fig. 2**

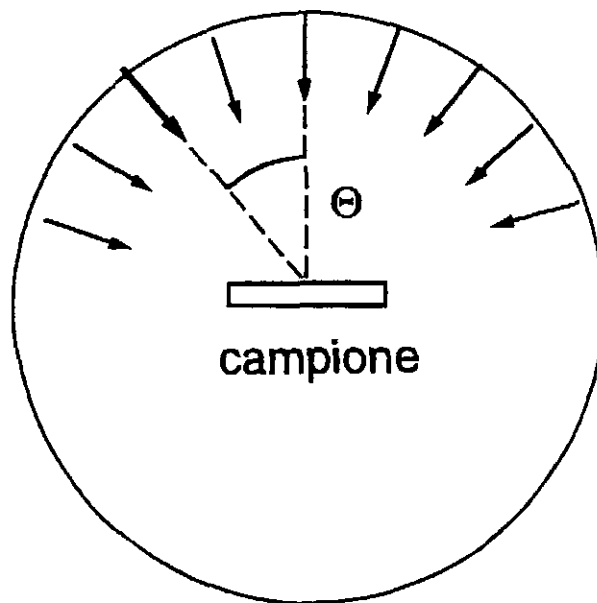


**Fig. 3a**



**Fig. 3b**

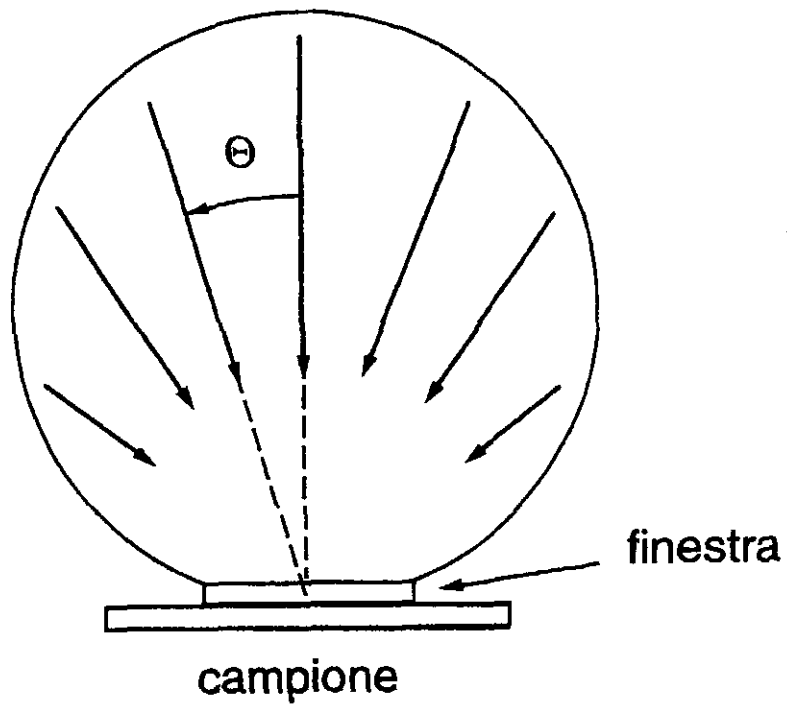




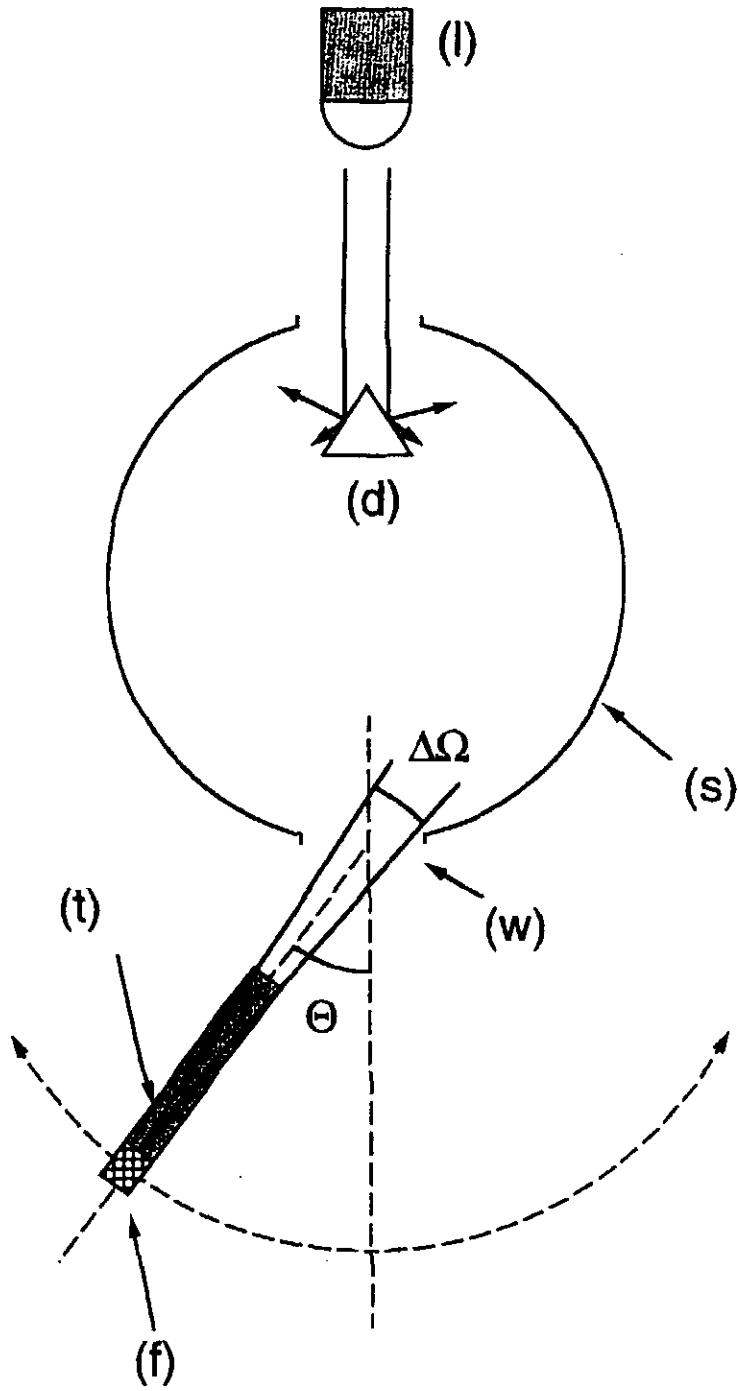
sfera integratrice

**Fig. 4a**

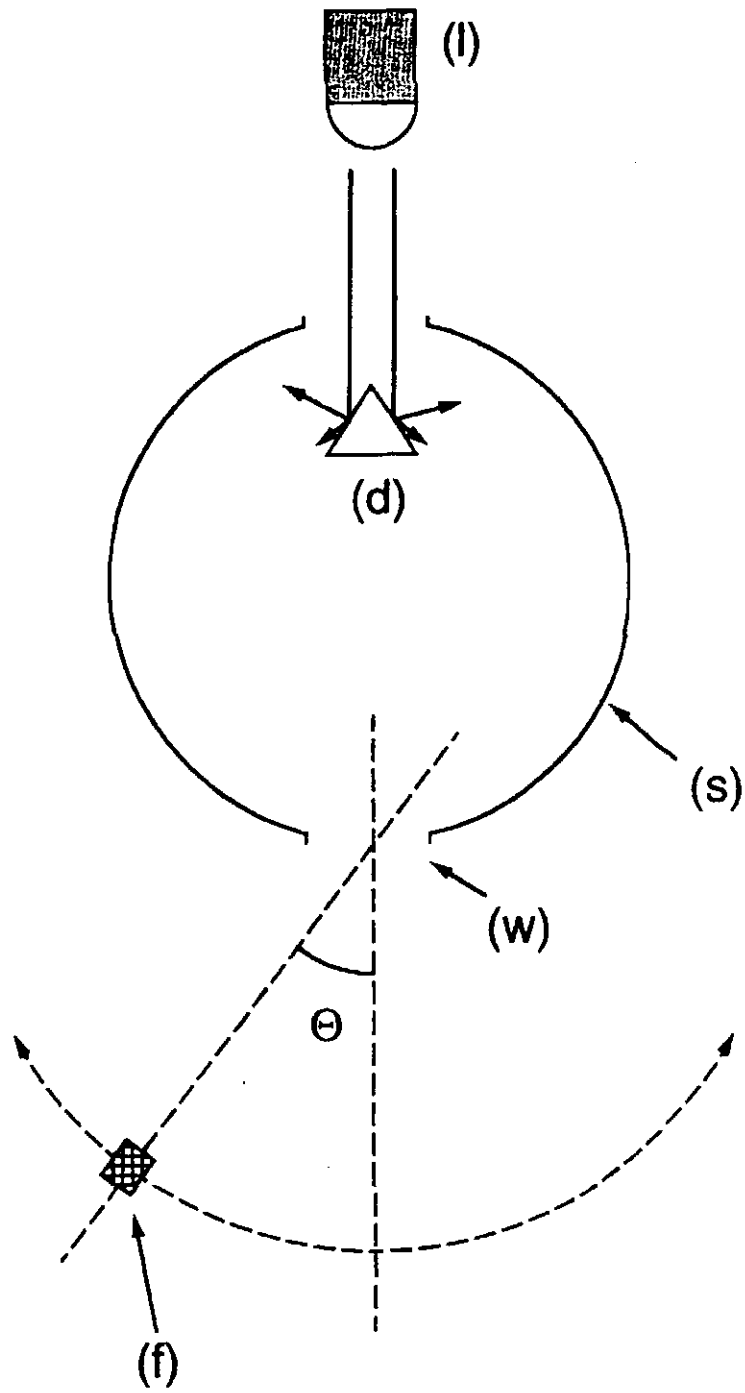
sfera integratrice



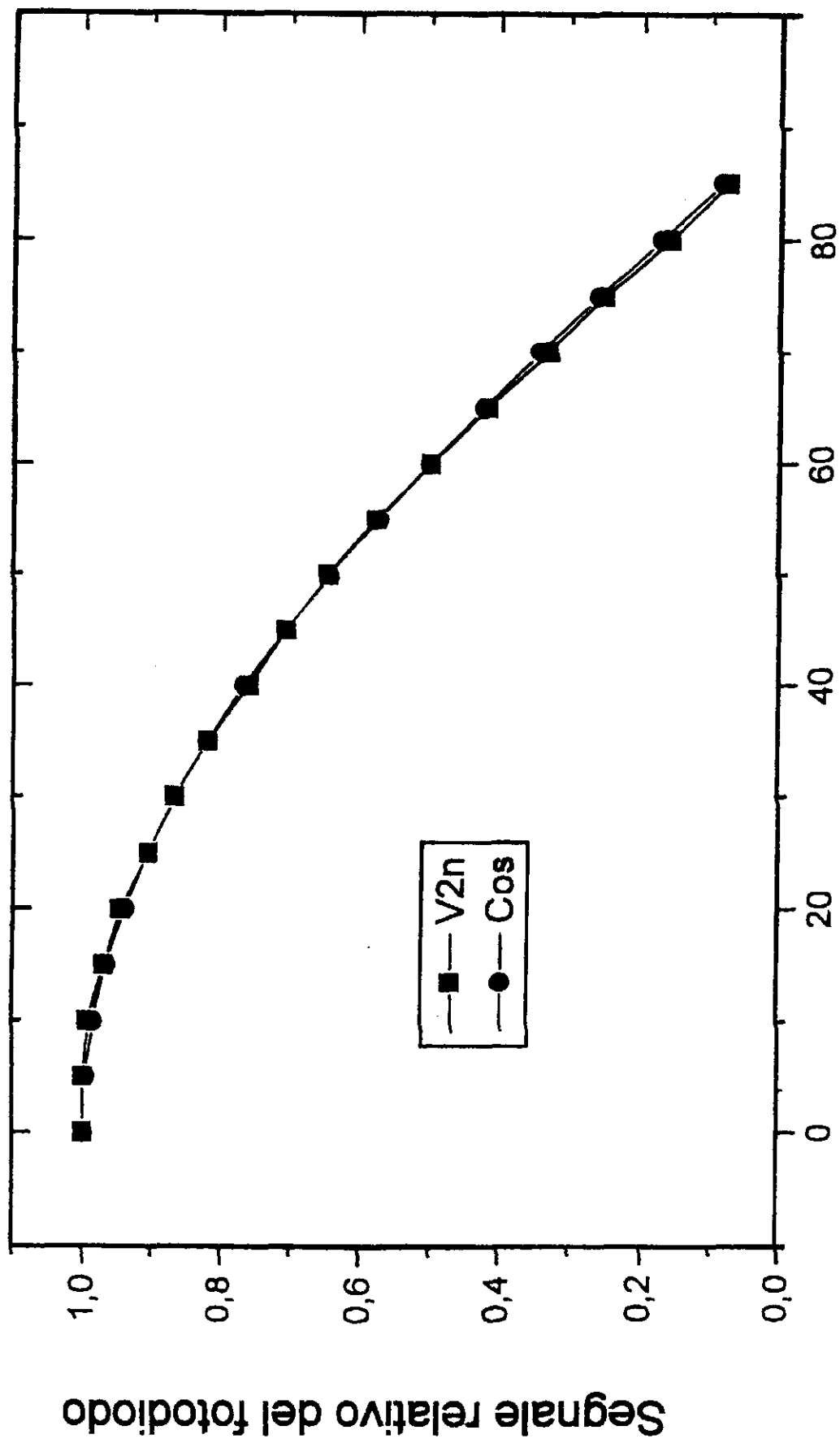
**Fig. 4b**



**Fig. 5a**

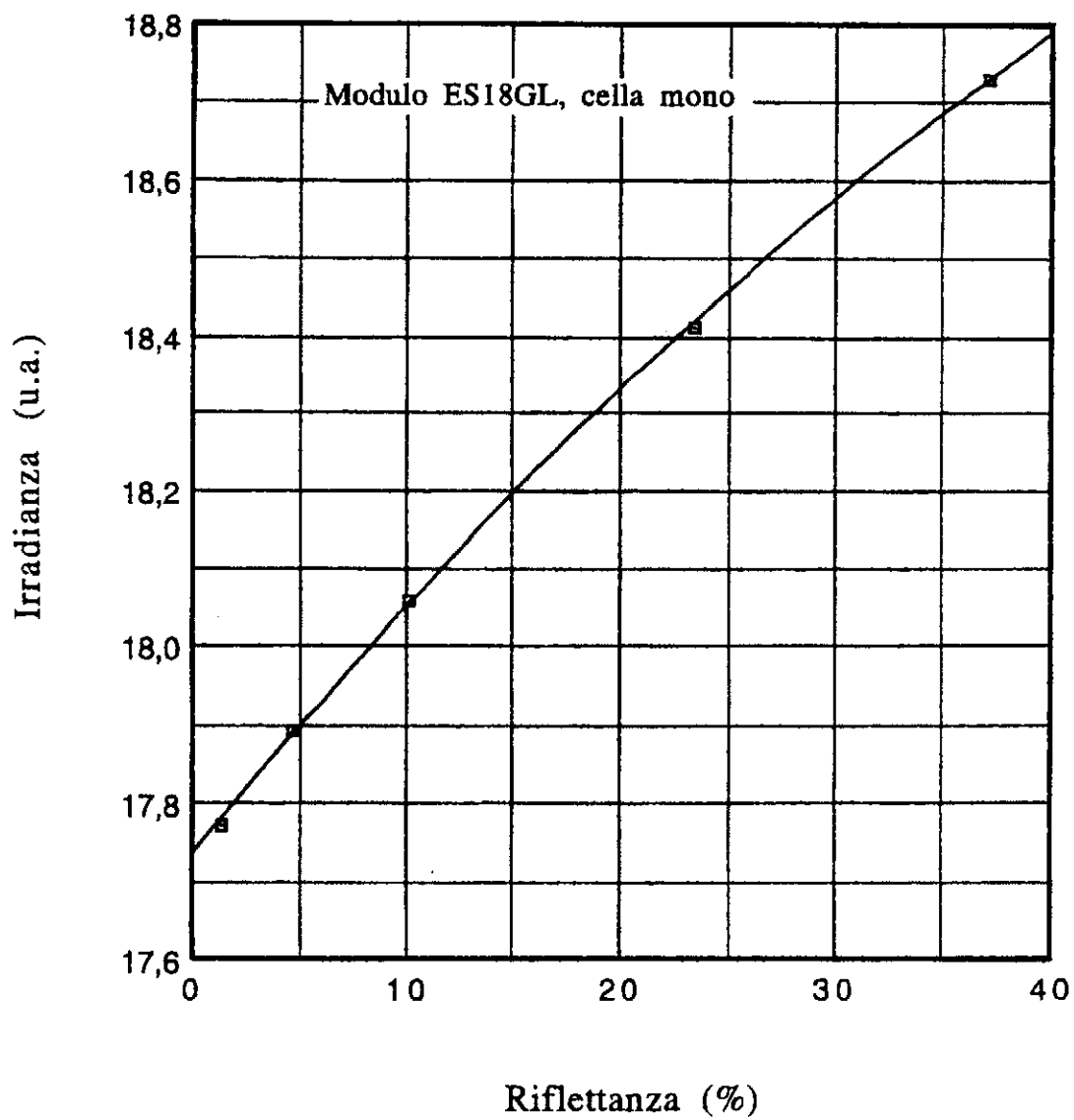


**Fig. 5b**

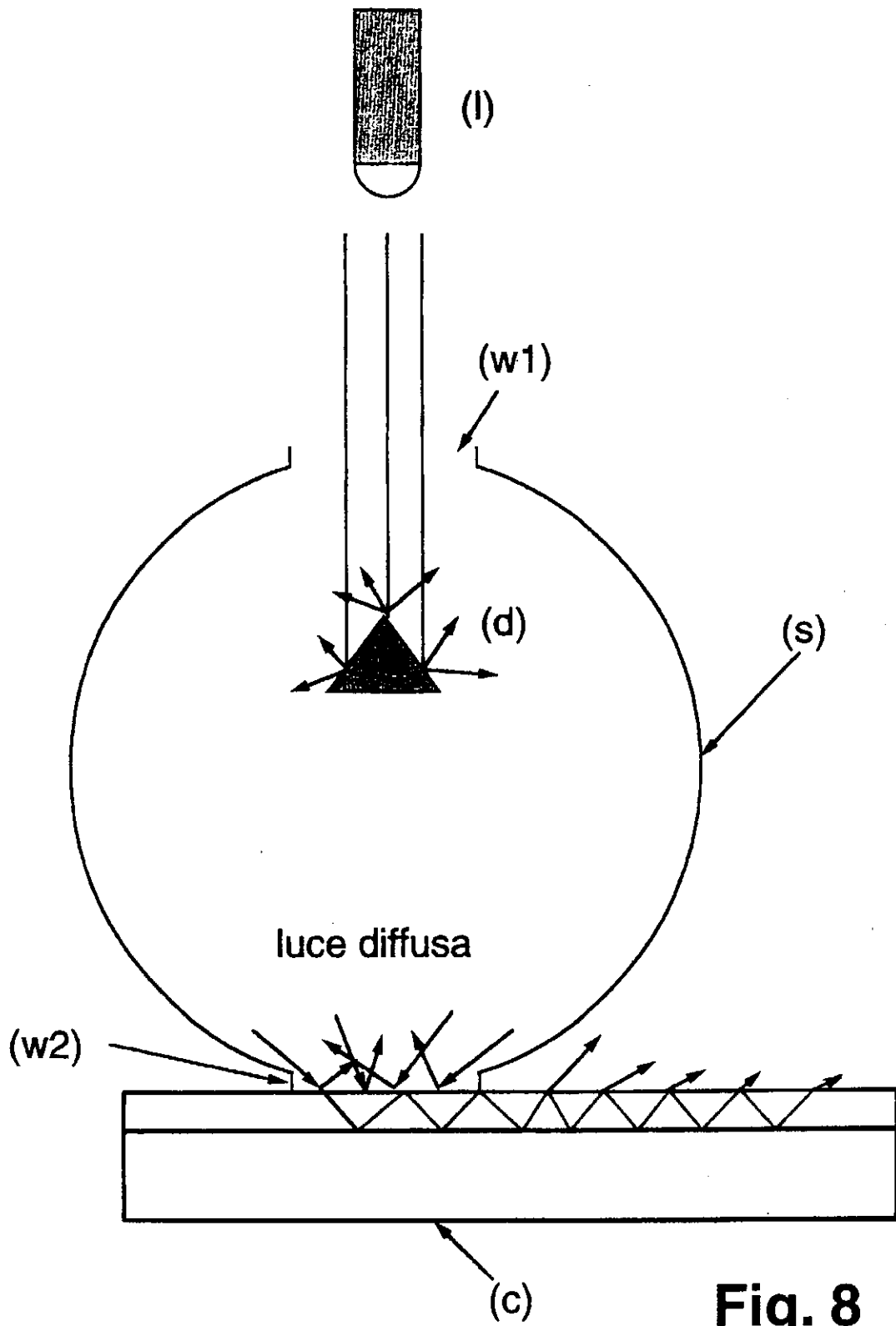


Angolo di incidenza (°)

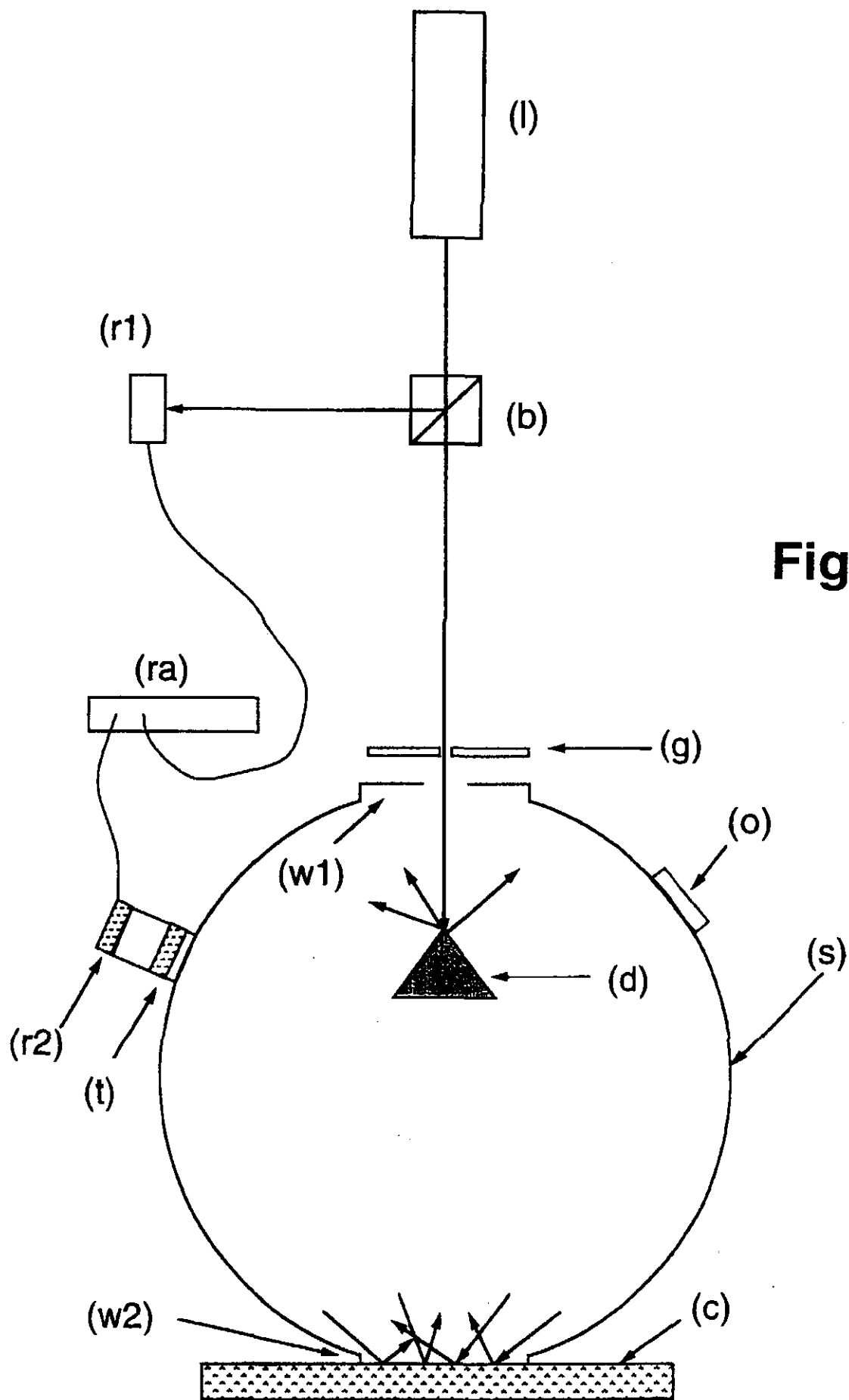
Fig. 6



**Fig. 7**

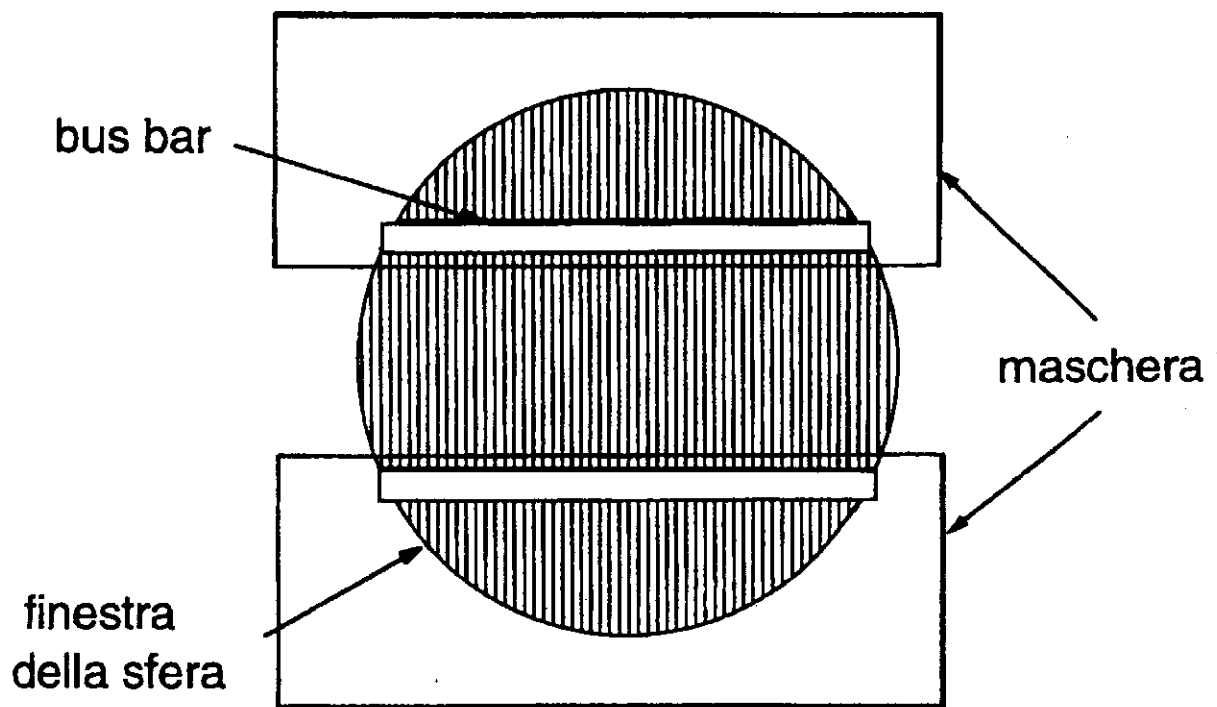


**Fig. 8**

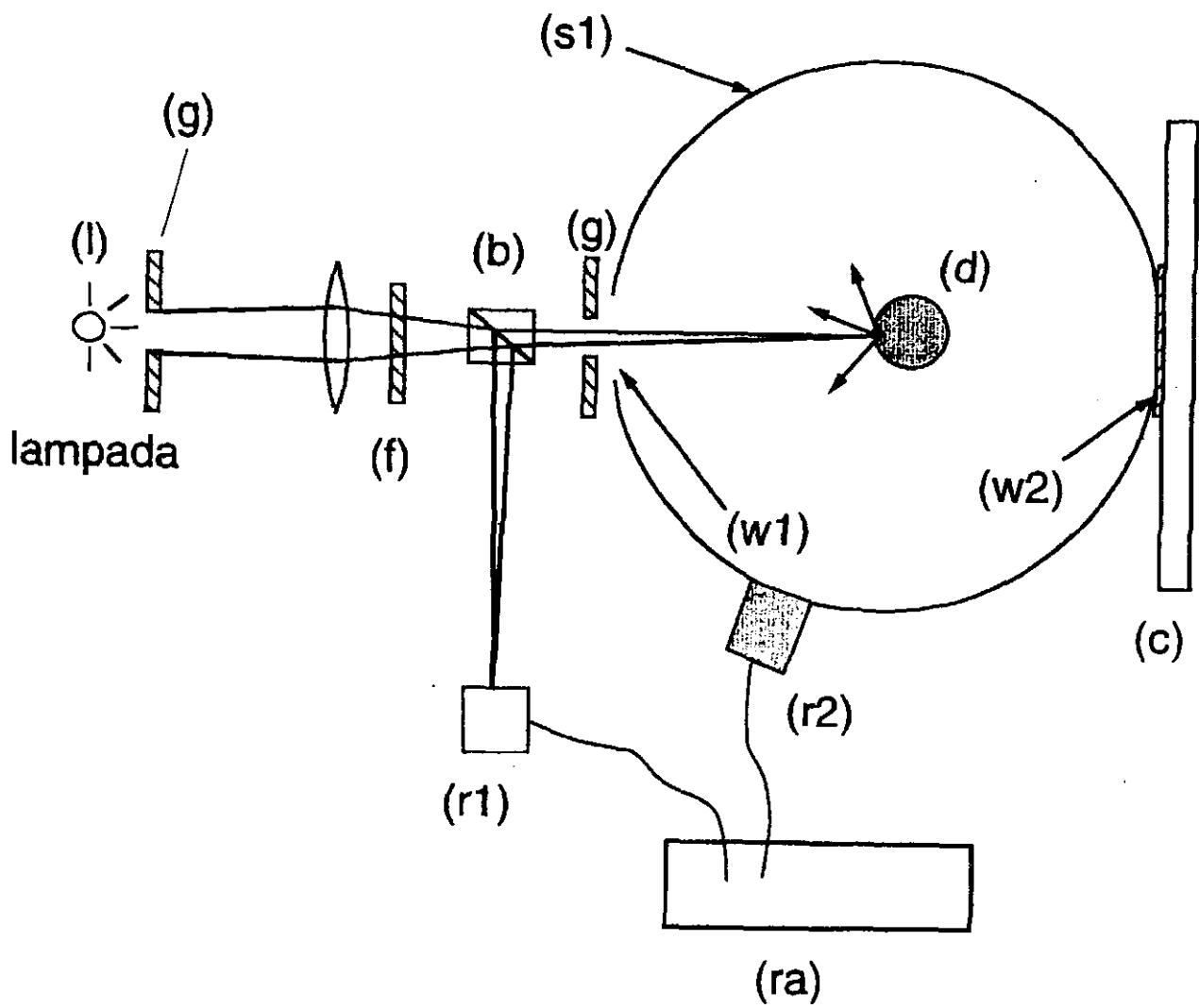


**Fig. 9**





**Fig. 10**



**Fig. 11**



Moduli ES18g e ES18GL, luce laser:  $\lambda=633$  nm

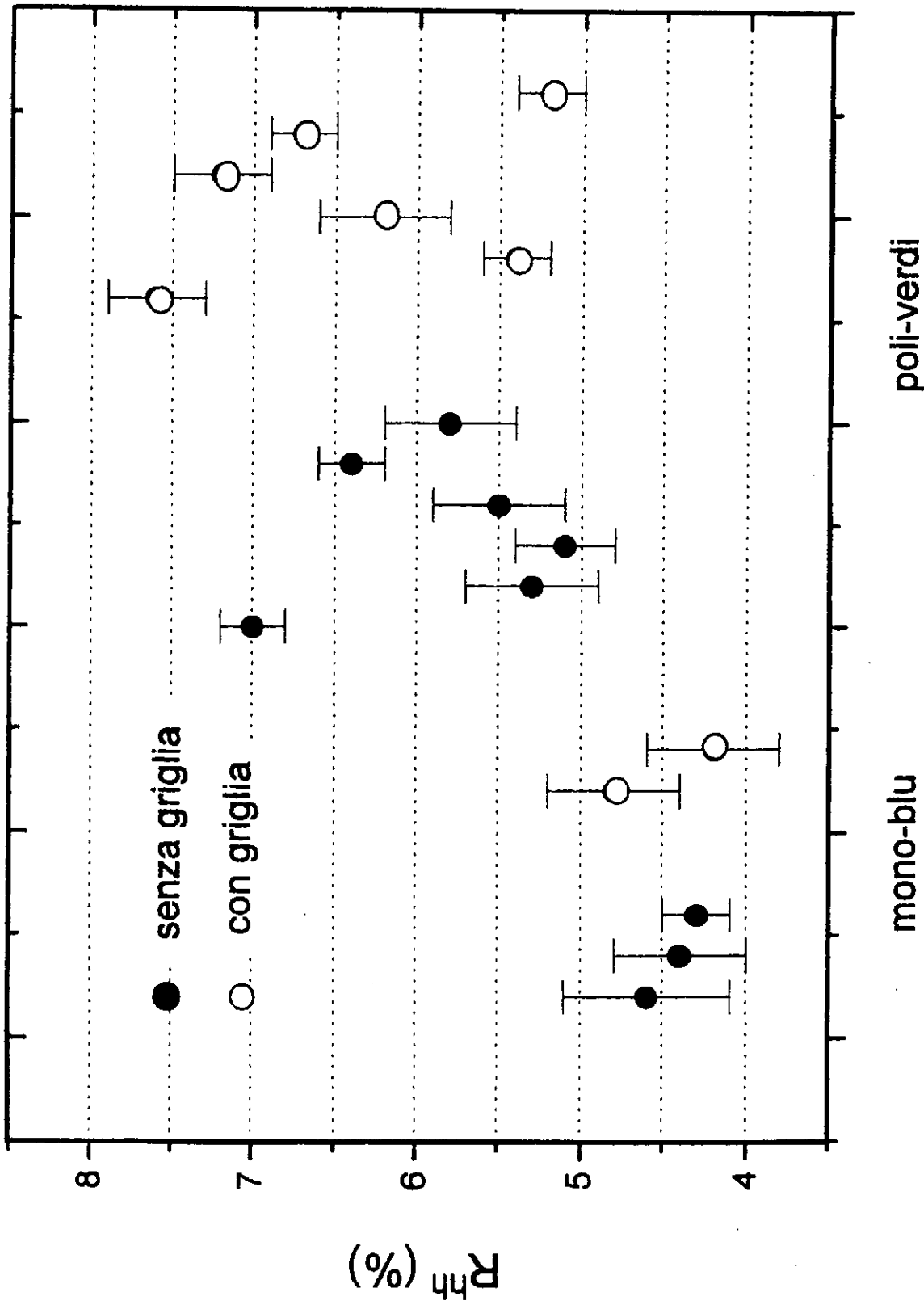
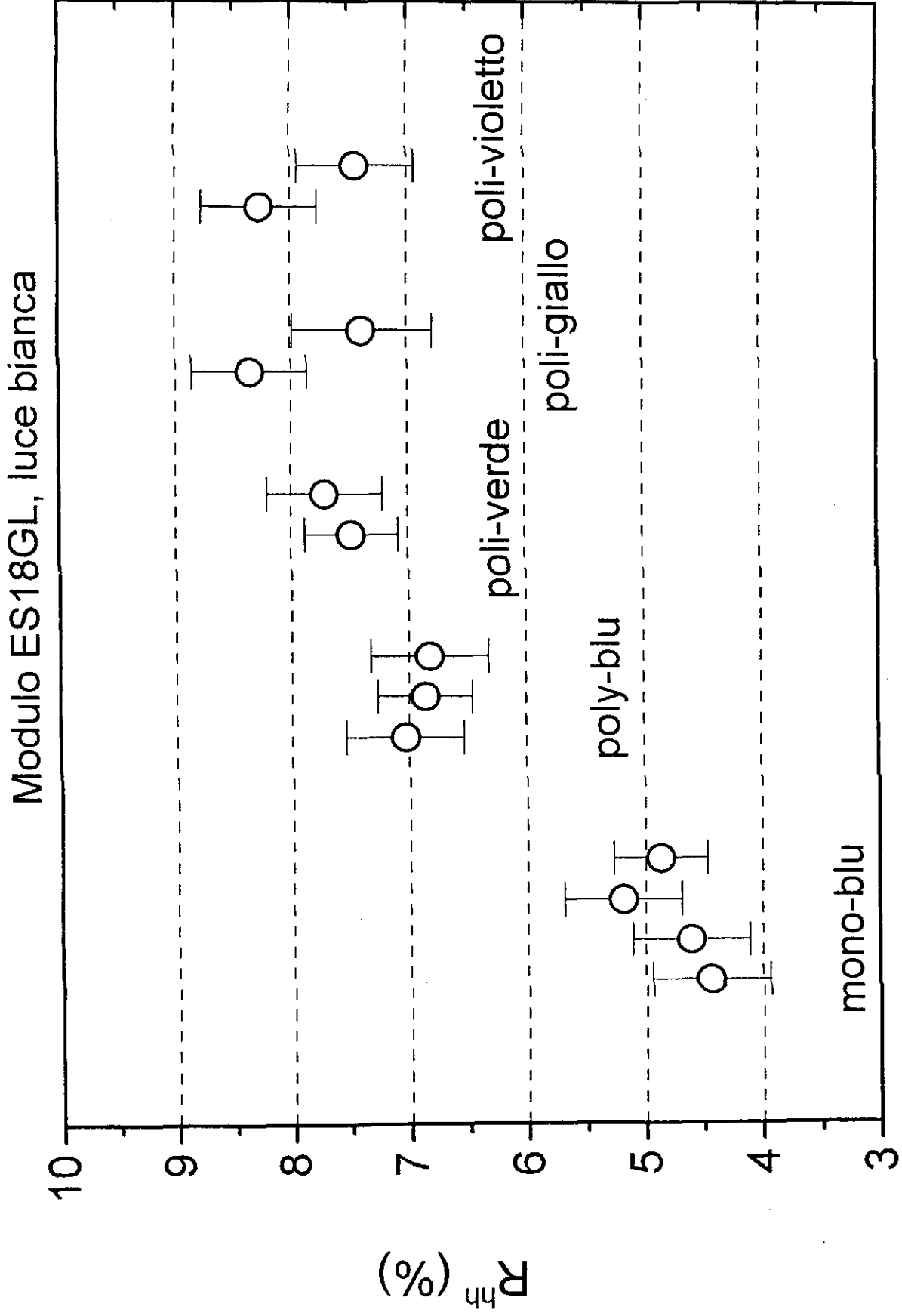


Fig. 13



Tipo di cella

Fig. 14

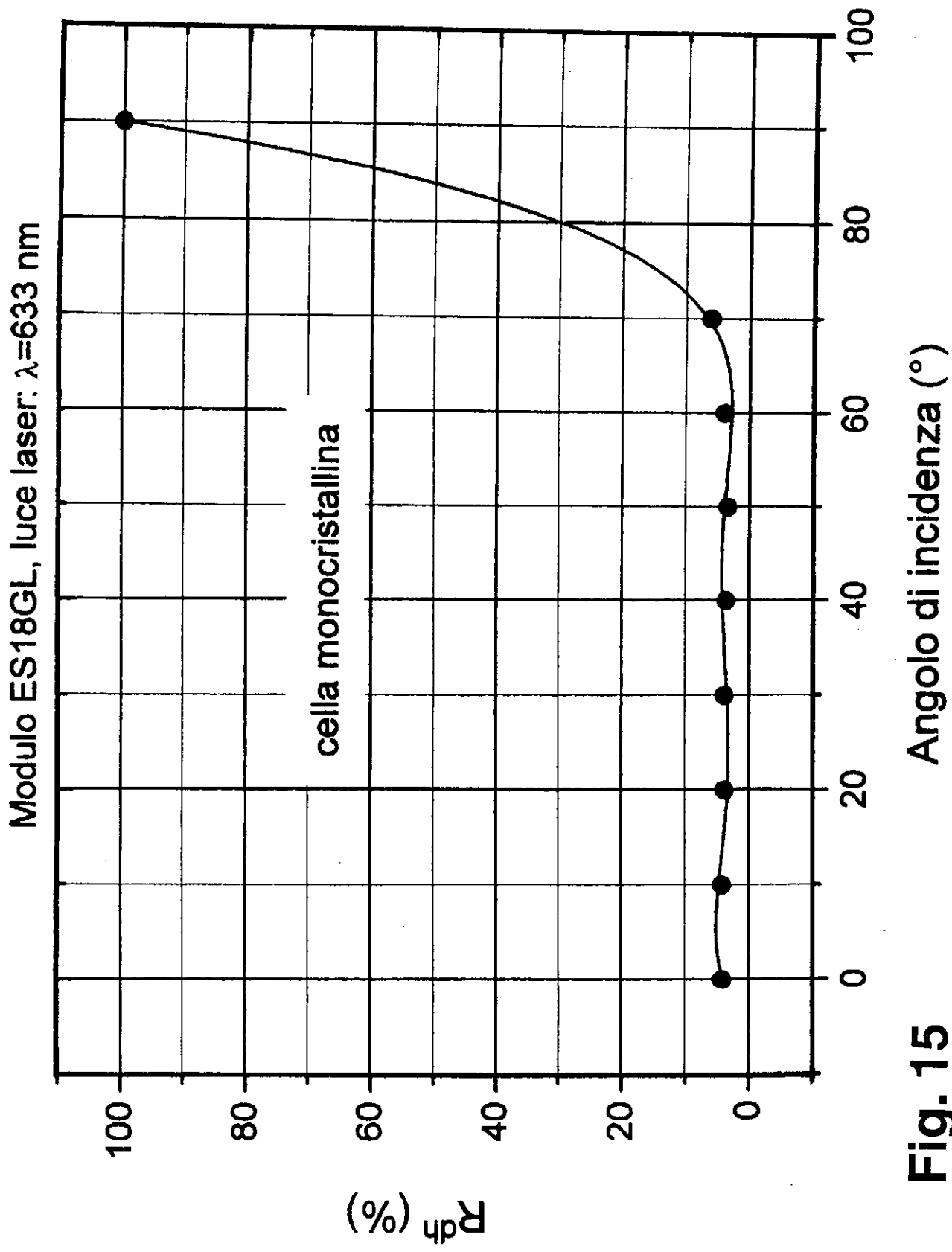
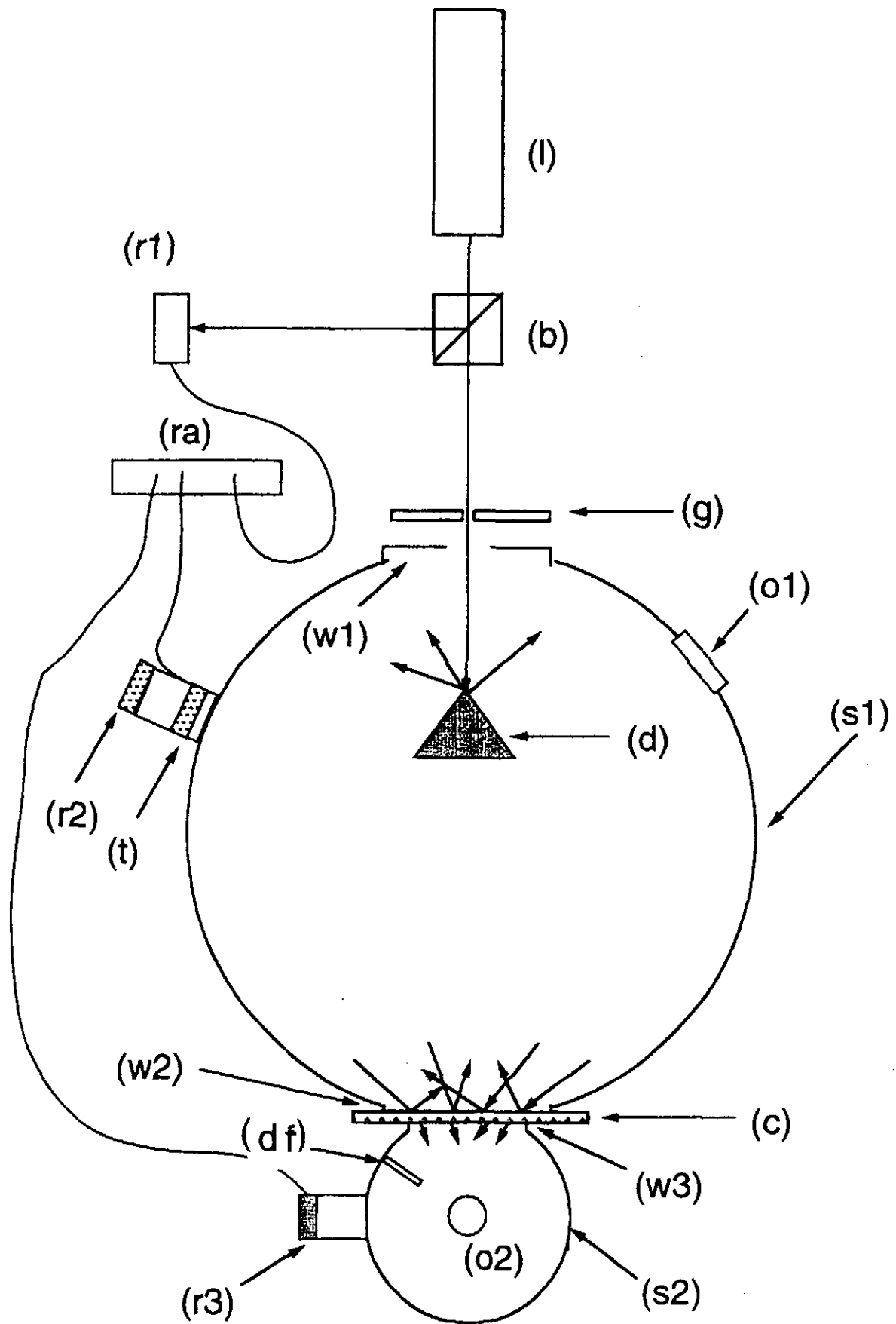
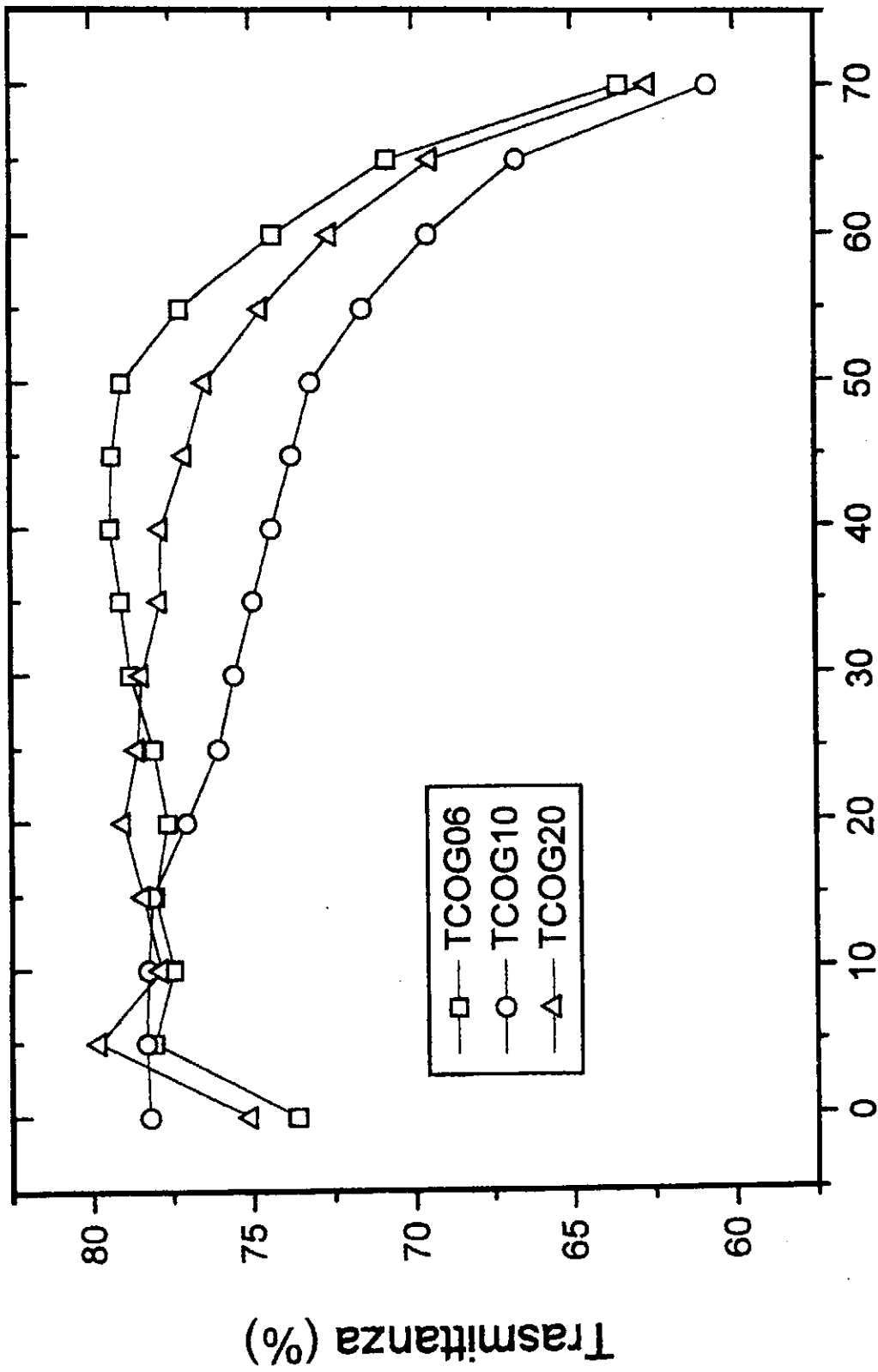


Fig. 15

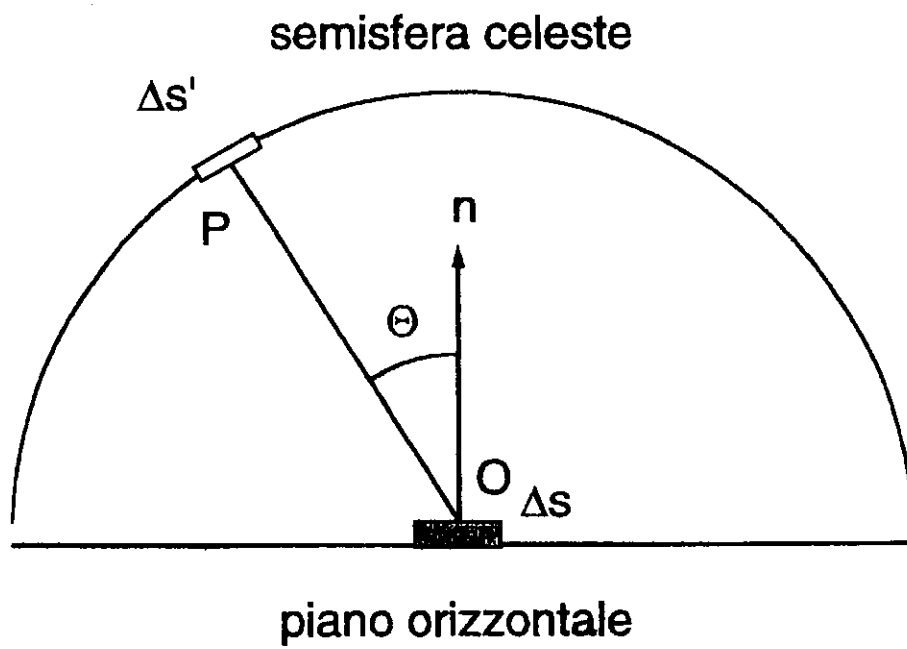


**Fig. 16**

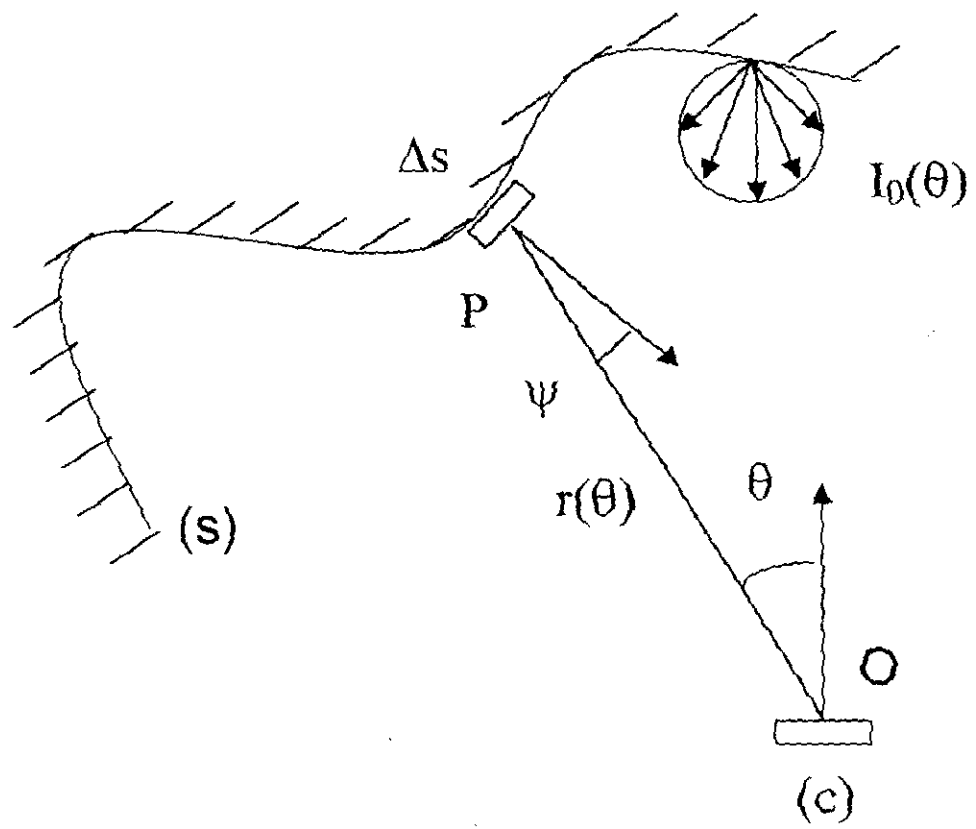


**Fig. 17** Angolo di incidenza (°)





**Fig. 18**



**Fig. 19**