

RIASSUNTO INVENZIONE CON DISEGNO PRINCIPALE

NUMERO DOMANDA **RM97 A000676** REQ. **1**

DATA DI DEPOSITO **05/11/1997**

NUMERO BREVETTO _____

DATA DI RILASCIO _____

408

A. RICHIEDENTE (I)

Denominazione **ENEA, ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE**
 Residenza _____

D. TITOLO

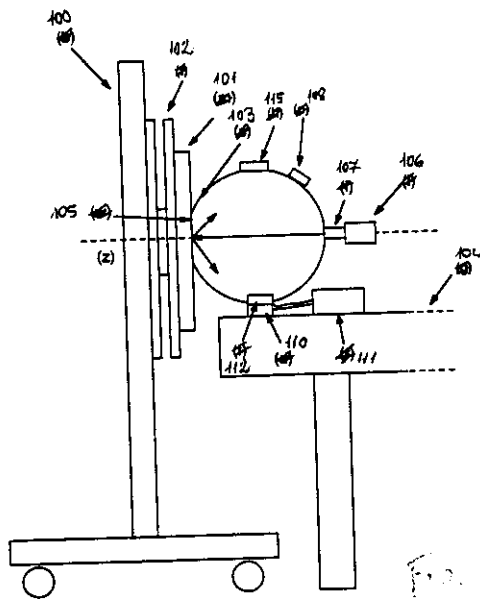
"Dispositivo per la esecuzione non distruttiva di misure di riflettanza spettrale, globale, speculare e diffusa, ad angolo di incidenza variabile, nonchè di trasmittanza, per celle solari e moduli fotovoltaici"

Classe proposta (sez./cl./scl) _____ (gruppo/sottogruppo) _____ / _____

L. RIASSUNTO

Dispositivo per la esecuzione non distruttiva di misure di riflettanza spettrale, globale, speculare e diffusa, ad angolo di incidenza variabile, nonchè di trasmittanza, per celle solari e moduli fotovoltaici, comprendente: un supporto (100), poggiato sul pavimento e dotato di ruote, che sostiene un modulo (101), fissato su un telaio (102) traslabile su due assi ortogonali x-y e girevole attorno ad un asse perpendicolare (z) in modo tale che il modulo stesso possa essere orientabile da 0° a 360° (angolo di azimuth) rispetto al piano di incidenza di un fascio luminoso di misura; una sfera integratrice (103), posta su un banco ottico (104), dotata di una finestra (105) su cui viene affacciato il modulo a tenuta di luce esterna; una o più sorgenti di luce (106) posizionabili in corrispondenza di una pluralità di finestre con ottiche di ingresso (107) predisposte lungo una linea equatoriale della sfera e tali da focalizzare il fascio di luce esattamente sulla porzione del modulo da misurare; un oblò (108) per trsguardare il punto di misura; una pluralità di finestre (109) per l'assorbimento della componente speculare, da aprire solo per la misura della componente diffusa; di un rivelatore al silicio (110) associato a detta sfera (103) ed un radiometro (111); nonchè filtri (112) posti davanti al rivelatore per selezionare una banda determinata della luce riflessa e quindi per misurare la riflettanza spettrale del modulo.

M. DISEGNO



DESCRIZIONE

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

" 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 "

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

Inventore: Antonio PARRETTA

La presente invenzione si riferisce in linea generale ad una tecnica non distruttiva e concerne in particolare un dispositivo per la misura della riflettanza spettrale, globale, speculare e diffusa, nonché di trasmittanza, ad angolo di incidenza variabile, per celle solari e moduli fotovoltaici.

La misura della riflettanza, alla luce visibile e nel vicino infrarosso, di un modulo fotovoltaico è un' informazione essenziale per conoscerne le proprietà ottiche e quindi le sue prestazioni alla luce solare. Attualmente la riflettanza viene stimata attraverso l' uso di modelli ottici complessi e potrebbe essere misurata, ma non esistono riferimenti in letteratura, su campioni ritagliati dal modulo stesso, ad angolo di incidenza quasi normale. Non esiste quindi al momento nessuna tecnica di misura non distruttiva della riflettanza di un modulo ad angolo di incidenza variabile. La tecnica proposta nella presente invenzione consiste essenzialmente nell' inviare un fascio collimato di

luce bianca o un fascio laser sulla superficie del modulo e di raccogliere la luce riflessa attraverso una sfera integratrice.

STATO ATTUALE DELLA TECNICA DEL SETTORE

La riflettanza di un modulo fotovoltaico può interessare dal punto di vista assoluto, per conoscerne le perdite ottiche assolute per riflessione, o più semplicemente dal punto di vista relativo alle condizioni operative dei simulatori solari usati nei laboratori di testing, per conoscere le perdite ottiche "relative" del modulo quando è posto sul campo [1]. Queste condizioni, denominate Standard Test Conditions (STC) [2], corrispondono ad un fascio parallelo di luce non polarizzata di intensità 1000 W/m^2 e con spettro standard AM1.5G [3], incidente perpendicolarmente (per convenzione: angolo di incidenza di 0°) sulla superficie del modulo mantenuto a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Le perdite per riflessione relative sono causate dalla distribuzione angolare della luce solare esterna, associata alla maggiore riflettività, per angoli di incidenza diversi da 0° , delle interfacce presenti nella parte frontale del modulo.

La ricerca attuale sui fenomeni di perdita ottica nei moduli fotovoltaici (FV) mira ad un duplice scopo: da una parte, conoscere e possibilmente ridurre il degrado delle prestazioni di raccolta di luce del modulo posto all'esterno, rispetto alle condizioni STC (riduzione, cioè, delle perdite per riflessione relative), il che si tradurrebbe in una maggiore uniformità di prestazioni del modulo rispetto agli inevitabili ed imprevedibili cambiamenti nella distribuzione angolare dell'illuminazione naturale; dall'altra, conoscere e possibilmente

migliorare le prestazioni di raccolta di luce "tout court" (riduzione delle perdite per riflessione assolute), il che si tradurrebbe in un maggiore rendimento energetico del modulo. La riflettanza assoluta del modulo contiene già in sé, come informazione, la riflettanza relativa (alla incidenza a 0°) e quindi è una grandezza ottica da conoscere

Oggi i moduli fotovoltaici (vedi in Figura 3 due esempi di moduli al silicio cristallino a) e al silicio amorfo b)) vengono costruiti ottimizzando la trasmittanza dello strato frontale a luce perpendicolare, $T(0^\circ)$, attraverso la ottimizzazione della corrente di corto circuito I_{sc} . La trasmittanza fornisce, infatti, la misura dell'intensità di luce assorbita dalla parte attiva del modulo. In generale, per un fascio incidente con angolo θ , la trasmittanza è data da $T(\theta) = 1 - R(\theta) - A(\theta)$, dove $R(\theta)$ è la riflettanza del modulo e $A(\theta)$ è l'assorbanza dello strato frontale, generalmente trascurabile. La trasmittanza dello strato frontale del modulo a luce normale non viene direttamente misurata, ma stimata attraverso modelli ottici di simulazione [4], [5], [6]. Questi però simulano bene il modulo quando esso è costituito da strati paralleli piani, mentre, come accade per i moduli al silicio cristallino testurizzato [7] (vedi Figura 4), nel caso di interfacce rugose complesse essi presentano delle difficoltà a simulare la situazione reale. In alternativa, viene misurata, con uno spettrofotometro, la riflettanza di campioni di piccole dimensioni, del tutto simili al modulo stesso. Il modulo, quindi, deve essere sottoposto ad un'operazione distruttiva per ricavarne un campione di dimensioni opportune oppure campioni di questo tipo debbono essere preparati *ad hoc*. Lo spettrofotometro lavora inoltre

con un fascio di luce monocromatico e quindi fornisce la riflettanza spettrale ad un angolo di incidenza fisso e del valore di circa 8° (nei tradizionali spettrofotometri non è possibile variare a piacimento l'angolo di incidenza). Per conoscere la riflettanza del campione ad uno spettro particolare, ad esempio quello solare, occorrerebbe fare una integrazione sulla lunghezza d'onda. Anche la misura della riflettanza su celle solari si può considerare distruttiva perché l'uso di uno spettrofotometro richiede campioni di dimensioni più piccole (pochi cm^2) rispetto a quelle tipiche di una cella solare al silicio cristallino (circa 100 cm^2). La situazione è diversa per i moduli al silicio amorfo. Essi infatti sono costruiti con una tecnologia integrata (vedi Figura 5) che esclude il concetto della cella solare. Una misura sperimentale su di essi comporta o il taglio del modulo o la preparazione *ad hoc* di campioni di piccole dimensioni.

Un procedimento diverso viene oggi adottato per la misura della riflettanza relativa alla incidenza normale ($\theta = 0^\circ$). Questa può essere svolta sul modulo intero esponendolo alla luce di un simulatore solare, funzionante a flash (il funzionamento a flash, in alternativa a quello continuo, assicura buona uniformità, alta intensità e luce parallela; esso inoltre permette di evitare il surriscaldamento del modulo e quindi sofisticati sistemi di termoregolazione) [8]. Si misura la curva I-V del modulo con un sistema di acquisizione dati ad alta velocità. Il modulo viene quindi inclinato rispetto alla luce incidente e per ogni angolo θ ne viene misurata la curva I-V. Questa misura deve essere effettuata in un ambiente completamente oscurato per limitare

le interferenze sulla misura da parte della luce di fondo. Dalle curve I-V si ricava la corrente di corto circuito I_{sc} e alla fine si ottiene una curva di $I_{sc}(\theta)/I_{sc}(0^\circ)$ in funzione di θ . Essa corrisponde alla curva $T(\theta)/T(0^\circ)$ della trasmittanza relativa del modulo. Per ottenere $T(\theta)$ occorre moltiplicare la trasmittanza relativa per $T(0^\circ)$, stimata con i modelli ottici o ricavata, a partire dalle misure di riflettanza su piccoli campioni allo spettrofotometro.

In definitiva, per ottenere $T(\theta)$ oggi si possono percorrere due strade: a) quella della simulazione con modelli ottici, con risultati però incerti quando il modulo da simulare presenta interfacce non piane o quando la struttura del modulo non è nota; b) quella della misura sul modulo intero della trasmittanza relativa $T(\theta)/T(0^\circ)$, mediante un simulatore solare a flash, sincronizzato con un sistema elettronico veloce di acquisizione di dati. Per ricavare $T(\theta)$ occorre poi associare alla precedente misura anche quella di $T(0^\circ)$ che deve essere effettuata in uno spettrofotometro utilizzando un campione di piccole dimensioni del tutto uguale al modulo stesso. Il campione potrà essere ricavato per taglio, e quindi in maniera distruttiva, dal modulo intero o dovrà essere preparato appositamente con quelle dimensioni. Bisogna tener conto, nel primo caso, che molti moduli, realizzati con vetro temperato, non possono essere tagliati con tecniche meccaniche convenzionali senza manifestare fratture catastrofiche dello strato frontale. La metodologia di cui al punto b) richiede, pertanto, un notevole investimento economico. Va inoltre aggiunto che quest'ultimo approccio ha il vantaggio di offrire informazioni medie sulle proprietà

ottiche del modulo, ma non fornisce informazioni locali sulle singole celle, perché la misura della corrente di un modulo può essere fatta soltanto illuminando completamente ed uniformemente tutta la sua superficie.

Il sistema secondo la presente invenzione, in alternativa ai due precedenti, fornisce, invece, in maniera diretta e semplice (è necessario applicare alcune semplici relazioni), ma soprattutto non distruttiva, la riflettanza assoluta $R(\theta)$ di una qualsiasi porzione del modulo o del modulo intero. La trasmittanza $T(\theta)$ può essere ricavata da : $T(\theta) = 1 - R(\theta)$, trascurando il piccolo assorbimento dello strato frontale $A(\theta)$. Per maggiore precisione, $A(\theta)$ può essere misurata direttamente con la presente apparecchiatura, come verrà descritto.

DESCRIZIONE TECNICA DELL' INVENZIONE.

Si tratta di una tecnica unica per la misura della riflettanza di moduli fotovoltaici e nuova per la misura della riflettanza di celle solari. Per entrambe le applicazioni la tecnica è non distruttiva.

Il sistema di misura ha la finalità di simulare in laboratorio le perdite ottiche per riflettanza, che sono una parte delle perdite energetiche che si verificano in un modulo fotovoltaico quando esso è installato all' esterno nel sito di applicazione (un campo o un edificio, ecc.) e quindi esposto alla luce solare reale.

Le perdite ottiche si manifestano all' esterno (outdoor) per effetto della riflettanza globale (speculare + diffusa) che subiscono i raggi luminosi incidenti. Per convenzione, l' angolo di incidenza per un singolo raggio luminoso viene misurato a partire dalla direzione

normale alla superficie del modulo e quindi varia da 0° (fascio ortogonale alla superficie) a 90° (fascio parallelo alla superficie). Nelle condizioni reali le perdite per riflettanza si hanno sia rispetto alla componente solare diretta (disco solare) che incide con un angolo preciso e noto sul modulo, sia rispetto alla componente solare diffusa (o distribuita) che incide sul modulo in maniera differenziata a seconda della direzione di provenienza dalla semisfera celeste e dall' ambiente circostante della porzione di luce considerata.

Nota, in quanto misurata o simulata, una certa distribuzione della intensità luminosa della luce solare, $G(\phi, \theta, \lambda)$, espressa in $W/m^2 \cdot \mu m \cdot \text{steradiante}$ (dove ϕ e θ sono i convenzionali angoli che identificano una direzione nello spazio tridimensionale), la quantità totale di luce effettivamente assorbita dal modulo, e utilizzabile ai fini della conversione fotovoltaica, altrimenti detta "trasmessa" (alla parte attiva del modulo), potrà essere calcolata con metodi di integrazione numerica [9], sia sull' angolo solido da 0 a 2π steradiani che sulla lunghezza d' onda, se è noto il parametro $T(\phi, \theta, \lambda)$, ovvero la trasmittanza della copertura frontale del modulo fotovoltaico rispetto ad un fascio luminoso collimato proveniente dalla direzione con azimuth ϕ e con angolo di incidenza θ e monocromatico di lunghezza d' onda λ . La trasmittanza deve essere espressa in funzione dell' angolo azimuthale ϕ , oltre che dell' angolo di incidenza θ , quando la superficie del modulo non è isotropa rispetto alla direzione azimuthale, e questo succede nei moduli o celle al silicio monocristallino. Il sistema di misura della riflettanza secondo la presente invenzione è perfettamente in

grado di fornire il parametro $T(\phi, \theta, \lambda)$, direttamente in via approssimativa o indirettamente in maniera precisa, in quanto permette di effettuare le misure in funzione dei due angoli ϕ e θ e della lunghezza d'onda, secondo la procedura che sarà descritta in seguito. Per moduli al silicio policristallino o al silicio amorfo, è sufficiente assegnare la trasmittanza $T(\theta, \lambda)$ in quanto essi hanno proprietà ottiche isotrope rispetto all'angolo azimuthale ϕ . Se indichiamo con "1" l'intensità della luce incidente, l'intensità della luce trasmessa al modulo sarà: $T=1-R-A$, dove R è la parte riflessa ed A è la parte assorbita dagli strati anteriori del modulo. Quindi T ed R non sono perfettamente complementari in quanto una piccola parte della luce viene assorbita sugli strati vetro/EVA (vedi Fig. 3). Questo significa che la conoscenza della riflettanza del modulo non dà precisamente e direttamente la trasmittanza del modulo stesso. Questo assorbimento è comunque molto basso e può essere trascurato in prima approssimazione. L'invenzione proposta quindi misura la parte più consistente della perdita ottica che è quella per riflessione, $R(\phi, \theta, \lambda)$, espressa in funzione dell'angolo di incidenza, dell'angolo azimuthale e della lunghezza d'onda. Per pervenire a misure di ulteriore precisione, si può usare questo stesso sistema per le misure di assorbimento da parte del vetro frontale, secondo la procedura descritta oltre sotto la denominazione di misure di "transriflettanza".

La realizzazione pratica dell'invenzione, come descritto in seguito, fa riferimento a misure fatte su un intervallo discreto di valori di angoli di incidenza per i moduli fotovoltaici e su un intervallo continuo

per le celle solari, ma è possibile realizzare un sistema che operi in maniera continua anche per i moduli fotovoltaici. In questo caso basta realizzare sulla sfera una finestra continua per l' ingresso del fascio incidente, anziché più finestre per angoli discreti come da noi realizzato. La finestra può allora essere una fenditura continua che percorre la linea equatoriale della sfera attraversata da due aperture scorrevoli, una per l' ingresso del fascio incidente ed una per l' uscita del fascio riflesso speculare.

Il sistema oggetto della presente invenzione è basato sull' impiego di una sfera integratrice che ha lo scopo di raccogliere e integrare tutta la luce riflessa da una cella solare o un modulo FV in seguito al loro irraggiamento con un fascio di luce collimato opportuno.

Il sistema consente misure di riflettanza globale, R_g , e misure di riflettanza diffusa, R_d . La riflettanza speculare, R_s , si ottiene semplicemente da: $R_s = R_g - R_d$. Nella misura della riflettanza globale, il fascio riflesso speculare incontra la superficie bianca della sfera e viene reintegrato al suo interno; nella misura della riflettanza diffusa, il fascio riflesso speculare viene assorbito da una cavità nera posta sulla finestra di uscita in corrispondenza della direzione di riflessione speculare. Queste misure sono fondamentali per conoscere lo stato di rugosità della superficie del modulo. Infatti, benché generalmente il vetro frontale abbia la faccia anteriore liscia, la sua faccia posteriore a volte viene realizzata rugosa per facilitare l' assorbimento della luce; inoltre, anche la cella sottostante è realizzata con una superficie rugosa, a volte testurizzata (vedi Fig. 4) [7] sempre per migliorare l'

assorbimento della luce incidente. In questi casi la rugosità determina una diffusione ("scattering") della luce incidente che viene così riflessa su un angolo solido di 2π steradiani. Questo è il motivo per cui l'uso della sfera, che raccoglie la luce su un angolo solido di 2π steradiani, è indispensabile. Al contrario, se si misurasse solo la componente riflessa speculare semplicemente intercettando il fascio riflesso specularmente, si incorrerebbe in un grosso errore di misura (si misurerebbe la riflettanza in difetto).

Le misure possono essere svolte sia in luce bianca, che in luce monocromatica o in luce laser. Una luce bianca come sorgente può essere ad esempio una lampada QTH (Quartz Tungsten Halogen), oppure una lampada allo Xenon. La lampada QTH assicura uno spettro regolare e continuo sul visibile e sull'infrarosso, mentre una lampada allo Xenon assicura uno spettro intenso e regolare dall'UV al visibile fino a circa 800 nm. Le misure di riflettanza presentate di seguito sono state fatte utilizzando una sorgente QTH. Con una sorgente di luce bianca si possono fare sia misure su un ampio spettro di lunghezze d'onda, sia misure su bande determinate, interponendo un filtro opportuno sul cammino ottico della luce che perviene al rivelatore al silicio. In alternativa, si può porre il filtro davanti alla lampada. In entrambi i casi si tratta di misure di riflettanza spettrale. Misure di tipo spettrale si possono altresì fare utilizzando il fascio di uscita di un monocromatore.

Nella preferita forma di realizzazione dell'apparecchiatura sono impiegati filtri passa-banda posti davanti al rivelatore al silicio. La

sorgente di luce bianca può essere alimentata sia in maniera continua che in maniera intermittente. L'alimentazione intermittente presenta il vantaggio che non si producono surriscaldamenti sia delle parti di focalizzazione del fascio, che della sfera stessa (le sollecitazioni termiche possono risultare dannosi alla stabilità del rivestimento di solfato di bario interno alla sfera). In questo caso, si può operare con una normale lampada QTH accendendola soltanto per il tempo necessario alla stabilizzazione dell'intensità luminosa (pochi secondi), oppure impiegando una lampada a lampo. In questo secondo caso occorre però realizzare una elettronica veloce per la acquisizione del dato di riflettanza. L'uso di una sorgente al lampo è indispensabile in una eventuale versione portatile dell'apparecchiatura, destinata alla misura su moduli già installati.

Ulteriori dettagli, particolarità e vantaggi della presente invenzione appariranno evidenti dal seguito della descrizione con riferimento ai disegni allegati, in cui sono rappresentate a titolo illustrativo e non restrittivo le preferite forme di realizzazione.

Nei disegni:

la Fig. 1a mostra una vista laterale della configurazione del sistema per la misura della riflettanza su moduli FV,

la Fig. 1b mostra una vista dall'alto della configurazione del sistema per la misura della riflettanza su moduli FV,

la Fig. 2 mostra una vista laterale della configurazione del sistema per la misura della riflettanza su celle solari,

la Fig. 3 mostra la struttura tipica di moduli al silicio cristallino (a) ed al silicio amorfo (b),

la Fig. 4 mostra la superficie, vista al microscopio elettronico, di silicio cristallino testurizzato randomicamente,

la Fig. 5 mostra la tecnologia integrata impiegata nella costruzione di moduli di silicio amorfo,

la Fig. 6 mostra la definizione di angolo di incidenza θ e angolo di azimuth ϕ ,

la Fig. 7 mostra la zona illuminata della cella solare all'interno della sfera integratrice,

la Fig. 8 mostra la zona non illuminata della cella coperta con una superficie bianca,

la Fig. 9 mostra ingrandita la struttura a piramidi della testurizzazione in una cella al silicio monocristallino,

la Fig. 10 mostra il modo di illuminazione del bus bar al centro per determinare la riflettanza di metallo $R_g(0^\circ)$,

la Fig. 11 mostra la riflettanza QTH di un modulo al silicio monocristallino in funzione dell'angolo di incidenza del fascio,

la Fig. 11a mostra la riflettanza spettrale, misurata con uno spettrofotometro, di un frammento di modulo al silicio monocristallino,

la Fig. 12 mostra la riflettanza QTH relativa ad un modulo al silicio monocristallino misurata direttamente (dati non corretti) e corretta con la formula (8) (dati corretti),

la Fig. 13 mostra la riflettanza globale di un modulo di silicio amorfo, in funzione dell'angolo di incidenza del fascio,

la Fig. 13a mostra la riflettanza spettrale, misurata con uno spettrofotometro, di una cella al silicio amorfo,

la Fig. 14 mostra la configurazione del sistema per misure di trasmittanza su moduli e su lastre di vetro/EVA in vista laterale,

la Fig. 15 mostra la trasmittanza, ottenuta con sorgente laser He-Ne, della regione trasparente di un frammento di modulo al silicio monocristallino,

la Fig. 16 mostra la trasmittanza, ottenuta con sorgente laser He-Ne, della regione trasparente di un modulo al silicio monocristallino, con esame in due punti diversi.

Con riferimento ora alle Figg. 1a, 1b, 2, il sistema comprende le seguenti parti : i) un supporto per moduli; ii) un banco ottico; iii) una sfera integratrice; iv) una sorgente di luce, bianca con relativo alimentatore, o monocromatica con relativo monocromatore, o la sorgente laser; v) un rivelatore con relativo radiometro.

Più particolarmente. l' apparecchiatura di misura consiste quindi di : un supporto 100, poggiato sul pavimento e dotato di ruote, che sostiene il modulo 101, fissato su un telaio 102 traslabile su due assi ortogonali x-y e girevole attorno ad un asse perpendicolare (z) in modo tale che il modulo stesso possa essere orientabile da 0° a 360° (angolo di azimuth) rispetto al piano di incidenza del fascio luminoso; una sfera integratrice 103, posta su un banco ottico 104, dotata di una finestra 105 su cui viene affacciato il modulo a tenuta di luce esterna; una sorgente di luce 106 posizionata in corrispondenza di una delle ottiche di ingresso 107 predisposte lungo una linea equatoriale della

sfera e tali da focalizzare il fascio di luce esattamente sulla porzione del modulo da misurare; un oblò 108 per trapiantare il punto di misura; finestre 109 per l'assorbimento della componente speculare, da aprire solo per la misura della componente diffusa; un rivelatore al silicio 110 posto all'interno della sfera ed un radiometro 111; nonché filtri 112 posti davanti al rivelatore per selezionare una banda determinata della luce riflessa e quindi per misurare la riflettanza spettrale del modulo.

Un Personal Computer, opzionale, potrebbe risultare utile per il controllo della strumentazione e per la gestione dei dati acquisiti.

Il supporto 100 per i moduli va realizzato in modo che si adatti a qualsiasi modulo commerciale. Non esistono infatti dimensioni standard per i moduli FV.

Il supporto 100 è dotato di ruote per trasportare facilmente il modulo 101 e poterlo affacciare alla sfera 103. Il modulo è fissato su un telaio 102 dotato di tre movimenti rispetto al supporto: due movimenti x-y per posizionare il modulo di fronte alla finestra e quindi centrare il punto del modulo che interessa misurare, ed un movimento di rotazione libera attorno all'asse z, che serve a fissare la direzione lungo la quale lo spot di luce verrà inclinato (angolo di azimuth). Il movimento di rotazione si renderà necessario per moduli testurizzati, ovvero anisotropi rispetto all'angolo di azimuth. Per misurare l'angolo di azimuth, il supporto è dotato di un goniometro e per lo spostamento x-y di un meccanismo di traslazione fine. La convenzione adottata per l'angolo di azimuth è spiegata in Fig. 6. Nel modulo 101 si individua un asse principale x, parallelo al lato più lungo (generalmente i moduli

sono di forma rettangolare), ed un verso positivo corrispondente alla posizione "alto" quando è messo in modo da leggere il "data sheet" stampigliato sulla faccia posteriore. L' asse y sarà quello ottenuto guardando il modulo dalla parte frontale e ruotando l' asse x in senso antiorario di 90°. L' asse z è quello normale al modulo nel punto di misura (punto di incidenza del fascio) e orientato verso la sorgente di luce. Si dirà che il fascio incide sul modulo con azimuth di 0° quando il suo piano di incidenza contiene gli assi x e z .

Il banco di lavoro può essere un semplice tavolo, ma l' uso di un banco ottico 104 facilita le misure fatte con luce laser o con altre sorgenti che richiedono di essere fissate al tavolo e regolate in direzione. La sfera 103 deve essere posizionata sul banco 104 in modo che la finestra su cui si poggerà il modulo si trovi al di là del bordo. In tal caso il modulo può essere portato a contatto con la sfera in corrispondenza della finestra senza urtare sul banco di lavoro.

La sfera integratrice 103 è provvista di una finestra 105 sulla quale viene poggiato il modulo 101, a tenuta di luce. La finestra 105 è generalmente circolare e le sue dimensioni possono variare a seconda del tipo di misura e del tipo di sorgente usata. L' apertura sul modulo deve essere tanto maggiore quanto più inclinato sarà il fascio e quanto più grande è la sezione ortogonale del fascio stesso. Infatti, un fascio con sezione di diametro "d" incidente con angolo " θ " si proietta sul modulo come un' ellisse di semiassi "d" e $(d/\sin(90^\circ-\theta))$. Per un angolo di incidenza di 80°, ad esempio, un fascio di 1 cm di diametro si distende sul modulo lungo una direzione per circa 6 cm. Per effetto

dell' allungamento del fascio lungo una sola direzione, si avrà che, se la sfera è provvista di una finestra circolare, una parte rilevante della porzione di modulo affacciata all' interno della sfera non sarà mai illuminata dal fascio per qualsiasi angolo di incidenza (vedi Fig. 7). Questo fatto può dar luogo ad un errore sulle misure detto "errore di sostituzione" [10] se la procedura di misura prevede la sostituzione, sulla finestra, del modulo con un riferimento bianco. Nella procedura seguita si riduce al minimo questo errore mascherando la parte suddetta non illuminata del modulo con un foglio di materiale bianco altamente riflettente (vedi Fig. 8). In alternativa si può usare una finestra dotata di un' apertura a forma di fenditura che espone alla sfera soltanto la parte illuminabile del modulo. Una ulteriore alternativa consiste nel mantenere il modulo in posizione, quando si fa la misura di riferimento al 100%, e di mandare il fascio in direzione della parete bianca della sfera. In questo caso la sfera rimane la stessa, ovvero la sua capacità di integrazione rimane la stessa, sia quando si illumina il modulo, che quando si illumina il riferimento.

Un oblò 108 serve a trapiantare la zona di misura, una volta poggiato il modulo 101 alla sfera 103 e illuminato, in modo da osservare accuratamente la posizione precisa del fascio di luce proiettato sul modulo stesso ed agire sul meccanismo di traslazione per posizionare il modulo nel punto desiderato.

Lungo il piano equatoriale della sfera, ortogonale al modulo e parallela al piano orizzontale, è posta una serie di porte, o finestre, 107, per l' ingresso del fascio, distanziate di 10° , per angoli di

incidenza da 0° a 70°. Realizzando una sfera con diametro maggiore dei 40 cm della preferita forma di realizzazione, si possono raggiungere gli 80° di incidenza. Ogni porta 107 è infatti dotata di un sistema ottico di focalizzazione a lenti che serve appunto a focalizzare il fascio di luce sul piano del modulo e che però ha un suo ingombro minimo che non permette di alloggiare più di un certo numero di porte. Un' altra serie di porte 109, speculare alla prima rispetto all' asse z, serve a intercettare il fascio riflesso speculare. Nel caso si voglia misurare la riflettanza globale, le porte sono chiuse con tappi bianchi riflettenti. Nel caso si voglia misurare la riflettanza diffusa, sulla porta corrispondente all' angolo di incidenza di misura verrà montato un assorbitore di luce per la componente speculare.

La sorgente di luce bianca 106, costituita da una lampada quarzo-tungsteno-alogena (QTH) della potenza di circa 150 W, è montata dentro un contenitore metallico trasportabile attraverso un manico termicamente isolato. Esso può essere trasportato facilmente e montato, in condizioni di tenuta di luce, su una qualsiasi delle porte di ingresso 107 della sfera.

Per ridurre i tempi di misura ed avere una maggiore riproducibilità delle misure stesse, si può installare una sorgente per ogni porta di ingresso, regolando in tal modo una volta per tutte l'allineamento e la focalizzazione del fascio. Sarà poi necessario, naturalmente, predisporre un sistema di selezione ed accensione della sorgente desiderata.

La sorgente laser impiegata è di tipo He-Ne, ma può anche essere una diversa sorgente nel campo del visibile. Essa necessita di un depolarizzatore all' uscita, quando si voglia studiare il comportamento della cella o del modulo a luce depolarizzata. In alternativa, l' uso di una sorgente laser polarizzata può essere utile per studi particolari sulla riflettanza, in particolare di quella della luce solare diffusa [11-12]. Il laser viene montato sul banco ottico su un supporto in direzione della porta di ingresso che si vuole utilizzare, oppure direttamente su di essa. Come nella descrizione precedente, si può pensare di installare contemporaneamente un laser per ogni porta di ingresso.

Il rivelatore 110, un fotodiodo al silicio, è posto nella parte inferiore della sfera 103. Esso risponde alle lunghezze d' onda da circa 300 a circa 1150 nm, dove assorbono la maggior parte dei semiconduttori impiegati in campo fotovoltaico. Davanti ad esso si può montare un filtro 112 per selezionare una opportuna banda di lunghezze d' onda. Il segnale del rivelatore viene mandato ad un radiometro 111 che fornisce la lettura assoluta della luce in W/m^2 oppure in cd/m^2 , e quella relativa in %, rispetto alla luce riflessa misurata su un campione di riferimento.

La procedura di misura della riflettanza sui moduli FV (vedi Figg. 1a,b) inizia con il montaggio della lampada 106 sulla finestra 107 corrispondente all' angolo di incidenza desiderato. Si procede a questo punto alla misura del riferimento bianco, che viene posto sulla finestra 105. Questo riferimento deve essere tarato, ovvero avere riflettanza

nota, in funzione della lunghezza d'onda. Si effettua la misura leggendo l'intensità luminosa sul radiometro e si imposta una riflettanza relativa del 100%. Questo valore sarà successivamente corretto per l'effettiva riflettanza del riferimento e lo stesso fattore di correzione si apporterà alla misura relativa fatta sul modulo. Segue subito dopo il posizionamento del modulo sul carrello. Per i moduli al silicio amorfo o al silicio policristallino, isotropi rispetto all'angolo di azimuth, l'orientazione del modulo sul telaio e quindi rispetto al fascio incidente non è rilevante. Una sola misura in funzione dei vari angoli di incidenza è allora sufficiente per ogni punto scelto sul modulo. Naturalmente è utile ripetere le misure su diversi punti del modulo per verificare l'omogeneità delle proprietà ottiche. Per moduli al silicio cristallino, invece, bisogna fare più misure a diversi azimuth, data la loro anisotropia rispetto a quest'angolo (vedi Fig. 9). La simmetria tipica della testurizzazione è tale da mostrare la stessa struttura dopo rotazioni di 90° . Anche la riflettanza mantiene questa simmetria e quindi sarebbe sufficiente fare le misure entro un arco di 45° a partire dall'asse x del modulo, oppure entro un angolo di 90° a partire da una qualsiasi direzione azimuthale, per avere tutta l'informazione necessaria. Nel caso invece in cui interessi soprattutto la riflessione del modulo alla radiazione diretta (e questo vale per l'applicazione del modulo in siti dominati dalla radiazione diretta su quella diffusa), una sola misura, fatta con azimuth di 0° (180°) o di 90° (270°) (i due angoli sono equivalenti perché l'orientazione della testurizzazione è la stessa nei due casi), dà, con buona approssimazione, la riflettanza media

annuale dello stesso modulo. Infatti tipicamente i moduli sono orientati a sud con il loro asse principale, asse x (o con l' asse ortogonale a questo, asse y), e inclinati rispetto al piano orizzontale di un angolo, detto di "tilt", approssimativamente uguale alla latitudine del sito. Questo comporta che l' escursione media del sole durante l' anno avviene su un piano ortogonale al modulo ed al suo asse principale x (o a quello y).

A questo punto si tratta di scegliere il punto di misura. Una volta fissato il modulo 101 sul carrello 100, questo viene trasportato verso il banco 104 fino a far poggiare il modulo sulla finestra 105. È preferibile lavorare in un laboratorio oscurato in modo che si possa notare le eventuali infiltrazioni della luce interna verso l' esterno in corrispondenza di essa, ma ciò non è indispensabile. Si monta la lampada 106 sulla porta 107 a 0°, si guarda attraverso l' oblò 108 e si osserva la proiezione del fascio di luce sul modulo. Si regola la posizione della lampada in modo che la luce sia a fuoco, si chiude il tappo dell' oblò e si fa la lettura sul radiometro 111 in % di riflettanza. Volendo, si può ripetere la misura facendo piccoli aggiustamenti e sul fuoco della lampada e sulla posizione del punto di misura. Si trasporta la lampada 106 sulla porta 107 successiva, si ripete la misura sul riferimento e si ripete la misura sul modulo.

Le misure su celle incapsulate di dimensioni tipiche di 10 x 10 cm² non saranno descritte a parte perché esse si svolgono esattamente come se la cella fosse un modulo. Essa infatti viene posta davanti alla finestra 105 e misurata come se fosse un modulo. In questo senso la

misura è non distruttiva anche per le celle solari come anticipato. Per le misure invece su celle di più piccole dimensioni, $2 \times 2 \text{ cm}^2$ o al massimo $5 \times 5 \text{ cm}^2$ (questa dimensione può anche essere aumentata se si aumenta contemporaneamente il diametro della testa 115), la sfera viene configurata diversamente (vedi Fig. 2). Infatti, l'apparecchiatura descritta è contemporaneamente adatta alla misura di sola riflettanza globale su celle di piccole dimensioni. Basta posizionare il portacampioni 113 attraverso la testa 115 all'interno della sfera in modo girevole intorno all'asse verticale ξ e recante la cella da misurare 114, in modo tale che detta cella si trovi al centro della sfera stessa. La sorgente di luce 106 verrà ora mantenuta fissa sull'ottica precedentemente usata per l'angolo di incidenza 0° e il campione sarà ruotato in maniera continua agendo sulla testa 115 in modo da cambiare l'angolo di incidenza del fascio. In particolare si chiude la finestra 105 usata per i moduli ed il campione viene montato su una delle due facce del portacampioni 113 in modo tale che la sua parte centrale venga a trovarsi approssimativamente al centro della sfera. Questa verifica la si può fare montando preventivamente la sorgente sulla porta 107 a 0° e, tralasciando attraverso l'oblò 108, controllando la centratura della cella. Sulla faccia opposta del portacampioni 113 si monta un campione di riferimento (bianco), costituito tipicamente da un disco ricoperto di solfato di bario, centrato allo stesso modo della cella.

La posizione della cella ora è fissata e non si può regolare ulteriormente se non estraendo il portacampioni e riaggiustando la sua posizione (eventualmente si può prevedere un portacampioni più

complesso che, una volta inserito nella sfera, permetta, con l'ausilio di due meccanismi esterni, la traslazione della cella lungo due direzioni ortogonali x-y). Si installa la lampada di luce bianca sulla porta a 0° e si regola la sua posizione per avere il fascio focalizzato sia sulla superficie della cella, che su quella del riferimento. Se necessario, si ritocca la posizione della cella e/o del riferimento perché ciò avvenga. Si ruota il portacampioni portandolo sulla posizione di 0° , letti sul cerchio graduato posto sulla testa 115 (vedi Fig. 2). Si chiude l'oblò e si imposta sul radiometro il valore di 100%. Si apre l'oblò, si ruota il portacampioni di 180° in modo da avere ora la cella perpendicolare al fascio. Si controlla il fuoco e si chiude l'oblò. Si misura e si annota la riflettanza relativa data dalla cella. Si riporta il riferimento davanti al fascio, ruotando però l'asta portacampioni in modo da leggere 5° o 10° , a seconda di quale sia il prossimo valore di angolo di incidenza, si apre l'oblò, si aggiusta il fuoco per questo nuovo valore di angolo, si chiude l'oblò e si imposta 100 % sul radiometro. Si ruota il portacampioni di 180° e si legge il nuovo valore di riflettanza relativa a questo angolo. Si ripete quest'ultimo passo fino a completare la serie di misure. Queste misure possono essere condotte in maniera continua, o più realisticamente scegliendo intervalli angolari molto piccoli, ad esempio 1 o 2° . Questo non è necessario generalmente per angoli di incidenza bassi, ma quando il fascio diventa molto radente sulla superficie della cella, e la riflettanza cambia vistosamente, l' avere a disposizione piccoli intervalli sugli angoli risulta molto utile.

Un aspetto molto importante della misura riguarda la precisa scelta della zona da illuminare e l'effetto che questa ha sulla misura e sulla sua interpretazione. Per semplicità ci limitiamo qui a considerare soltanto i moduli realizzati con la tecnologia del silicio cristallino. I risultati possono essere estesi immediatamente e semplicemente anche ai moduli di tecnologia diversa. Come è noto, l'intera superficie del modulo non è tutta superficie attiva dal punto di vista fotovoltaico. La cornice e lo spazio "morto" tra le celle è superficie non elettricamente attiva. All'interno di una cella, una parte della superficie corrisponde alla griglia metallica di contatto frontale; questa è superficie elettricamente attiva, in quanto al di sotto della griglia avvengono fenomeni di conduzione elettrica, ma otticamente non attiva, in quanto la "trasmissione" della griglia è zero. Abbiamo inoltre la superficie del semiconduttore esposta alla luce, attraverso gli strati di vetro, EVA e lo strato antiriflettente ARC, che è sia elettricamente che otticamente attiva. Gli unici dati che qui interessano sono quelli relativi alla riflettanza della superficie otticamente attiva del modulo. Ai fini della conversione fotovoltaica, infatti, qualunque sia la riflettanza della superficie non otticamente attiva, la corrispondente trasmissione, intesa come frazione di luce "trasmessa" al materiale semiconduttore attivo, è nulla. In questo senso, sia una porzione trasparente di modulo che una porzione di griglia sono regioni che, ai fini della conversione fotovoltaica, non trasmettono luce al semiconduttore e quindi sono da considerare entrambe a trasmissione zero. Tenendo conto ora che, a causa della dimensione del fascio di luce, non è possibile illuminare

soltanto la superficie otticamente attiva, è necessario definire una chiara procedura di misura ed esporre la relativa interpretazione dei risultati.

Se si immagina il modulo, di area totale S , omogeneo nelle direzioni x,y (vedi Fig. 6), esso presenterà alla luce una trasmittanza media $T(\theta)$ (resta implicita la dipendenza di T anche dall'angolo azimuthale ϕ). Se si indica con $T_{oa}(\theta)$ la trasmittanza della porzione otticamente attiva del modulo e con S_{oa} la relativa superficie, si avrà facilmente:

$$\underline{I}(\theta) / \underline{I}(0^\circ) = T_{oa}(\theta) / T_{oa}(0^\circ) \quad (1) \quad \text{e inoltre:}$$

$$\underline{I}(\theta) / T_{oa}(\theta) = \underline{I}(0^\circ) / T_{oa}(0^\circ) = S_{oa} / S \quad (2)$$

La (1) dice che la trasmittanza "relativa" del modulo, preso nel suo insieme, equivale alla trasmittanza relativa della sua parte otticamente attiva. La trasmittanza relativa del modulo, come già detto, definisce le perdite ottiche relative. Per misurare il parametro $T_{oa}(\theta) / T_{oa}(0^\circ)$ conviene illuminare, a qualunque angolo di incidenza, solo quella regione della cella dove è presente la grigliatura fine (vedi Fig. 7). Si ponga ora attenzione alla regione illuminata della cella, S_{ill} , e si ponga $S_{ill} = 1 = S_{oa} + S_g$, dove S_{oa} è la frazione di area otticamente attiva e S_g è quella occupata dalla griglia. Si trova facilmente, se si trascura al momento il piccolo assorbimento della luce da parte del vetro:

$$T_{oa}(\theta) = 1 - [\underline{R}(\theta) - R_g(\theta) * S_g] / S_{oa} \quad (3) \quad \text{da cui:}$$

$$T_{oa}(\theta)/T_{oa}(0^\circ) = [S_{oa} - \underline{R}(\theta) + R_g(\theta)*S_g] / [S_{oa} - \underline{R}(0^\circ) + R_g(0^\circ)*S_g] \quad (4)$$

dove $\underline{R}(\theta)$ è la riflettanza misurata sull' area illuminata e $R_g(\theta)$ è la riflettanza della sola griglia. Ponendo realisticamente: $R_g(\theta) = R_g(0^\circ)$, si ha:

$$T_{oa}(\theta)/T_{oa}(0^\circ) = [\underline{R}(\theta) - x] / [\underline{R}(0^\circ) - x] \quad (4')$$

$$\text{dove } x \text{ vale: } x = [1 - S_g * [1 - R_g(0^\circ)]] \quad (5)$$

Le relazioni (4) e (5) forniscono la trasmittanza relativa del modulo. La S_g può essere facilmente misurata con un microscopio ottico a lunga focale. Per stimare bene la $R_g(0^\circ)$ è sufficiente fare una sola misura, ad incidenza di 0° , con il fascio di luce su uno dei "bus bar" della cella, facendo attenzione a centrare il bus bar nello spot (vedi Fig. 10). I risultati di questa misura sono indicati con un apice e i simboli rimangono inalterati. Si ottiene facilmente che:

$$R_g(0^\circ) \approx [\underline{R}'(0^\circ) - \underline{R}(0^\circ) * (\pi d^2/4 - ds)] / ds \quad (6)$$

dove "d" = diametro dello "spot" di luce ed s = spessore del bus bar.

Dalla misura sulla porzione della cella con grigliatura fine possiamo dedurre la trasmittanza assoluta della superficie otticamente attiva del modulo:

$$T_{oa}(\theta) = [1 - \underline{R}(\theta) - S_g [1 - R_g(0^\circ)] - (1 - S_g) * A_{oa}(\theta)] / [1 - S_g] \quad (7)$$

Ipotizzando trascurabile l' assorbimento del vetro, si ha:

$$T_{oa}(\theta) \approx [1 - \underline{R}(\theta) - S_g [1 - R_g(0^\circ)]] / [1 - S_g] \quad (8)$$

La trasmittanza assoluta del modulo, a sua volta, si ricava dalla relazione (1):

$$\underline{I}(\theta) = T_{oa}(\theta) * f_{oa} \quad (9)$$

dove il fattore $f_{oa} = [\underline{I}(0^\circ) / T_{oa}(0^\circ)] = (S_{oa} / S)$ equivale alla frazione della superficie otticamente attiva dell' intero modulo.

Nelle relazioni precedenti si sono trascurati due effetti dovuti alla griglia e cioè quello dell'ombreggiamento della parte otticamente attiva, prodotto per effetto del rilievo della griglia ad angoli di incidenza alti della luce trasmessa dal vetro, e quello di concentrazione, prodotto per effetto delle riflessioni della luce sul bordo della griglia, che vanno ad aumentare l'intensità della luce incidente sulla parte otticamente attiva.

Se, invece di usare la formula approssimata (8), si vuole usare quella precisa (7), occorre stimare l'assorbanza del vetro, o meglio della copertura frontale del modulo consistente negli strati vetro + EVA (trascurando qui l'effetto dello strato sottile di ARC sull'assorbimento della luce). Questa può essere misurata col presente sistema secondo la procedura seguente, simile a quella usata per la misura della riflettanza su celle (vedi Fig. 2), come verrà descritto ulteriormente nel seguito.

I risultati di misure di riflettanza in luce bianca (sorgente QTH), effettuate con un apparecchio secondo la presente invenzione su alcuni moduli commerciali al silicio cristallino e al silicio amorfo, sono riportati nelle Figure 11, 12 e 13.

In Fig. 11 la è mostrata la riflettanza, da sorgente QTH, di un modulo al silicio cristallino testurizzato. L'andamento non regolare è dovuto alla testurizzazione. Per bassi angoli, la riflettanza si aggira intorno al 10%. Misure a due diversi valori di azimuth, 90° e 180° , danno un andamento simile per effetto della simmetria della testurizzazione (vedi Fig. 9). I valori riportati in Fig. 11 sono stati

ricavati applicando la formula semplificata (8), che assume trascurabile l'assorbanza del vetro, e ponendo $R_{oa}(\theta) = 1 - T_{oa}(\theta)$. Se si prende come valore della riflettanza quello misurato direttamente sulla regione a grigliatura fine, senza fare le correzioni riportate nella relazione (8), si ottengono valori di riflettanza più alti di $\Delta R = 15\%$ circa (vedi Fig. 12) dovuti alla maggiore riflettività della grigliatura fine (circa 70% ad incidenza normale). La riflettanza QTH su moduli di mono-Si (vedere Fig. 11) è stata confrontata con quella spettrale misurata, con uno spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 9, ad un angolo di 8° su un frammento di modulo al silicio cristallino (vedere Fig. 11a). Si può notare che, per le lunghezze d'onda corrispondenti all'assorbimento del silicio cristallino (il materiale del sensore impiegato nella sfera), ovvero 300 - 1100 nm, si trova un valore prossimo al 10% e quindi molto vicino a quello ottenuto con la sfera.

Nella Figura 13 è riportata la riflettanza globale di un modulo al silicio amorfo. Si ottengono, ad angoli bassi, valori di riflettanza più alti per moduli al silicio amorfo rispetto a quelli al silicio cristallino (circa 35%). Questi valori sono in buon accordo con quanto ottenuto misurando la riflettanza spettrale di piccole celle al silicio amorfo in uno spettrofotometro (vedere Figura 13a). La riflettanza media tra 700 e 850 nm, regione spettrale di maggiore irradianza della lampada QTH, risulta in questo caso del 33% circa, quindi in accordo con i risultati sulla sfera. Per la misura sul modulo al silicio amorfo non è stato necessario apportare alcuna correzione ai dati misurati, essendo questo privo di griglia.

Le misure di assorbanza della copertura frontale del modulo, $A_{oa}(\theta)$, necessarie per applicare la formula precisa (7) e quindi dedurre i valori di $T_{oa}(\theta)$, sono descritte qui di seguito.

I campioni su cui fare le misure possono essere di diverso tipo:

a) campioni di piccole dimensioni (dell'ordine dei cm^2), preparati appositamente e costituiti da un doppio vetro contenente in mezzo uno strato di EVA di spessore doppio rispetto a quello che si trova tra vetro e cella nel modulo reale.

b) lastre di vetro di dimensioni pari a quelle del modulo, qualora non sia possibile ritagliare piccoli campioni di vetro, come nel caso a).

c) moduli in cui la copertura posteriore sia costituita da vetro. In questi moduli esistono degli spazi "morti" tra cella e cella costituiti da una semplice struttura vetro/EVA/vetro.

Nel caso di campioni di tipo a), l'assorbanza si ricava da una singola misura di "transriflettanza", come descritto di seguito (vedi anche fig. 2):

Il campione viene montato sul portacampioni 113, opportunamente modificato per lasciar passare la luce diretta della lampada 106. Prima di effettuare la misura, il portacampioni viene ruotato in modo tale che la luce della lampada non incida direttamente sul campione, ma sulla parete bianca della sfera. Si tara il valore letto di irradianza come 100% relativo e successivamente si interpone il campione sul fascio, in modo che l'incidenza sia di tipo normale (0°). La misura relativa letta sul radiometro 111 equivale ora alla somma: (R

+ T) = (1 - A'), dove A' equivale all'assorbanza dello strato vetro/EVA/EVA/vetro. L'assorbanza A dello strato vetro/EVA sarà approssimativamente $A = A' / 2$. Le misure possono essere fatte anche ad angoli di incidenza diversi da 0°, se necessario ed opportunamente elaborate per essere impiegate nella relazione (7).

Nei casi di campioni di tipo b) (lastre di vetro/EVA/vetro) o c) (modulo intero), è necessario effettuare due distinte misure: una di riflettanza, già descritta precedentemente, ed una di trasmittanza.

La misura di trasmittanza si effettua dapprima montando la lastra di vetro o il modulo sul carrello 100 (vedi fig. 14). Trattandosi di un modulo, esso va montato con la faccia anteriore opposta alla sfera integratrice 103. Il campione viene poi avvicinato alla sfera 103 in corrispondenza della finestra 105 e in modo tale che al centro della finestra 105 si trovi, nel caso del modulo, la parte "trasparente" (vetro/EVA/vetro) della struttura.

La misura di trasmittanza si differenzia da quella di riflettanza semplicemente per la posizione della sorgente di luce 106. La trasmittanza rappresenta, infatti, la frazione di luce raccolta dalla sfera, dopo che essa ha attraversato il modulo. Quindi la sorgente di luce, come mostra la fig. 14, è posta ora dietro il modulo o la lastra di vetro, in posizione opposta a quella della sfera 103. Il sistema è dotato di un supporto 116 per la sorgente luminosa 106 che viene montato sulla base della sfera, in una posizione predefinita da fori posti sulla stessa. Il supporto 116 è dotato di un movimento lungo un asse verticale Ψ passante per il centro di uno snodo 117. Questo snodo fa sì che il

supporto 116, e quindi anche la sorgente di luce 106 montata su di esso, possa essere ruotato attorno all'asse Ψ , il fascio di luce emesso dalla sorgente si trova allora ad avere un angolo di incidenza col piano del modulo (o della lastra) variabile da 0° fino ad un angolo massimo che dipende dagli ingombri tra sorgente 106 /supporto 116 e modulo 101/telaio 102.

La luce uscente dalla sorgente 106 incide il modulo (o la lastra) in corrispondenza della regione "trasparente", ad un angolo di incidenza opportuno, attraversa il campione ed entra nella sfera integratrice. La frazione di luce che entra nella sfera, misurata tramite il rivelatore 110 ed il radiometro 111, rappresenta la trasmittanza globale dello strato, $T(\theta)$, ad un particolare angolo di incidenza θ . Il sistema si presta anche a misure di trasmittanza diffusa, oltre che globale. Per avere la trasmittanza diffusa dello strato in esame, $T_{diff}(\theta)$, basta aprire una delle finestre 109 (vedi fig. 1b)), quella corrispondente al fascio trasmesso diretto e montare l'assorbitore di luce. Questa ulteriore possibilità di misura della trasmittanza ha una importanza paragonabile a quella della misura della componente diffusa della riflettanza. La misura della trasmittanza diffusa fornisce informazioni importantissime sullo stato di rugosità delle interfacce che fanno parte della struttura esaminata. E' sufficiente citare il fatto che, normalmente, lo strato di vetro viene trattato su una faccia per migliorare la raccolta di luce esterna. Questo trattamento rende rugosa la faccia del vetro e la conseguenza sulle sue proprietà ottiche è sintetizzata dalla misura di trasmittanza diffusa, ad angolo di incidenza variabile.

Una volta nota la grandezza $T(\theta)$, e conoscendo la grandezza $R(\theta)$ in quanto già misurata, si può ottenere l'assorbanza dello strato "trasparente" dalla semplice formula:

$$A(\theta) = 1 - T(\theta) - R(\theta).$$

La sorgente di luce impiegata nelle misure di trasmittanza può essere sia di tipo bianco (QTH o Xenon) che di tipo laser. La sorgente laser presenta soprattutto il vantaggio di avere un fascio ben collimato (≤ 1 mm) che permette di fare la misura su regioni molto ristrette del campione. Questo vantaggio è fondamentale quando si fa la misura sul modulo, nel quale gli interstizi tra cella e cella possono essere molto stretti (pochi mm) e quindi richiedono un fascio altrettanto stretto. Misure di trasmittanza sono state fatte con l'apparato della presente invenzione sia su piccoli campioni di modulo, che su moduli interi. In fig. 15 è mostrata la trasmittanza, in funzione dell'angolo di incidenza, per un frammento di modulo di silicio cristallino. La misura naturalmente si riferisce ad una zona del campione dove è presente solo la struttura vetro/EVA/vetro. Si può notare che $T(\theta)$ diminuisce al crescere di θ , soprattutto per effetto della maggiore perdita di luce per riflettanza che si ha ad alti angoli di incidenza. In fig. 16 è mostrata invece la $T(\theta)$ per un modulo intero con copertura a doppio vetro (misurati due punti diversi dello stesso modulo). Per effetto degli ingombri, la misura termina a 55° . In entrambi i casi la misura è stata effettuata con luce laser He-Ne ($\lambda=633$ nm, colore rosso). Combinando questa misura con quella di riflettanza, siamo in grado di

fornire il dato di assorbanza della copertura di un modulo FV, effettuata con un metodo non distruttivo:

$R(0^\circ) = 8.3\%$; $T(0^\circ) = 85.6\%$; e quindi: $A'(0^\circ) = 6.1 \%$.

$A'(0^\circ)$ si riferisce allo strato vetro/EVA/EVA/vetro. Per lo strato anteriore del modulo (vetro/EVA) possiamo allora dedurre un'assorbanza di:

$A(0^\circ) \approx A'(0^\circ) / 2 = 3 \%$.

In conclusione, è stata proposta una nuova tecnica per la misura non distruttiva della riflettanza di moduli fotovoltaici e celle solari. La tecnica è basata sull'impiego di una sfera integratrice che raccoglie ed integra tutta la luce riflessa dal modulo o dalla cella quando essi sono illuminati con un fascio di luce bianca o monocromatica ad un angolo di incidenza ed un angolo di azimuth opportuni. La misura della riflettanza, sia dei moduli che delle celle incapsulate, effettuata scegliendo opportunamente la zona da illuminare, dà una misura approssimativa della trasmittanza del modulo o della cella incapsulata ma precisa di una cella non incapsulata. La misura precisa della trasmittanza di un modulo o di una cella incapsulata può essere ottenuta conoscendo l'assorbanza dello strato frontale "trasparente". Questa assorbanza può essere ricavata in due modi diversi: su campioni di piccole dimensioni può essere dedotta da misure di "transriflettanza"; sulle lastre di vetro originali, o in alcuni casi sul modulo intero, può essere ricavata da misure combinate di riflettanza e di trasmittanza. Il confronto tra i dati di riflettanza ottenuti con il presente sistema e quelli misurati allo spettrofotometro su

campioni simili dimostra che i dati ottenuti con il presente sistema sono più che attendibili. Il sistema in argomento, quindi, unico e semplice, simula in laboratorio le perdite ottiche sia assolute che relative alle condizioni di incidenza normale che il modulo fotovoltaico sperimenta quando è installato all'esterno.

I principali vantaggi che il presente sistema di misura offre rispetto allo stato dell' arte attuale sono riassunti di seguito:

- è economico in quanto consta, nella configurazione minimale, soltanto di un sostegno per moduli, una sfera integratrice, una sorgente di luce bianca, di un rivelatore ed un radiometro. Non è indispensabile né il banco ottico, né l' oscuramento del laboratorio;

- la tecnica non è distruttiva: qualsiasi campione, di qualsiasi dimensione, può essere posto davanti alla finestra d' ingresso della sfera e sottoposto a misura di riflettanza. Non è necessario alcun taglio di materiali. Campioni invece già piccoli, perché così realizzati per altri motivi, possono essere misurati all' interno della sfera, con il vantaggio di poter regolare l' angolo di incidenza del fascio in maniera continua da 0° a circa 90°;

- scegliendo opportunamente la zona di misura, si può pervenire rapidamente alla riflettanza del modulo, con una approssimazione del 10-20 % nel caso di moduli al silicio cristallino, ma con precisione molto maggiore nel caso di moduli al silicio amorfo. Con misure più accurate e applicando le semplici formule riportate nel testo, si perviene ad una valutazione più accurata della riflettanza e della trasmittanza;

- l' apparecchiatura è estremamente versatile e può essere impiegata per misure di trasmittanza e di transriflettanza su superfici semitrasparenti di materiali impiegati in campo fotovoltaico e non;
- la possibilità di misurare sia la riflettanza che la trasmittanza diffuse rendono questo strumento importantissimo per l'analisi delle proprietà ottiche di strutture in cui siano presenti interfacce e superfici rugose;
- la tecnica è estremamente semplice dal punto di vista operativo;
- la tecnica permette lo studio della riflettanza di superfici complesse, difficilmente modellabili dal punto di vista ottico, e molto importanti in campo fotovoltaico;
- si possono effettuare misure di riflettanza, trasmittanza e transriflettanza, dove la riflettanza e la trasmittanza possono essere globale e diffusa. Da queste grandezze si può pervenire all'assorbanza di qualsiasi strato.

L'apparecchiatura secondo la presente invenzione e finora descritta consta soltanto di componenti essenziali e di basso costo. Versioni più sofisticate possono essere realizzate sulla base degli stessi principi per migliorare la precisione delle misure ed accelerare i tempi di misura. Le parti suscettibili di miglioramento sono le ottiche di ingresso, le parti di movimentazione meccanica e di puntamento del fascio. Possono essere migliorate le tenute di luce, soprattutto ad angoli di incidenza alti. Con l'attuale versione dell'apparecchiatura si possono effettuare misure ottiche ad angoli di incidenza tra 0° e 70° , con intervalli di 10° . Questo intervallo di valori può essere esteso ad

angoli di 80°, realizzando una sfera integratrice con diametro maggiore degli attuali 40 cm.

Realizzando una sfera con una feritoia equatoriale come finestra di ingresso, anziché con finestre singole sui vari angoli, si potrebbero effettuare misure continue sull'angolo di incidenza.

L'apparecchiatura, inoltre, si presta ad essere migliorata nella parte di sorgente di luce impiegando lampade QTH a potenza regolabile o lampade a lampo. Le lampade a lampo sarebbero indispensabili in una eventuale versione portatile dell'apparecchiatura. Anche lampade allo xenon possono essere utilizzate in quanto simulano meglio la luce solare. La parte di misura della luce riflessa può essere migliorata (attualmente è impiegato un fotodiodo al silicio) installando, ad esempio, uno spettrofotometro a schiera di diodi per misure spettrali. Altri accessori utili che potrebbero aggiungersi al modello di base sono una sfera integratrice più piccola ($d = 15 - 20$ cm), da collegare a quella esistente, che permette di effettuare simultaneamente misure di riflettanza e di trasmittanza su campioni semitrasparenti di piccole dimensioni.

In quel che precede sono state descritte le preferite forme di realizzazione e sono state suggerite delle varianti della presente invenzione, ma deve essere chiaro che gli esperti nel ramo potranno apportare modificazioni e cambiamenti senza con ciò uscire dall'ambito di protezione della presente privativa industriale.

Riferimenti:

- [1] H. Gabler, M. Raetz, E. Wiemken, "Analytical Evaluation of the performance of Realized Photovoltaic Systems", 12th EPSEC, Amsterdam, The Netherlands, 11 - 15 April 1994.
- [2] IEC Standards 891 and 1215, Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève.
- [3] R.L. Hulstrom, R.E. Bird, C.J. Riordan, "Spectral Solar Irradiance Data Sets for Selected Terrestrial Conditions" Solar Cells 15(1985)365-91.
- [4] S. Krauter, R. Hanitsch, P. Campbell, S.R. Wenham, "Optical Modelling, Simulation and Improvements of PV Module Encapsulations", 12th EPSEC, Amsterdam, The Netherlands, 11 - 15 April 1994.
- [5] R. Preu, G. Kleiss, K. Reiche, K. Bucher, "PV-Module Reflection Losses: Measurement, Simulation and Influence on Energy Yield and Performance Ratio", 13th EPSEC, Nice, France, 23-27 October 1995.
- [6] E.A. Sjerps-Koomen, E.A. Alsema and W.C. Turkenburg, "A Simple Model for PV Module Reflection Losses under Field Conditions", Solar Energy, 57(1996)421.
- [7] W.L. Bailey, M.G. Coleman, C.B. Harris and I.A. Lesk, U.S. Patent 4,137,123, January 1979.
- [8] F. Lipps, A. Zastrow, K. Bucher, "I-V Characteristics of PV-Modules with a msec Flash Light Generator and a 2 Mhz Data Acquisition System", 13th EPSEC, Nice, France, 23-27 October 1995.
- [9] S. Li Causi, C. Messana, G. Novello, A. Parretta, A. Sarno, "Performance analysis of Single Crystal Silicon Modules in Real Operating Conditions", 13th EPSEC, Nice, France, 23-27 October 1995.
- [10] ASTM E903-82, "Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres".
- [11] S. Krauter, R. Hanitsch, Proc. of the ISES World Congress (1993).
- [12] S Krauter, R. Hanitsch, P. Campbell, S.R. Wenham, 12th EPSEC, Amsterdam, The Netherlands, 11 - 15 April 1994

RIVENDICAZIONI

1.- 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, comprendente: un supporto (100), poggiato sul pavimento e dotato di ruote, che sostiene un modulo (101), fissato su un telaio (102) traslabile su due assi ortogonali x-y e girevole attorno ad un asse perpendicolare (z) in modo tale che il modulo stesso possa essere orientabile da 0° a 360° (angolo di azimuth) rispetto al piano di incidenza di un fascio luminoso di misura; una sfera integratrice (103), posta su un banco ottico (104), dotata di una finestra (105) su cui viene affacciato il modulo a tenuta di luce esterna; una o più sorgenti di luce (106) posizionabili in corrispondenza di una pluralità di finestre con ottiche di ingresso (107) predisposte lungo una linea equatoriale della sfera e tali da focalizzare il fascio di luce esattamente sulla porzione del modulo da misurare; un obliò (108) per traguardare il punto di misura; una pluralità di finestre (109) per l' assorbimento della componente speculare, da aprire solo per la misura della componente diffusa; di un rivelatore al silicio (110) associato a detta sfera (103) ed un radiometro (111); nonché filtri (112) posti davanti al rivelatore per selezionare una banda determinata della luce riflessa e quindi per misurare la riflettanza spettrale del modulo.

2.- Dispositivo secondo la rivendicazione 1 ulteriormente comprendente, per misure di sola riflettanza globale su celle di piccole dimensioni, un portacampioni (113), posizionato all'interno della sfera (103) attraverso una testa (115) girevole intorno ad un asse verticale (ξ ,) e recante

la cella da misurare (114), in modo tale che detta cella si trovi al centro della sfera stessa.

3.- Dispositivo secondo una delle rivendicazioni 1 e 2, caratterizzato dal fatto che detta sorgente di luce (106) emette luce bianca, luce monocromatica non coerente o luce laser.

4.- Dispositivo secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che detta sorgente di luce è costituita da una lampada QTH (Quartz Tungsten Halogen), oppure una lampada allo Xenon montata in un contenitore metallico trasportabile attraverso un manico termicamente isolato e può essere alimentata sia in maniera continua che in maniera intermittente.

5.- Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 - 4, caratterizzato dal fatto che, per misurare l'angolo di azimuth, il supporto (110) è dotato di un goniometro e per lo spostamento x-y di un meccanismo di traslazione fine.

6.- Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 - 5, caratterizzato dal fatto che detta sfera integratrice (103) è provvista di una finestra (105) sulla quale viene poggiato il modulo sotto misura (101), a tenuta di luce, detta finestra (105) avendo dimensioni che possono variare a seconda del tipo di misura e del tipo di sorgente usata.

7.- Dispositivo secondo la rivendicazione 6, caratterizzato dal fatto che detta finestra (105) è generalmente circolare.

8.- Dispositivo secondo la rivendicazione 6, caratterizzato dal fatto che detta finestra (105) è formata come una fenditura atta ad esporre alla sfera soltanto la parte illuminabile del modulo.

9.- Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 - 8 caratterizzato dal fatto che dette finestre di ingresso (107) per il fascio di luce sono distanziate di 10° , per angoli di incidenza da 0° fino al limite massimo consentito dalle dimensioni della sfera.

10.- Dispositivo secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che ad ogni finestra di ingresso è associato un sistema ottico a lenti per focalizzare il fascio di luce sul piano del modulo.

11.- Dispositivo secondo la rivendicazione 10, caratterizzato dal fatto che le finestre (109) di assorbimento della componente speculare sono simmetriche alle finestre (107) di ingresso del fascio.

12.- Dispositivo secondo la rivendicazione 11, caratterizzato da fatto che, per la misura della riflettanza globale, dette finestre (109) di assorbimento della componente speculare sono coperte con tappi bianchi riflettenti e, per la misura della riflettanza diffusa, la finestra (109) corrispondente all'angolo di incidenza di misura è coperta da un assorbitore di luce per la componente speculare.

13.- Dispositivo secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che dette finestre di ingresso sono realizzate come unica fenditura equatoriale con eventuale schermatura mobile per realizzare una finestra in posizione continuamente variabile.

Roma, - 5 NOV. 1997

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

ING. BARZANÒ & ZANARDO ROMA S.p.A.

TA

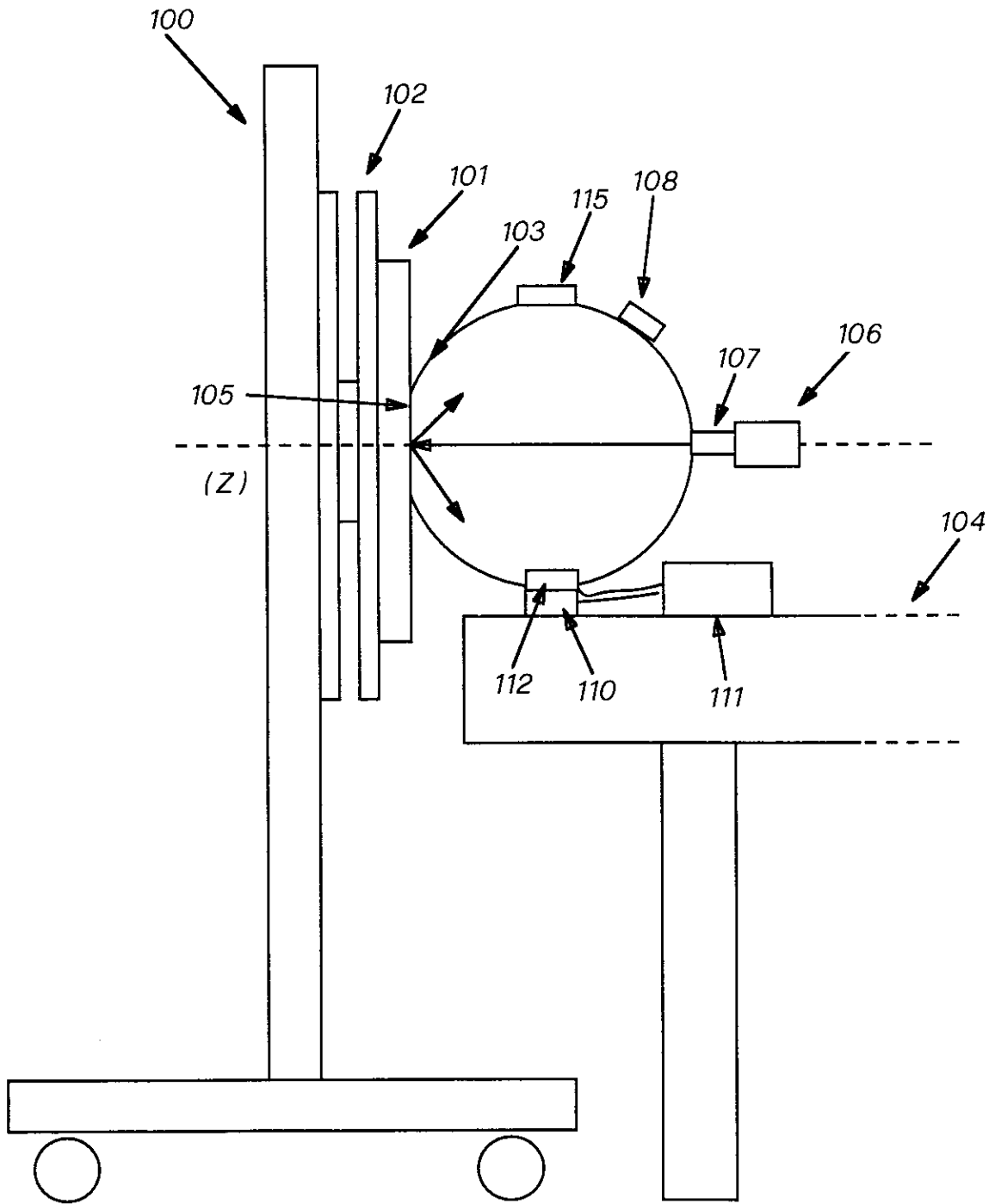


FIG. 1a

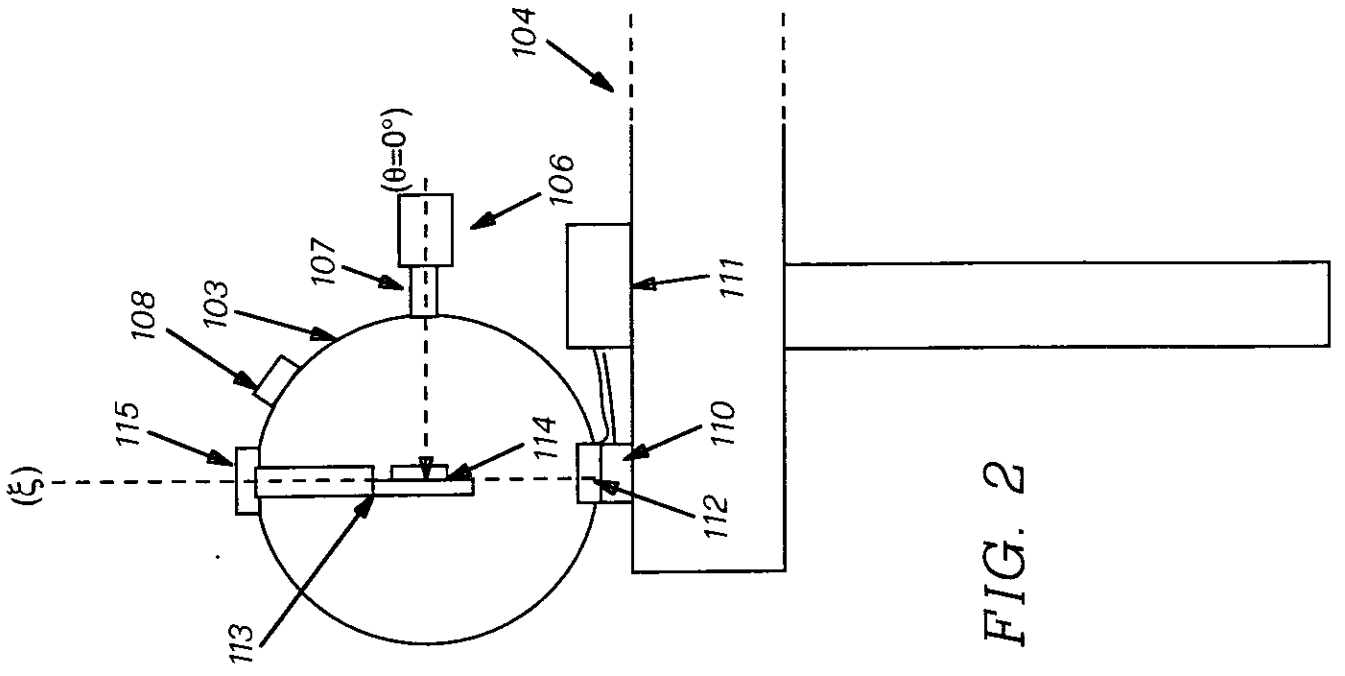


FIG. 2

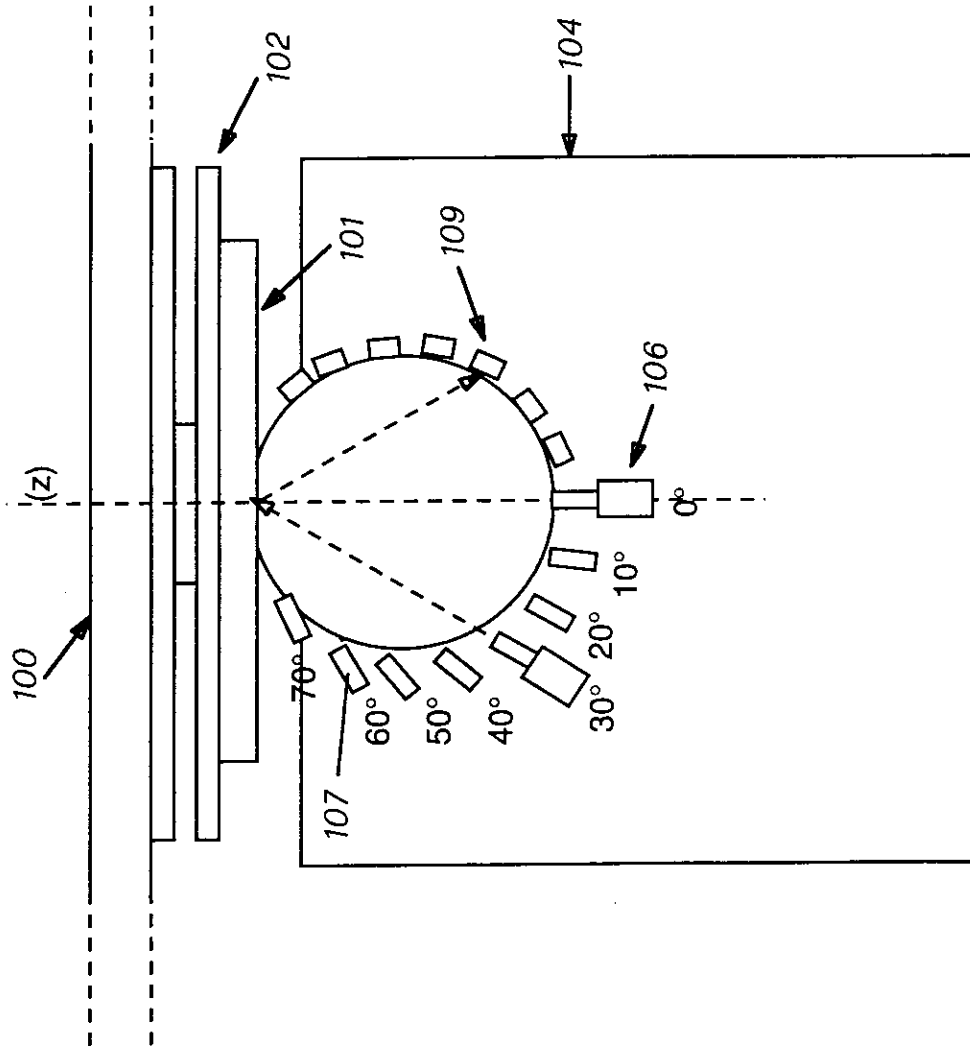


FIG. 1b

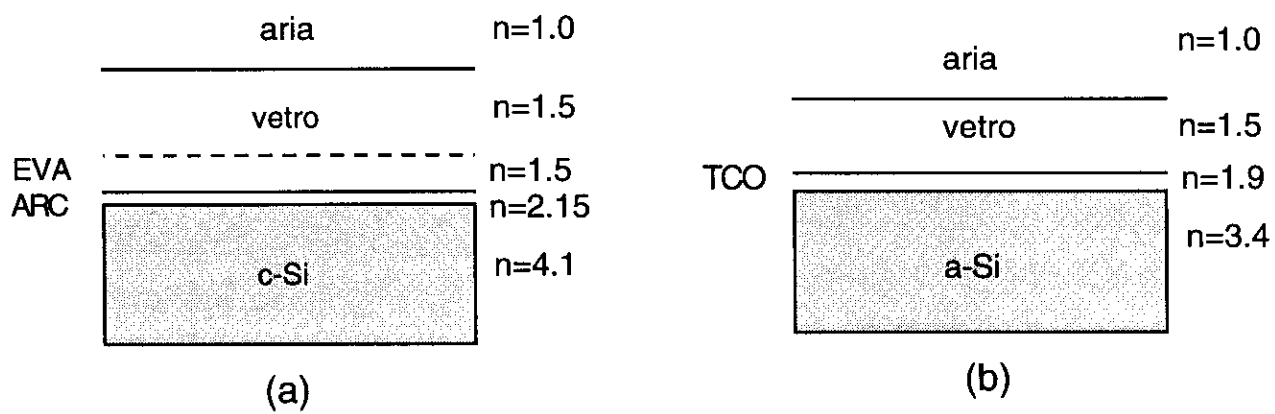


FIG. 3



FIG. 4

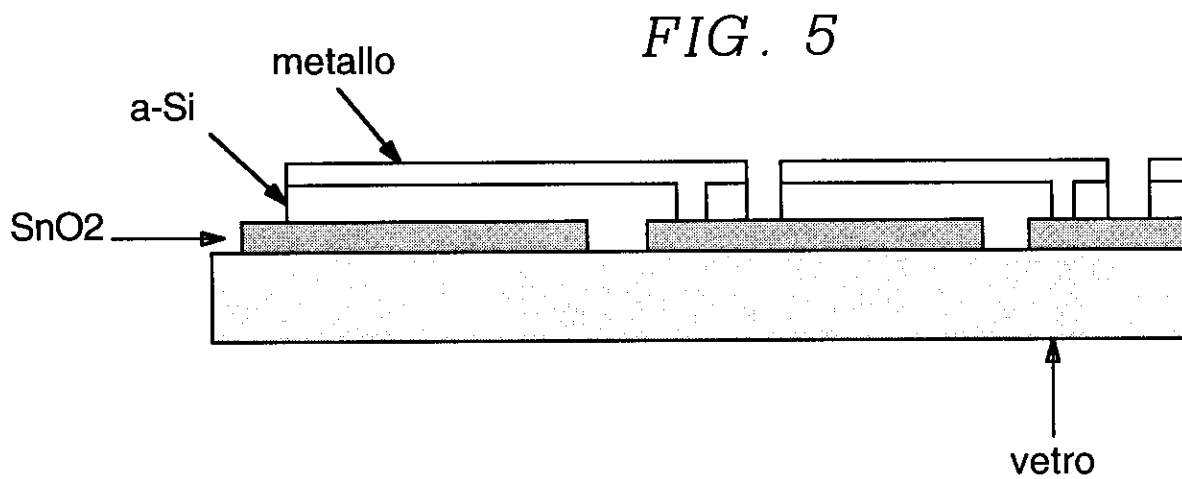


FIG. 5

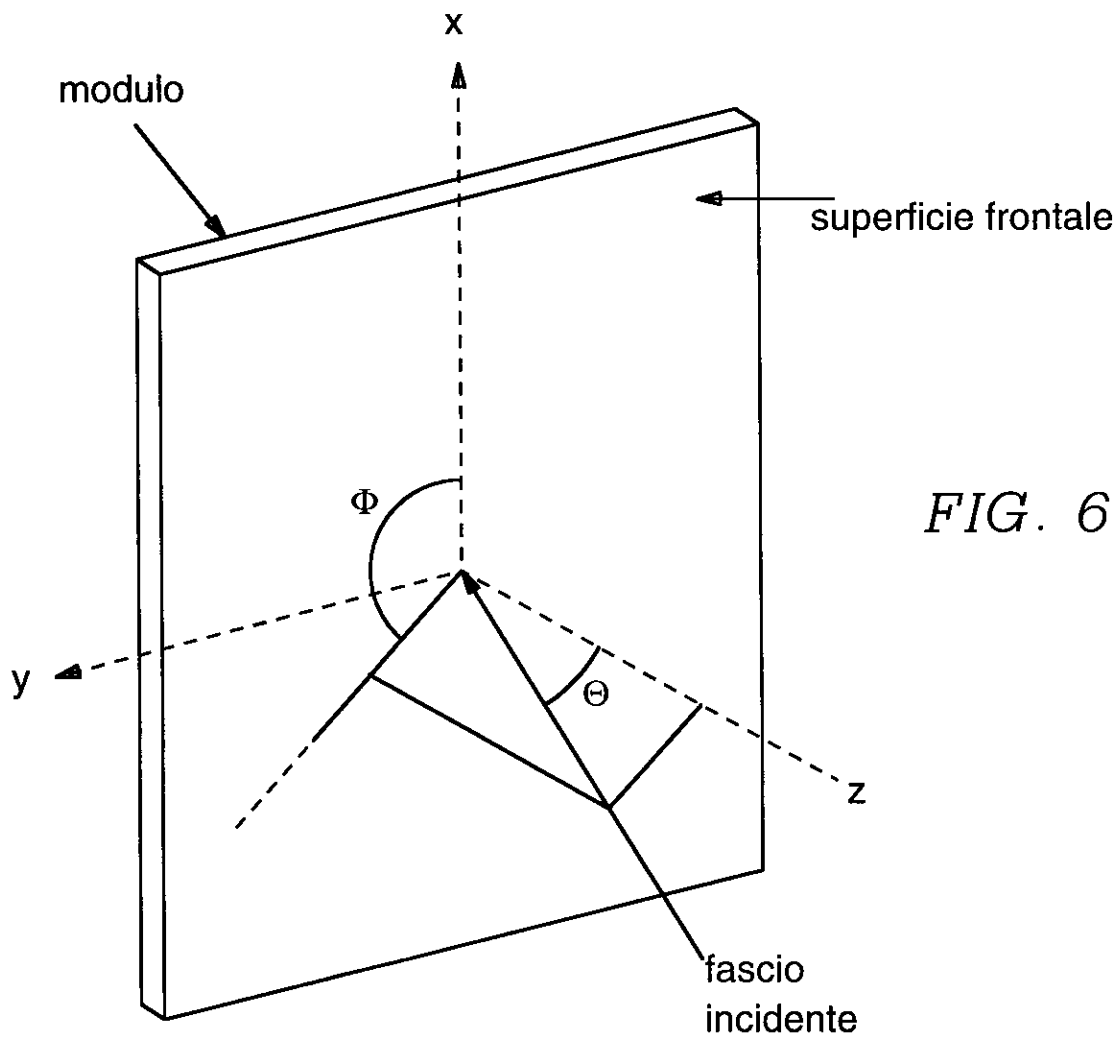
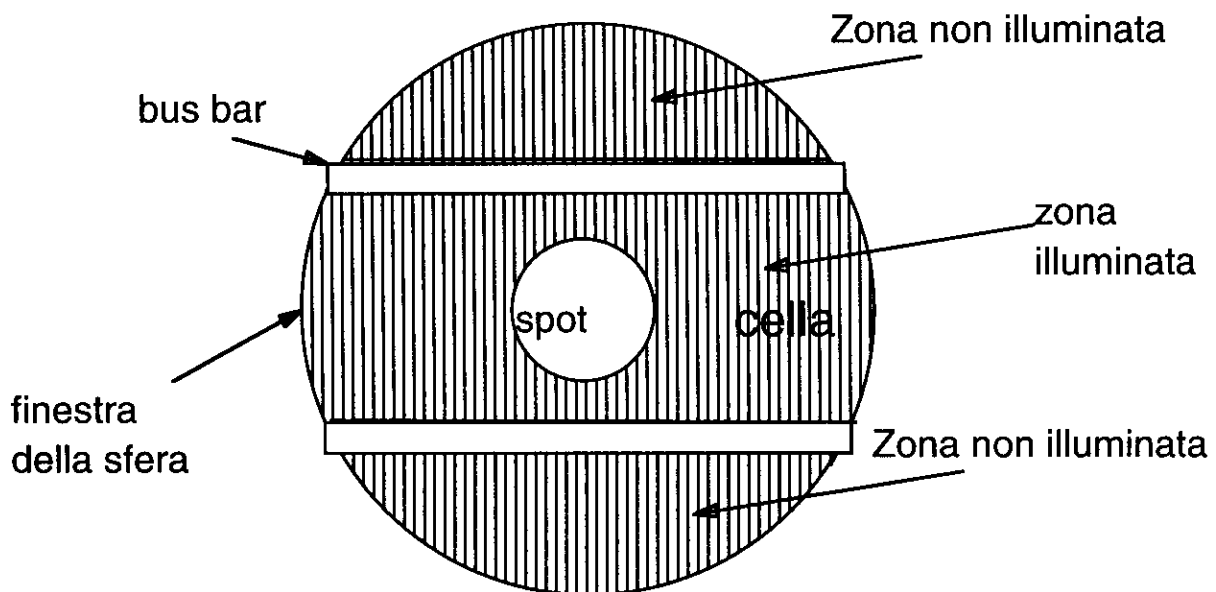


FIG. 6

FIG. 7



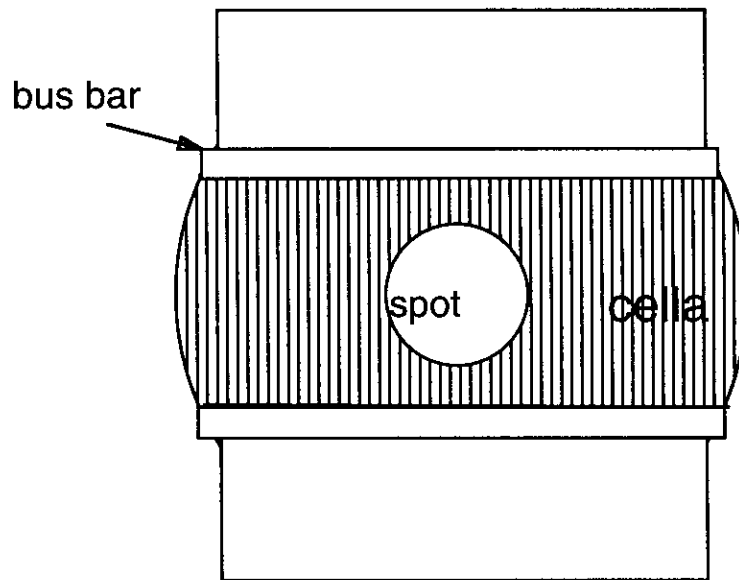


FIG. 8

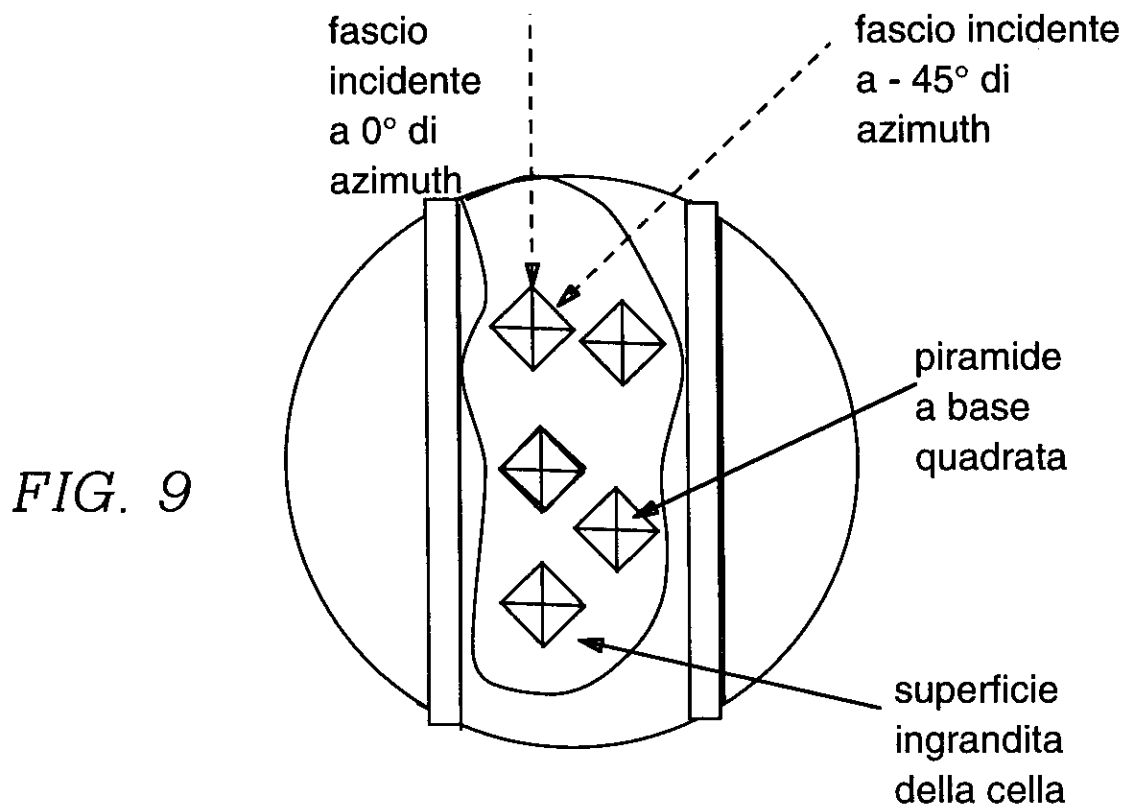


FIG. 9

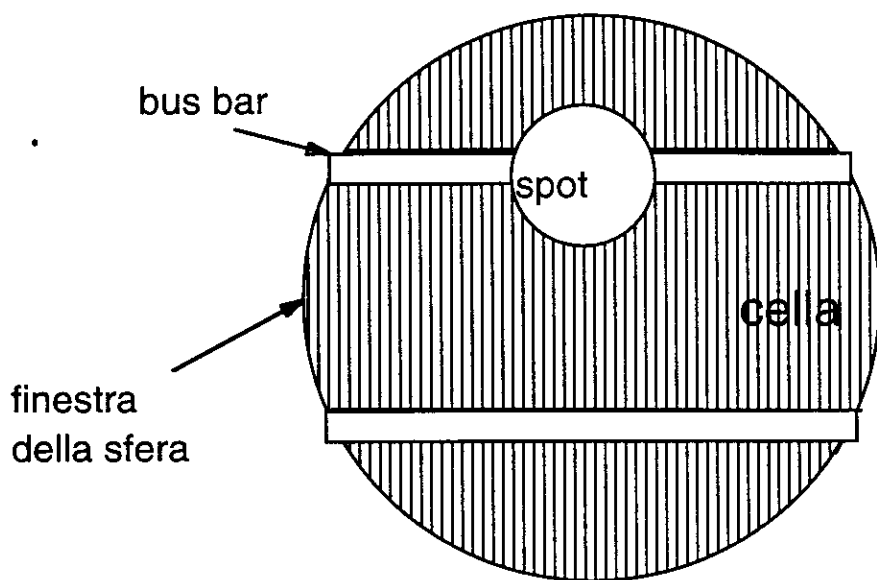
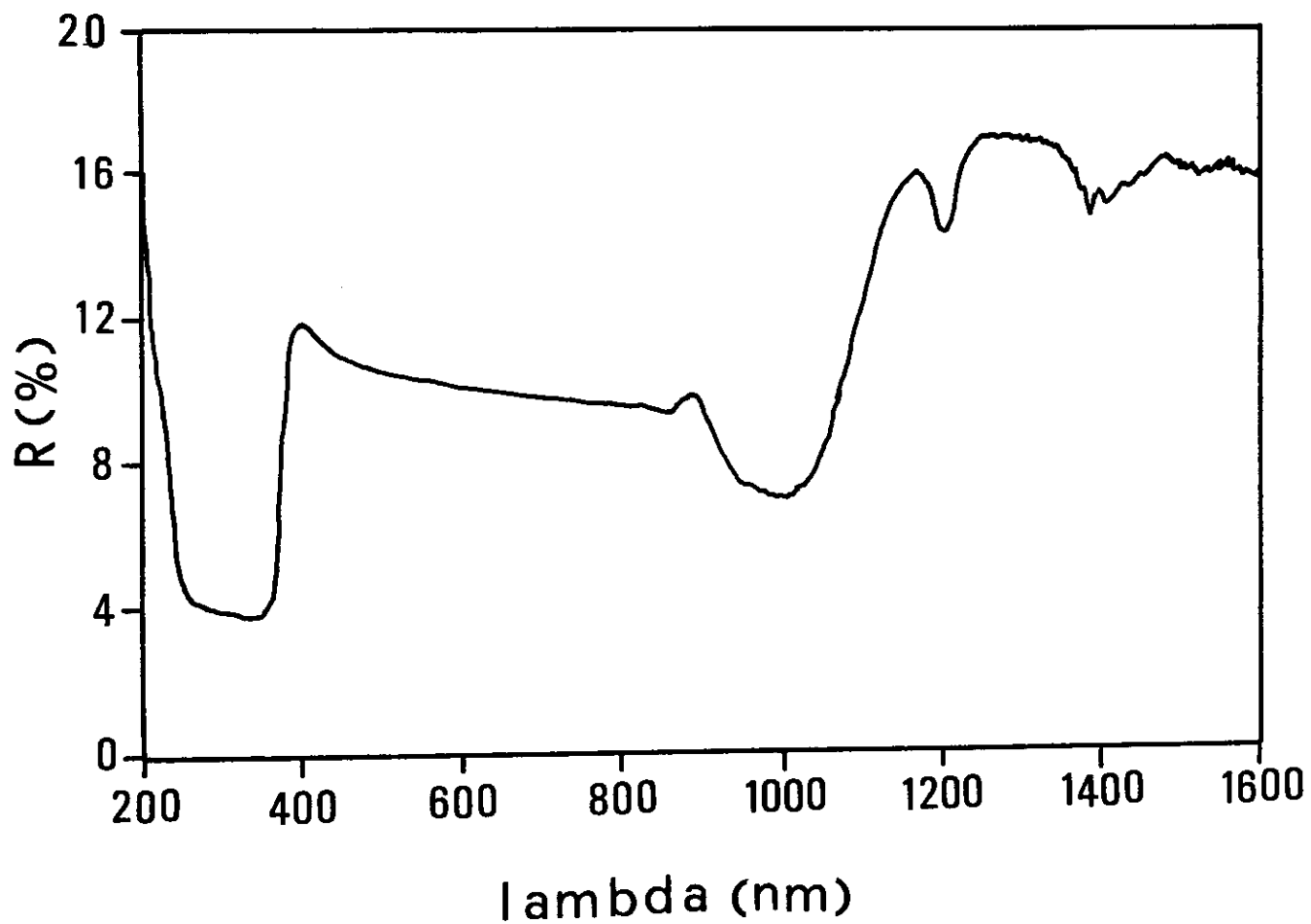


FIG. 10

FIG. 11a



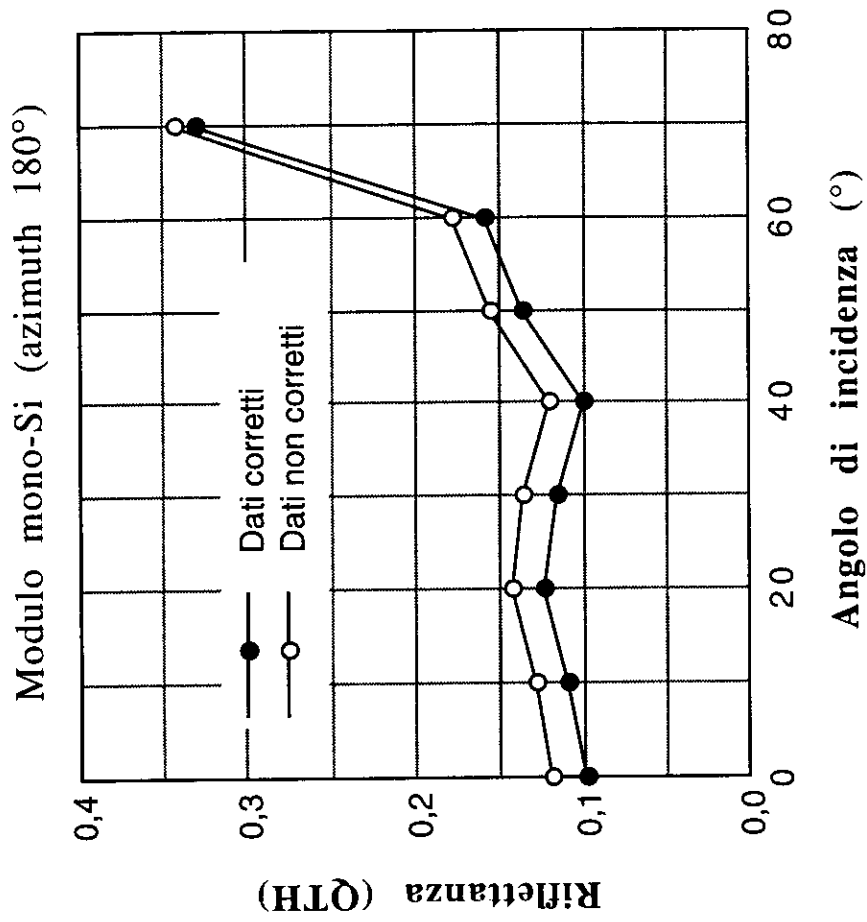


FIG. 12

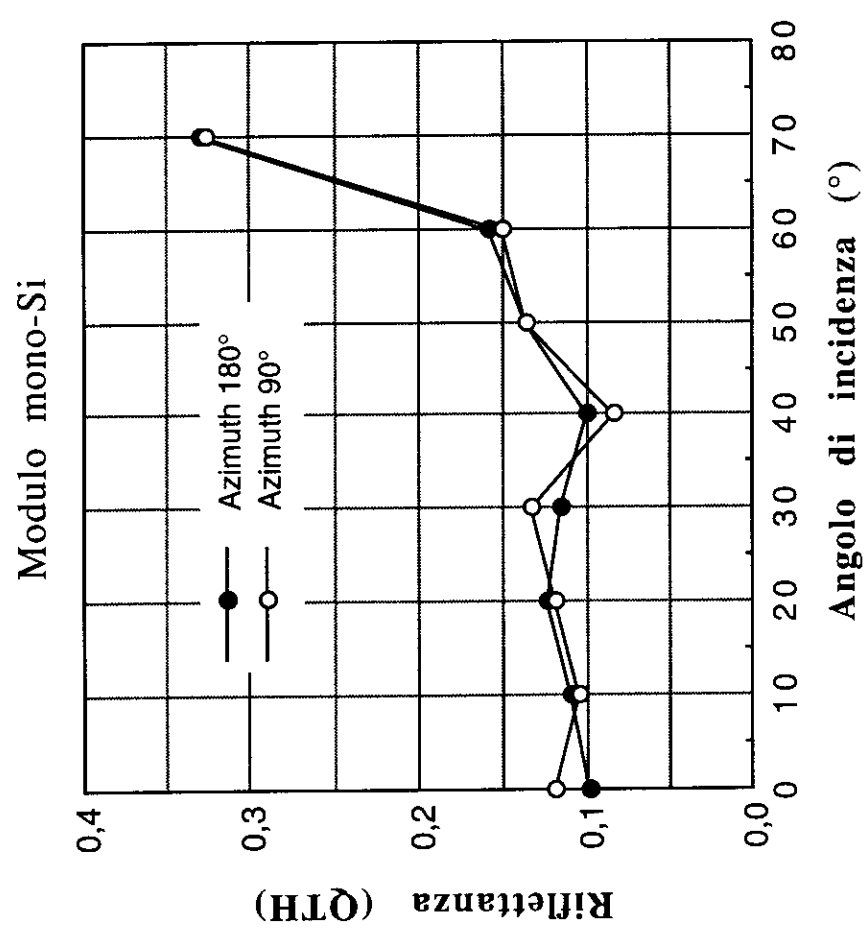


FIG. 11

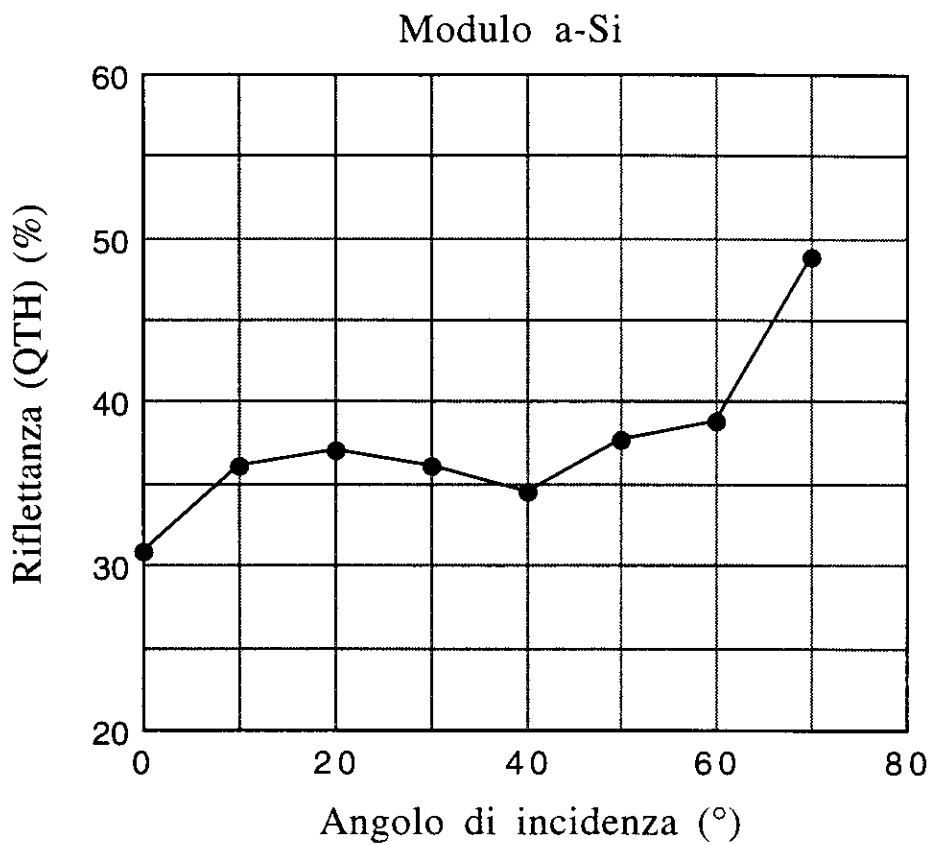
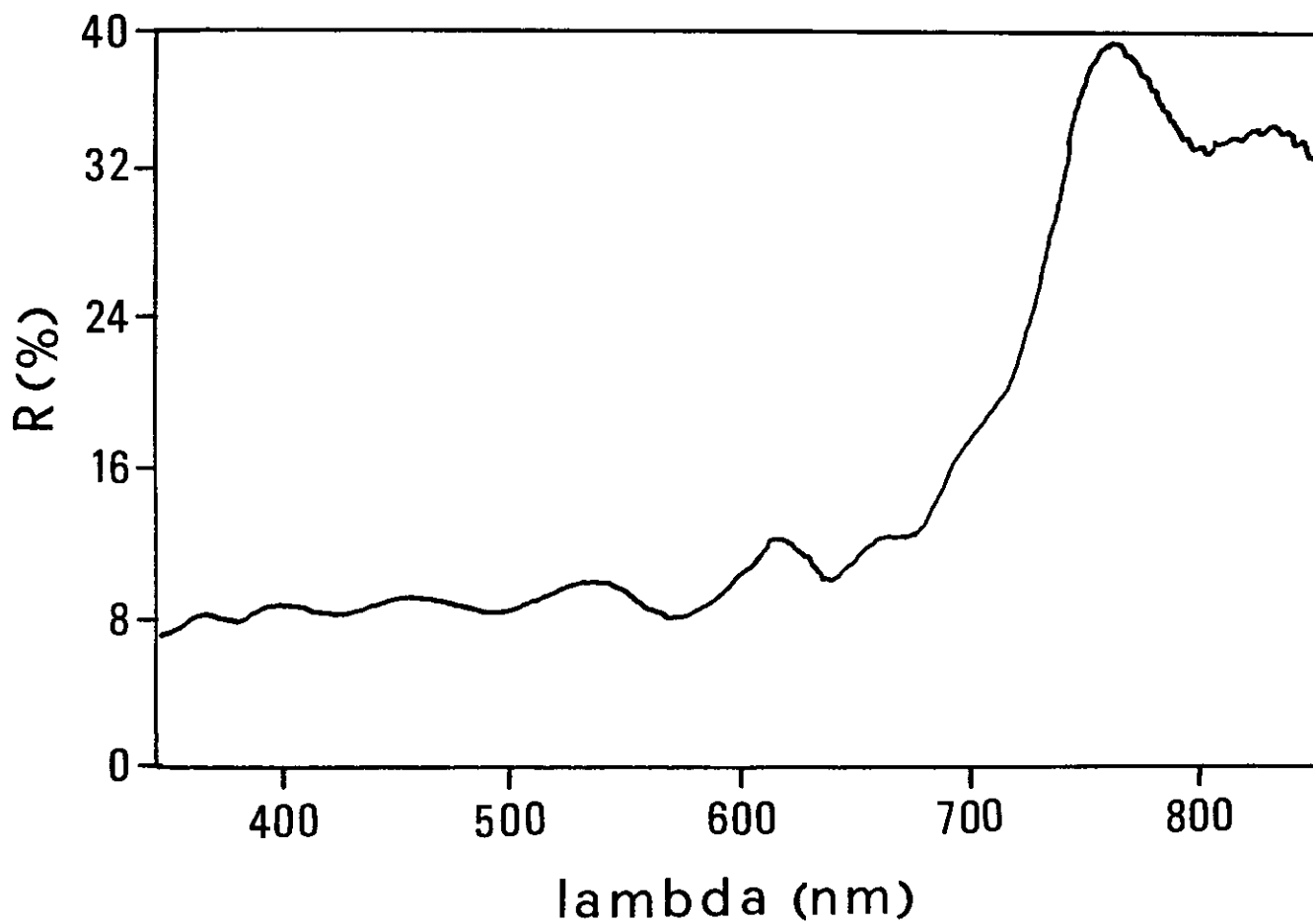


FIG. 13

FIG. 13a



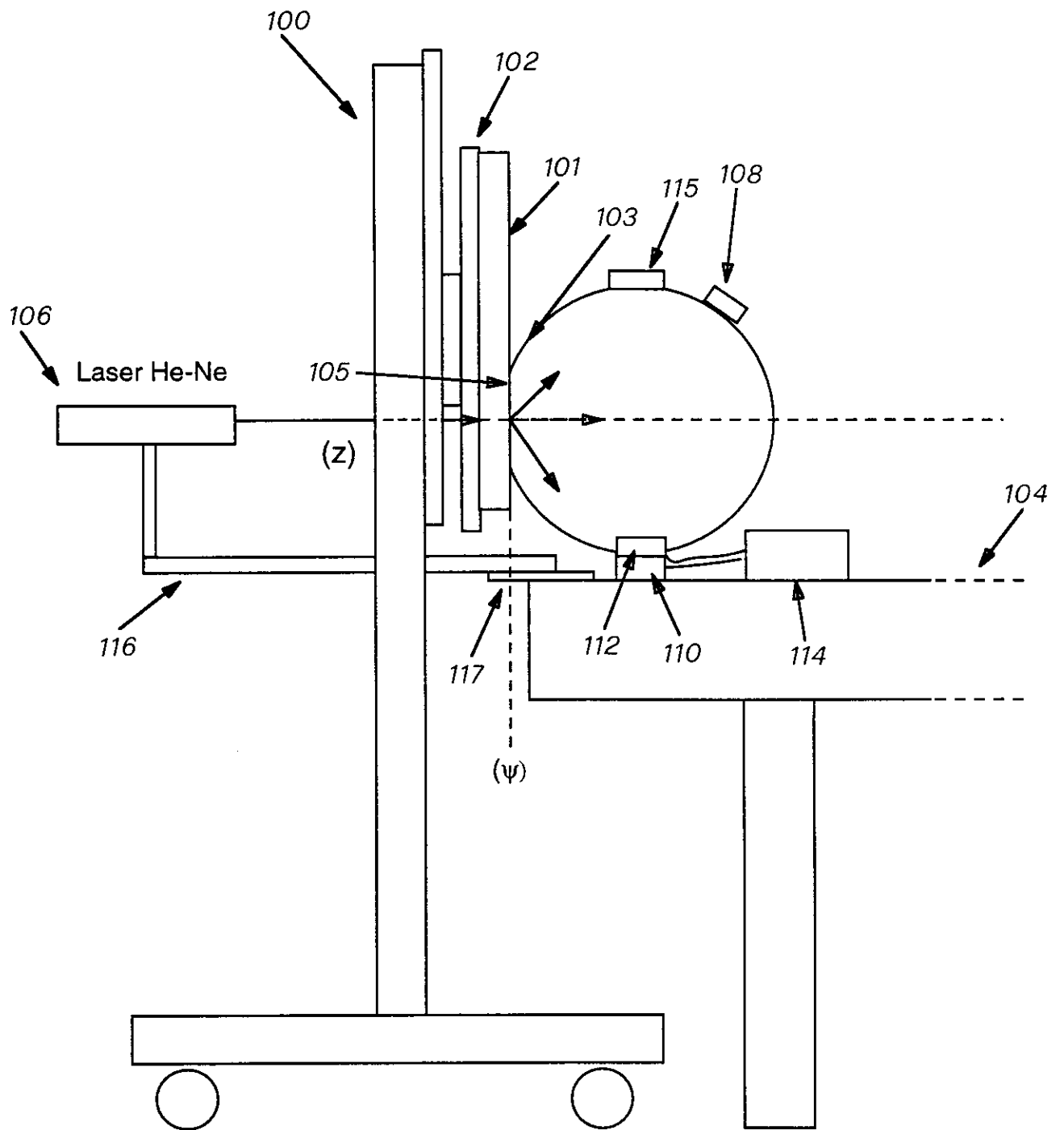


FIG. 14

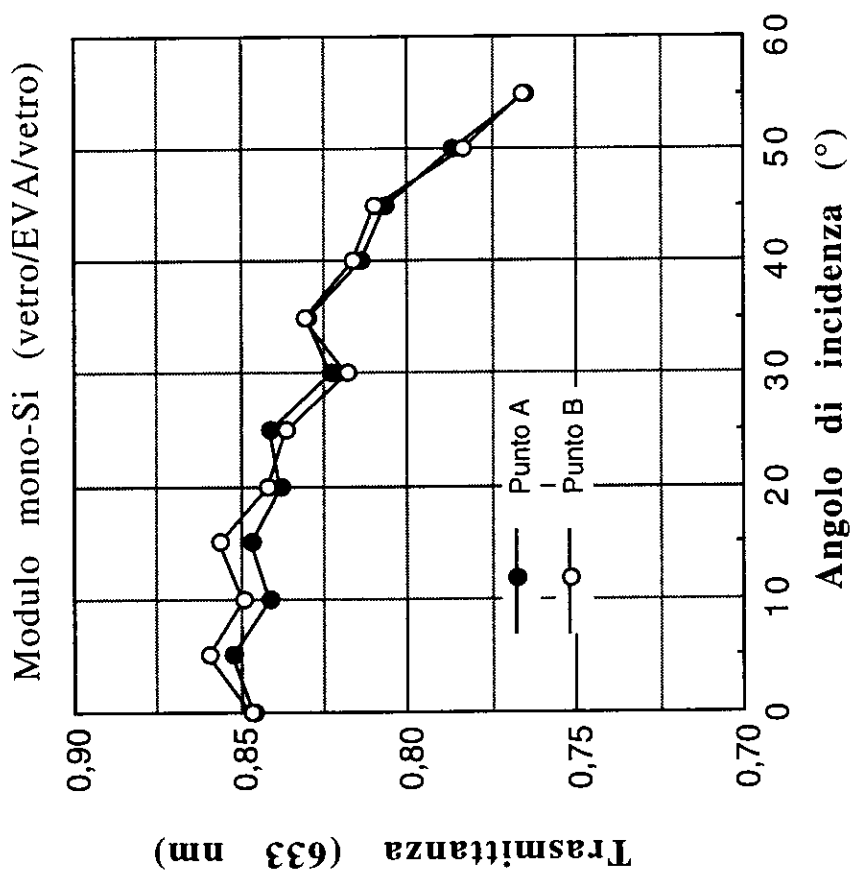


FIG. 16

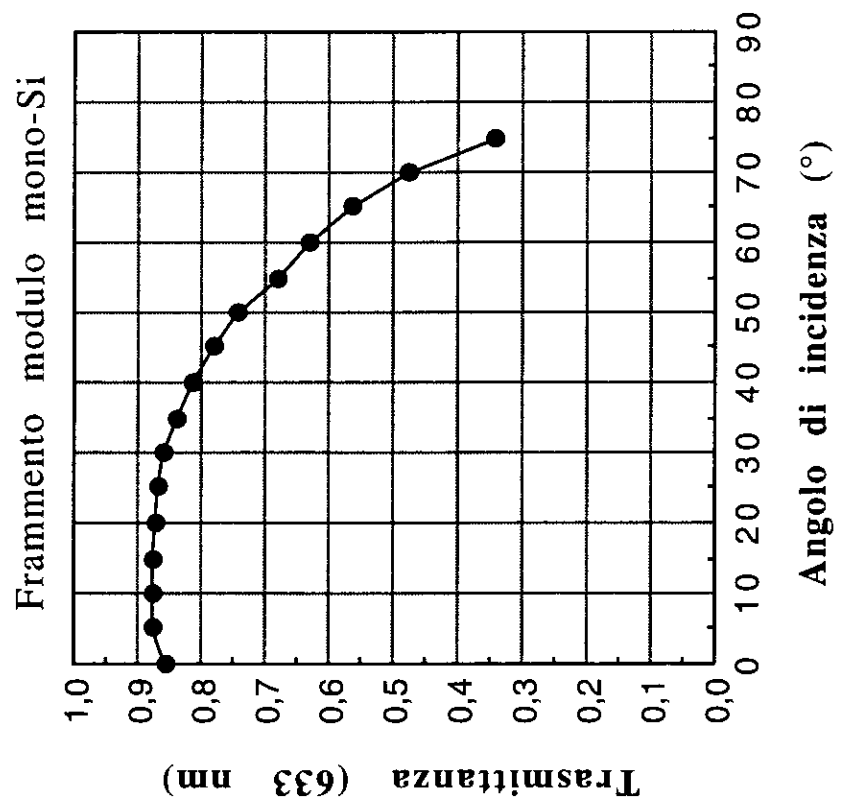


FIG. 15