

RIASSUNTO INVENZIONE CON DISEGNO PRINCIPALE

PROSPETTO A

NUMERO DOMANDA

REG. A

DATA DI DEPOSITO 08/06/2001

NUMERO BREVETTO

DATA DI RILASCIO

A. RICHIEDENTE(I)

- 1) Denominazione
- 2) Denominazione

D. TITOLO

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

(gruppo/sottogruppo)

L. RIASSUNTO

La presente invenzione si riferisce ad un apparato ed un metodo per la misura simultanea della corrente e della riflettanza di un dispositivo fotovoltaico. L'apparato consente di variare con continuità l'angolo di incidenza della luce da 10° a ~ 80°, mentre un fascio di riferimento incide su uno standard di riflettanza ad un angolo fisso, pari ad 8°. Il confronto tra la luce riflessa dal campione e quella riflessa dallo standard fornisce il valore della riflettanza del campione. Nel contempo, la corrente prodotta nel campione dalla luce incidente diretta può essere calcolata misurando la corrente totale prodotta dal dispositivo e sottraendovi il contributo derivante dall'illuminazione diffusa prodotta nella sfera dal campione stesso. La misura simultanea di corrente e di riflettanza di una cella solare consente di derivarne la risposta spettrale interna con una precisione superiore a quella raggiungibile attraverso le misure separate delle due grandezze.

M. DISEGNO

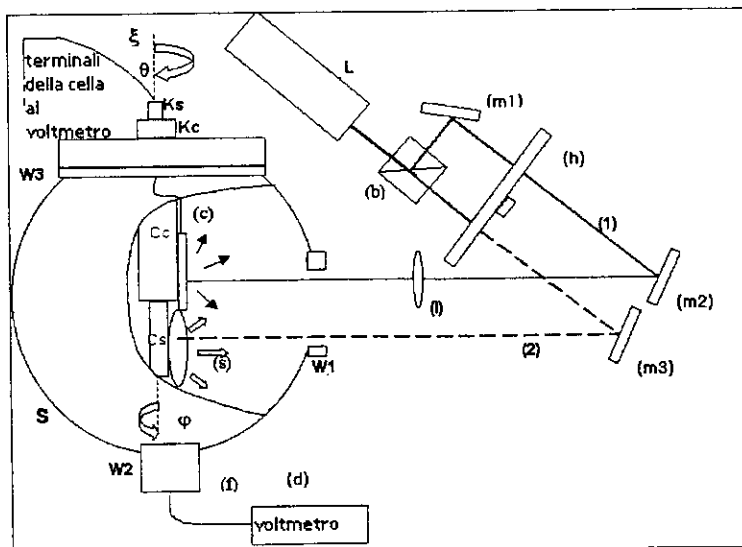


Fig. 1

DESCRIZIONE

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

“APPARECCHIO E METODO PER LA MISURA SIMULTANEA DELLA CORRENTE E DELLA RIFLETTANZA DI UNA CELLA SOLARE “

a nome: 1) ENEA – Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente,

2) INFM – Istituto Nazionale per la Fisica della Materia

Inventori: TORTORA Pierpasquale, MADDALENA Pasqualino, PARRETTA Antonio

La presente invenzione si riferisce in linea generale agli apparati ed ai metodi per la caratterizzazione ottica ed elettrica di dispositivi fotovoltaici (FV) e concerne, in modo particolare, un apparato ed un metodo per la misura simultanea della corrente e della riflettanza di un dispositivo fotovoltaico.

Le misure separate della corrente e della riflettanza di un dispositivo FV, eseguite in funzione dell'angolo di incidenza del fascio luminoso, possono essere effettuate agevolmente ricorrendo alla strumentazione nota dalla letteratura [1-3]. Per quanto riguarda la misura della riflettanza, è possibile utilizzare un riflettometro per angoli di incidenza della luce variabili, realizzato tramite una sfera integratrice di dimensioni tali da poter calare al suo interno, sorretto da un portacampioni rotabile, il campione su cui si intende effettuare la

misura. La Figura 2 mostra una tipica configurazione di questo apparato. Attraverso una delle porte della sfera, un fascio di luce viene focalizzato sulla superficie del campione (c), il quale è adagiato su un portacampioni rotabile (p). La luce riflessa dal campione viene diffusa dalle pareti della sfera ed il fotodiiodo (d), presente all'interno della stessa, produce un segnale proporzionale all'intensità della radiazione diffusa. Indichiamo con $V_c(\theta, \lambda)$ il segnale prodotto dal fotodiiodo quando la luce incide ad un angolo θ . Successivamente, ruotando (p) è possibile mostrare alla luce la superficie di uno standard (r), la cui riflettanza $R_r(\theta, \lambda)$, ad un fissato angolo ($\theta = 8^\circ$) ed a quella stessa lunghezza d'onda λ , sia nota. A questo punto il fotodiiodo (d) produrrà un segnale $V_r(8^\circ, \lambda)$. Essendo la sfera un oggetto lineare si potrà scrivere

$$V_c(\theta, \lambda) : R_c(\theta, \lambda) = V_r(8^\circ, \lambda) : R_r(8^\circ, \lambda) \quad (1)$$

da cui ricaviamo per ogni angolo:

$$R_c(\theta, \lambda) = \frac{V_c(\theta, \lambda)}{V_r(8^\circ, \lambda)} R_r(8^\circ, \lambda) \quad (2)$$

in cui $R_c(\theta, \lambda)$ è la riflettanza incognita del campione (c) ad un angolo θ e ad una lunghezza d'onda λ .

Più elementare risulta, invece, la misura della corrente al variare dell'angolo di incidenza della luce (vedi Figura 3). Il fascio proveniente dalla lampada viene focalizzato, filtrato e collimato parallelamente verso la cella, munita di contatti ed adagiata su un portacampioni rotabile.

Combinando opportunamente i risultati delle due misure, si

possono stimare le variazioni con l'angolo di incidenza della risposta spettrale interna del dispositivo [3]. Tuttavia, affinché la combinazione delle due misure risulti realmente affidabile, queste dovrebbero essere effettuate nelle medesime condizioni di illuminazione, interessando cioè le medesime superfici del mezzo otticamente attivo e riducendo al minimo l'imprecisione nella determinazione dell'angolo di incidenza della luce in entrambe le misure.

Però, l'utilizzo di apparati diversi per la corrente e per la riflettanza e la conseguente separazione temporale delle due misure fanno sì che le condizioni suddette siano non facili da rispettare. Da qui la necessità di introdurre una nuova apparecchiatura che consenta di effettuare simultaneamente le due misure. Una tale apparecchiatura potrebbe consistere di un riflettometro, all'interno del quale inserire il dispositivo munito di contatti, in modo tale che la misura di riflettanza sia accompagnata da una misura di corrente nel dispositivo stesso. Tuttavia, una misura effettuata in questo modo sarebbe affetta da un errore sulla corrente, dovuto al fatto, non trascurabile, che la luce riflessa dalla cella e raccolta dalle pareti della sfera, ritorna ad incidere nuovamente sul mezzo otticamente attivo della cella, sotto forma di luce diffusa. La tecnica introdotta con la presente invenzione, invece, consente l'eliminazione del contributo di questa luce diffusa sulla corrente del dispositivo, attraverso un'opportuna procedura di misura dei segnali relativi alla corrente ed alla riflettanza del dispositivo.

In termini generali, l'apparato secondo la presente invenzione consente di variare con continuità l'angolo di incidenza della luce da

10° a ~ 80°, mentre un fascio di riferimento incide su uno standard di riflettanza ad un angolo fisso, per esempio pari ad 8°. Il confronto tra la luce riflessa dal campione e quella riflessa dallo standard fornisce il valore della riflettanza del campione. Nel contempo, la corrente prodotta nel campione dalla luce incidente diretta può essere calcolata misurando la corrente totale prodotta dal dispositivo e sottraendovi il contributo derivante dall'illuminazione diffusa prodotta nella sfera dal campione stesso, secondo le modalità descritte nel testo. La misura simultanea di corrente e di riflettanza di una cella solare consente di derivarne la risposta spettrale interna con una precisione superiore a quella raggiungibile attraverso una misura separata delle due grandezze.

Oggetto specifico della presente invenzione è, quindi, un apparecchio per la misura simultanea della corrente e della riflettanza totale di dispositivi fotovoltaici comprendente una sfera integratrice provvista di una prima finestra per l'ingresso di un fascio di test e di un fascio di riferimento; un portacampioni rotabile attorno al suo asse, portante un campione di test ed un riferimento noto e provvisto di due manopole di cui una stabilisce l'orientamento del campione rispetto al fascio di test e l'altra stabilisce l'orientamento del riferimento rispetto al fascio di riferimento; una sorgente laser il cui fascio di luce viene scomposto da un divisore di fascio in detti due fasci di test e di riferimento; un modulatore meccanico attraversato da detti due fasci e che provvede ad alternarli all'ingresso della sfera integratrice secondo uno sfasamento angolare di 180°, corrispondente ad uno sfasamento

temporale di un semiperiodo, in modo tale che una volta sia illuminato il campione e la volta successiva sia illuminato il riferimento; un fotodiodo, interfacciato all'interno di detta sfera integratrice attraverso una seconda finestra e connesso ad un oscilloscopio digitale, per cui, in conseguenza di detta sequenza di illuminazione, esso misurerà una volta la luce riflessa dal campione e la volta successiva la luce riflessa dal riferimento, e per cui, sempre in conseguenza di detta sequenza di illuminazione, esso misurerà una volta la corrente prodotta nel campione dall'insieme dell'illuminazione diretta del fascio di test e di quella diffusa nella sfera integratrice causata dalla riflessione del fascio di test sul campione e la volta successiva la corrente prodotta nel campione dalla luce diffusa nella sfera integratrice causata dalla riflessione del fascio di riferimento sul riferimento, consentendo in tal modo di misurare simultaneamente la riflettanza del campione e la corrente indotta in esso in seguito all'illuminazione da parte del fascio di test.

Nella preferita forma di realizzazione, una procedura di correzione sarà impiegata, infine, per risalire al valore di corrente di corto circuito prodotta nel campione dal fascio di test, eliminando dalla corrente misurata il contributo derivante dalla luce diffusa prodotta nella sfera per effetto della riflessione del fascio di test sul campione stesso.

Ulteriori particolarità e vantaggi della presente invenzione appariranno evidenti dal seguito della descrizione con riferimento ai disegni allegati, in cui è rappresentata a titolo illustrativo e non

restrittivo la preferita forma di realizzazione.

Nei disegni:

la Figura 1 mostra un apparato secondo la presente invenzione, che permette la misura simultanea di corrente e riflettanza in una cella solare,

la Figura 2 mostra un apparato tradizionale per la misura della riflettanza di un campione piano, con possibilità di cambiare l'angolo di incidenza della luce,

la Figura 3 mostra un apparato per la misura della corrente con fascio di luce parallelo che investe tutta la superficie della cella ad angoli di incidenza variabili,

la Figura 4(a) mostra le curve di corrente e di riflettanza per un fascio incidente con polarizzazione parallela, in cui sono mostrate la corrente sperimentale, I_{tot} , misurata in presenza della sfera, la corrente sperimentale I_{dir} , misurata estraendo il campione dalla sfera, e la corrente I_{dirCal} , calcolata a partire da I_{tot} , sottraendovi il contributo dato dalla luce diffusa,

la Figura 4(b) riporta le stesse curve della Figura 4(a) per il caso di polarizzazione ortogonale,

la Figura 5 mostra le curve di riflettanza relative ad una cella solare illuminata con luce polarizzata, in direzione parallela ed ortogonale al piano di incidenza, e corrispondente valore medio: sono riportate, a confronto, le curve sperimentali e quelle calcolate applicando le equazioni di Fresnel,

la Figura 6 mostra le curve sperimentali di risposta spettrale

interna relativa, σ_R , relative alle due polarizzazioni (parallela ed ortogonale) ed al valore medio corrispondente.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELL'INVENZIONE

L'apparato che realizza la misura simultanea di corrente e riflettanza di un dispositivo fotovoltaico è mostrato in Figura 1. Esso consiste essenzialmente di una sfera integratrice, di una sorgente laser, di un'ottica per la preparazione di due fasci paralleli e di un sistema di rivelazione per la corrente della cella e per l'irradianza all'interno della sfera. La luce polarizzata di un diodo laser (L) viene preventivamente sdoppiata da un divisore di fascio (b) in due fasci di uguale potenza luminosa, un fascio di test (1) ed un fascio di riferimento (2). Entrambi i fasci passano attraverso le pale di un modulatore meccanico (h). Il fascio di test (1) dopo le riflessioni sugli specchi (m1) e (m2), incide sulla superficie della cella (c), mentre il fascio di riferimento (2) dopo la riflessione sullo specchio (m3), incide sulla superficie di uno standard di riflettanza diffusa (s). Il campione (c) è posto sul cilindro (Cc) rotabile attorno all'asse (ξ), ed orientabile, tramite la manopola (Kc), con la normale alla sua superficie di un angolo θ rispetto al fascio incidente (1). In maniera analoga, lo standard di riflettanza (s) è posto sul cilindro (Cs), coassiale al cilindro (Cc) e rotabile indipendentemente, tramite la manopola (Ks), attorno all'asse (ξ) in modo tale che la normale alla sua superficie sia orientabile di un angolo φ rispetto al fascio incidente (2). Per effetto dell'azione del modulatore (h), operante alla frequenza f_1 , il campione (c) ed il riferimento (s) verranno illuminati in maniera alternata ed

indipendente. La misura della riflettanza, perciò, potrà essere effettuata prendendo il segnale del fotodiode (f) durante l'illuminazione del campione (c) e confrontandolo con il segnale dello stesso fotodiode durante l'illuminazione dello standard (s). La corrente misurata nel campione (c) sarà la somma di due termini. Il primo termine è quello da determinare ed è prodotto dall'incidenza sul campione del fascio di test diretto (1); il secondo termine è quello prodotto dalla luce diffusa integrata dalla sfera (S) durante l'illuminazione del campione (c). Il termine incognito potrà essere determinato a partire dalla misura di corrente sperimentale sottraendovi il termine prodotto dalla luce diffusa, secondo una semplice relazione che verrà esposta in seguito. Tale operazione di correzione si basa sulla misura della corrente indotta sul campione, durante l'illuminazione dello standard, e sulla conoscenza della riflettanza del campione stesso. La procedura dettagliata per la determinazione della corrente e della riflettanza del campione (c) è qui di seguito presentata.

Si procede, dapprima, alla regolazione dell'intensità dei fasci (1) e (2) allo scopo di avere all'ingresso della sfera i due raggi con la stessa intensità. Il campione di riferimento (s), uno standard di riflettanza diffusa, sarà posto a $\varphi = 8^\circ$, essendo questa l'orientazione per la quale lo standard è generalmente calibrato in termini di riflettanza. Il campione in misura (c), invece, verrà orientato ad un angolo θ rispetto al fascio incidente (1) e tale angolo potrà essere variato entro un intervallo più o meno grande a seconda delle dimensioni relative tra fascio incidente e campione. Essendo il

campione (c), nel caso più generale, una cella solare, essa sarà munita di una griglia metallica in superficie per la raccolta dei portatori e, quindi, il fascio di test (1) dovrà essere focalizzato sulla zona otticamente attiva della cella, nello spazio intermedio tra due dita della griglia. In caso contrario, la misura della riflettanza rispecchierà anche il contributo dato dalla griglia [2-3]. Il fascio di test (1) produrrà allora una corrente $I^{tot}(\theta, \lambda)$ nella cella, che si compone di un contributo, $I^{dir}(\theta, \lambda)$, dovuto alla luce che incide direttamente sulla sua superficie ad un angolo θ , ed uno $I_c^{diff}(\theta, \lambda)$, dovuto alla luce diffusa nella sfera, e prodotta in corrispondenza ad una orientazione θ del campione:

$$I^{tot}(\theta, \lambda) = I^{dir}(\theta, \lambda) + I_c^{diff}(\theta, \lambda) \quad (3)$$

Contemporaneamente, il fotodiode (f) produrrà un segnale proporzionale all'intensità della luce riflessa e che indicheremo con $V_c(\theta, \lambda)$. Il contributo $I_c^{diff}(\theta, \lambda)$ può essere espresso nella forma:

$$I_c^{diff}(\theta, \lambda) = F(\theta, \lambda)SR_{int}(\lambda)G_o(\lambda)R_c(\theta, \lambda) \quad (4)$$

in cui $F(\theta, \lambda)$ è un fattore geometrico che tiene conto del fatto che la cella, indipendentemente dall'orientamento della sua superficie, vede soltanto metà della superficie irradiante della sfera. In linea di principio, quindi, assumendo che la parete interna della sfera sia lavorata omogeneamente, tale fattore dovrebbe risultare indipendente da θ . La sua dipendenza da λ deriva dal fatto che le pareti della sfera potrebbero riflettere diversamente le varie lunghezze d'onda. SR_{int} è la risposta spettrale interna del dispositivo che per il momento assumeremo dipendere sia dall'angolo θ che da λ . G_o è l'intensità del fascio incidente. $R_c(\theta, \lambda)$ è, invece, il fattore di riflettanza della

superficie della cella all'angolo θ ed alla lunghezza d'onda λ . In un secondo tempo, il fascio (1) viene intercettato dal modulatore (h) ed il fascio di riferimento (2) è libero di incidere sulla superficie dello standard (s). Il segnale generato dal fotodiode sarà in tal caso $V_s(\theta, \lambda)$. Sfruttando, allora, la linearità della sfera diremo che la riflettanza della cella è data da:

$$R_c(\theta, \lambda) = \frac{V_c(\theta, \lambda)}{V_s(8^\circ, \lambda)} R_s(8^\circ, \lambda) \quad (5)$$

La corrente prodotta nella cella dovuta alla luce diffusa dallo standard sarà:

$$I_S^{diff}(\lambda) = F(\theta, \lambda) SR_{int}(\theta, \lambda) G_0(\lambda) R_s(8^\circ, \lambda) \quad (6)$$

Sostituendo la (5) nella (4) otteniamo:

$$I_c^{diff}(\theta, \lambda) = F(\theta, \lambda) SR_{int}(\theta, \lambda) G_0(\lambda) \frac{V_c(\theta, \lambda)}{V_s(8^\circ, \lambda)} R_s(8^\circ, \lambda) \quad (7)$$

Dalla (6) ricaviamo che la (7) può essere scritta come:

$$I_c^{diff}(\theta, \lambda) = I_S^{diff}(\lambda) \frac{V_c(\theta, \lambda)}{V_s(8^\circ, \lambda)} \quad (8)$$

Pertanto, il valore di $I^{dir}(\theta, \lambda)$ può essere ricavato dalla eq. (3) come:

$$\begin{aligned} I^{dir}(\theta, \lambda) &= I^{tot}(\theta, \lambda) - I_c^{diff}(\theta, \lambda) \\ &= I^{tot}(\theta, \lambda) - I_S^{diff}(\lambda) \frac{V_c(\theta, \lambda)}{V_s(8^\circ, \lambda)} \end{aligned} \quad (9)$$

Al secondo membro della (9) compaiono tutte grandezze misurabili sperimentalmente. Contemporaneamente, dalla (2), sfruttando i segnali V_c e V_s , si ottiene il valore del fattore di riflettanza per la cella al variare di θ e λ .

Validità del metodo

Per verificare la validità del metodo, sono state effettuate alcune misure di corrente e di riflettanza su una cella solare ad angoli di incidenza variabili. Avendo usato una sorgente di luce polarizzata, questo ci ha consentito di illuminare la cella con luce a due diverse polarizzazioni, rispettivamente parallela e normale al piano di incidenza, effettuando due serie di misure.

Per verificare il risultato in corrente si è proceduto come segue. La sfera (S) è stata appoggiata al portacampioni così da poter essere rimossa, mentre il sistema ottico ed il portacampioni sono stati mantenuti solidali. In questo modo poteva essere misurata la corrente nella cella senza il contributo della diffusa prodotta dalla presenza della sfera. Appoggiando nuovamente la sfera, si poteva invece effettuare sia la misura di corrente totale (diretta + diffusa), sia la misura del fattore di riflettanza. Per quanto riguarda queste ultime, essendo la luce polarizzata e la superficie della cella lucidata, si è effettuato un confronto dei dati sperimentali con le curve previste dalle equazioni di Fresnel [4]. Per una lunghezza d'onda di 830 nm, si è assunto un valore dell'indice di rifrazione del mezzo pari a $n = 3,6$.

Perché le equazioni scritte siano valide, è fondamentale che l'intensità del fascio di riferimento (2) e del fascio di test (1) siano uguali e ciò per entrambe le polarizzazioni. Poiché i divisori di fascio, in genere, non separano al 50% i fasci, e le due percentuali sono dipendenti dalla polarizzazione del fascio primario, l'uguaglianza delle due intensità per entrambe le polarizzazioni deve essere ottenuta

prima di procedere alla misura.

Risultati e discussione

In Figura 4(a) e (b) sono mostrati i risultati in corrente per le due polarizzazioni, rispettivamente parallela ed ortogonale. Le misure sono state effettuate per angoli di incidenza da 8° a 80° . I_{tot} indica la corrente misurata in presenza della sfera (cioè diretta più diffusa); I_{dir} indica la corrente diretta misurata rimuovendo la sfera, mentre I_{dirCal} è la corrente calcolata secondo l'equazione (9). Quando la riflettanza aumenta, la differenza tra I_{tot} e I_{dir} deve crescere, in quanto aumenta il contributo della luce diffusa. Ciò si verifica soprattutto nel grafico della polarizzazione parallela al piano di incidenza. Nel limite in cui la riflettanza si annulla, le due correnti devono coincidere ed è quanto accade in Figura 4(a) per la polarizzazione parallela, in corrispondenza dell'angolo di Brewster ($\sim 75^\circ$). È possibile notare che la curva di corrente I_{dir} è sempre leggermente superiore a I_{dirCal} . Ciò è dovuto probabilmente al contributo del fondo di luce dell'ambiente in assenza della sfera. I grafici della Figura 4(a),(b) mostrano anche gli andamenti della riflettanza al variare dell'angolo di incidenza. In figura 5 tali andamenti sono confrontati con le curve di Fresnel ricavate per un indice di rifrazione $n = 3,6$. L'accordo tra le curve sembra buono soprattutto nel caso della polarizzazione parallela.

Variazioni relative con l'angolo della risposta spettrale interna

Per una cella solare la misura della corrente fotogenerata e della riflettanza conducono alla determinazione della risposta spettrale interna. Come già detto, la risposta spettrale interna di un dispositivo

fotovoltaico, $SR_{int}(\theta, \lambda)$, fornisce importanti informazioni sulla distribuzione della luce all'interno del materiale semiconduttore e sul trasporto delle cariche fotogenerate. Spesso, più che il valore assoluto di $SR_{int}(\theta, \lambda)$, interessa il suo valore relativo all'incidenza normale che indicheremo con la grandezza σ_R :

$$\sigma_R = \frac{SR_{int}(\theta, \lambda)}{SR_{int}(0^\circ, \lambda)} \quad (10)$$

La conoscenza di σ_R consente di valutare le prestazioni del dispositivo quando esso viene illuminato con luce inclinata ad un angolo θ rispetto alla normale e, quindi, oltre che fornire informazioni sui meccanismi di raccolta della luce e trasporto delle cariche, mostra anche come si comporterebbe la cella esposta alla luce solare esterna proveniente dalle diverse direzioni dello spazio. La grandezza $\sigma_R(\theta, \lambda)$ si può ricavare seguendo la seguente procedura.

La corrente di corto circuito , $I_{cc}(\theta, \lambda)$, di una cella solare si può esprimere come:

$$I_{cc}(\theta, \lambda) = G_{abs}(\theta, \lambda)SR_{int}(\theta, \lambda) \quad (11)$$

dove G_{abs} corrisponde all'intensità di luce assorbita dalla cella.

Abbiamo inoltre:

$$I_{cc}(\theta, \lambda) = G_{inc}(\theta, \lambda)[1 - R_{tot}(\theta, \lambda)]SR_{int}(\theta, \lambda) \quad (12)$$

dove $G_{inc}(\theta, \lambda)$ è l'intensità di luce incidente ad angolo θ . Se il fascio parallelo incidente illumina tutta la cella, allora abbiamo:

$$I_{cc}(\theta, \lambda) = G_{inc}(0^\circ, \lambda) \cos(\theta)[1 - R_{tot}(\theta, \lambda)]SR_{int}(\theta, \lambda) \quad (12')$$

$$I_{cc}(\theta, \lambda) = G_{inc}(0^\circ, \lambda) \cos(\theta) T(\theta, \lambda) SR_{int}(\theta, \lambda) \quad (12'')$$

Questa relazione si può applicare quando non vi siano contributi della griglia né nella misura della corrente né nella misura di riflettanza [3]. Essa inoltre prevede che sia trascurabile l'effetto di assorbimento della luce da parte dello strato superficiale della cella. Dividendo l'equazione (12') per la corrispondente a $\theta = 0^\circ$:

$$I_{cc}(0^\circ, \lambda) = G_{inc}(0^\circ, \lambda) [1 - R_{tot}(0^\circ, \lambda)] SR_{int}(0^\circ, \lambda) \quad (12''')$$

avremo la seguente espressione per le grandezze "ridotte", ovvero relative all'incidenza normale:

$$i(\theta, \lambda) = \cos(\theta) \tau(\theta, \lambda) \sigma_R(\theta, \lambda) \quad (13)$$

Se, come nel caso descritto nella presente invenzione, il fascio di luce ricade tutto all'interno del campione, allora il termine $\cos(\theta)$ si elimina e avremo:

$$i(\theta, \lambda) = \tau(\theta, \lambda) \sigma_R(\theta, \lambda) \quad (13')$$

e quindi la grandezza $\sigma_R(\theta, \lambda)$ sarà:

$$\sigma_R(\theta, \lambda) = \frac{i(\theta, \lambda)}{\tau(\theta, \lambda)} \quad (14)$$

e potrà essere espressa anche come:

$$\sigma_R(\theta, \lambda) = 1 + \Delta\sigma_R(\theta, \lambda) = 1 + \frac{i(\theta, \lambda) - \tau(\theta, \lambda)}{\tau(\theta, \lambda)} \quad (14')$$

dove $\Delta\sigma_R$ rappresenta l'aumento o la diminuzione della risposta spettrale in seguito all'inclinazione della luce sul dispositivo.

Se la risposta spettrale interna del dispositivo non si modifica con l'angolo, la (14) dovrebbe valere costantemente 1. In figura 6 è mostrato il risultato di σ_R ottenuto a partire dai dati delle figure 4 e 5, applicando la (14). La curva di risposta spettrale interna relativa è

riportata per luce polarizzata, parallela ed ortogonale, e per luce non polarizzata, mediando i risultati relativi alle due polarizzazioni. Come si vede la σ_R per luce non polarizzata tende a diminuire in maniera piuttosto regolare col crescere dell'angolo. L'interpretazione che diamo è quindi che, a parità di luce trasmessa, i portatori fotogenerati sono raccolti peggio se la luce viaggia nel mezzo in direzione obliqua rispetto alla superficie della cella. Quanto più la luce viaggia in direzione obliqua nel mezzo, tanto più i portatori saranno prodotti in vicinanza della superficie. Alcuni studi teorici [5] dimostrano come la probabilità di raccolta nel circuito esterno dei portatori si riduca notevolmente in prossimità della superficie in una cella n^+/p . Tale circostanza potrebbe spiegare la diminuzione relativa di σ_R al crescere dell'angolo di incidenza. I risultati riportati in [3], invece, effettuati su celle solari con particolari tessiture superficiali (ovvero con superfici non piane), come la cella PERL [6], hanno mostrato andamenti di σ_R poco dipendenti dall'angolo. L'effetto della tessitura a piramidi invertite, infatti, può, attraverso processi di riflessioni multiple, omogeneizzare la modalità di trasmissione della luce, indipendentemente dall'angolo iniziale di incidenza.

Conclusioni

Da quel che precede si può concludere che è stato realizzato un apparato e definita una procedura per la misura simultanea della corrente e della riflettanza di una cella solare. La procedura prevede anche una correzione finale del valore di corrente misurato, allo scopo di ottenere il valore corretto di corrente da associare al valore di

riflettanza.

Il perfezionamento del metodo consiste nel fatto che corrente e riflettanza sono misurate contemporaneamente e quindi sono associate alla stessa regione del campione, ovvero a quella illuminata dal fascio incidente. La misura simultanea, inoltre, assicura l'assenza di un errore sull'angolo di incidenza relativo alle due grandezze. L'importanza del metodo sta nel fatto che, eliminando gli errori suddetti, è possibile pervenire alla determinazione precisa della risposta spettrale interna di un dispositivo fotovoltaico, che fornisce importanti informazioni sia sul confinamento della luce che sulla raccolta della cariche fotogenerate. Tutto ciò si dimostra di non trascurabile importanza in tutte le ricerche sul comportamento di generatori di cariche fotogenerate.

In quel che precede è stata descritta la preferita forma di realizzazione della presente invenzione, ma deve essere chiaro che gli esperti nel ramo potranno apportare varianti, modificazioni e cambiamenti nei dettagli e nei particolari costruttivi, senza con ciò uscire dall'ambito di protezione della presente privativa industriale.

RIFERIMENTI

- [1] ASTM, Designation E 1175 - 87 (Reapproved 1996), "Standard Test Method for Determining Solar or Photopic Reflectance, Transmittance, and Absorptance of Materials Using a Large Diameter Integrating Sphere"
- [2] A. Parretta, A. Sarno, P. Tortora, H. Yakubu, P. Maddalena, J. Zhao and A. Wang, "Angle-dependent reflectance measurements on photovoltaic materials and solar cells", *Optics Communications*, **172** (1999) 139-151.
- [3] A. Parretta, P. Grillo, A. Sarno, P. Maddalena, J. Zhao and A. Wang, "Light trapping properties of c-Si solar cells studied by reflectance and current measurements at variable angles of the incident light", oral presentation at the 16th European Photovoltaic Solar Energy and Exhibition, Glasgow (UK), 1-5 May 2000.
- [4] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press, p.38.
- [5] Abdul-Azeez, S. Al-Omar, Moustafa Y. Ghannam, "Direct calculation of two-dimensional collection probability in pn junction solar cells, and study of grain boundary recombination in polycrystalline silicon cells", *Journal of Applied Physics*, **79** (1996) 2103-2114.
- [6] J. Zhao, A. Wang, P. Altermatt and M. A. Green, "Twenty-four Percent Efficient Silicon Solar Cells with Double Layer Antireflection Coatings and Reduced Resistance Loss", *Applied Physics Letters*, **66** (1995) 3636-3638.

RIVENDICAZIONI

1.- Apparecchio per la misura simultanea della corrente e della riflettanza totale di dispositivi fotovoltaici comprendente una sfera integratrice (S) provvista di una prima finestra (w1) per l'ingresso di un fascio di test (1) e di un fascio di riferimento (2); un portacampioni (p) rotabile attorno al suo asse (ξ) portante un campione di test (c) ed uno standard di riferimento noto (s) e provvisto di due manopole di cui una (Kc) stabilisce l'orientamento del campione (c) rispetto al fascio di test (1) (angolo θ) e l'altra (Ks) stabilisce l'orientamento del riferimento (s) rispetto al fascio di riferimento (2) (angolo φ); una sorgente laser (L) il cui fascio di luce viene scomposto da un divisore di fascio (b) in detti due fasci di test e di riferimento (1) e (2); un modulatore meccanico (h) attraversato da detti due fasci e che provvede ad alternarli all'ingresso della sfera integratrice (S) secondo uno sfasamento angolare di 180° , corrispondente ad uno sfasamento temporale di un semiperiodo, in modo tale che una volta sia illuminato il campione (c) e la volta successiva sia illuminato il riferimento (s); un fotodiodo (f), interfacciato all'interno di detta sfera integratrice (S) attraverso una seconda finestra (w2); un voltmetro digitale (d) connesso a detto campione di test (c) e a detto fotodiodo (f), per cui, in conseguenza di detta sequenza di illuminazione, per la misura della riflettanza, detto fotodiodo (f) misurerà una volta la luce riflessa dal campione (c) e la volta successiva la luce riflessa dal riferimento (s), e per cui, sempre in conseguenza di detta sequenza di illuminazione, per la misura della corrente, detto voltmetro digitale (d) misurerà una volta la corrente

prodotta nel campione (c) dall'insieme dell'illuminazione diretta del fascio di test (1) e di quella diffusa nella sfera integratrice (S) causata dalla riflessione del fascio di test (1) sul campione (c) e la volta successiva la corrente prodotta nel campione (c) dalla luce diffusa nella sfera integratrice (S) causata dalla riflessione del fascio di riferimento (2) sul riferimento (s), consentendo in tal modo di misurare simultaneamente la riflettanza del campione (c) e la corrente indotta in esso in seguito all'illuminazione da parte del fascio di test (1).

2.- Apparecchio secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto portacampione (p) comprende una prima sezione cilindrica (Cc) portante detto campione (c) da misurare ed una seconda sezione cilindrica (Cs) portante detto standard di riferimento noto (s), dette sezioni cilindriche (Cc, Cs) essendo coassiali ed indipendentemente girevoli mediante dette manopole (Kc, Ks).

3.- Apparecchio secondo la rivendicazione 1 o 2, caratterizzato dal fatto che detto modulatore meccanico (h) è un otturatore rotante a palette.

4.- Metodo per la misura simultanea della corrente e della riflettanza totale di dispositivi fotovoltaici consistente nell'impiegare una sfera integratrice (S) provvista di un portacampioni (p) portante un campione di test (c) ed uno standard di riferimento noto (s) indipendentemente rotabili intorno all'asse del portacampione (p); nell'inviare su detto campione (c) e su detto riferimento standard (s) secondo una sequenza di illuminazione determinata da un modulatore meccanico a palette, rispettivamente un fascio di test (1) ed un fascio

di riferimento (2), alternati secondo uno sfasamento angolare di 180° , corrispondente ad uno sfasamento temporale di un semiperiodo, detti fasci essendo ottenuti per scomposizione del raggio generato da una sorgente laser (L) mediante un divisore di fascio (b); nel misurare a mezzo di un fotodiodo (f) cooperante con un voltmetro digitale (d), secondo detta sequenza di illuminazione, una volta la luce riflessa dal campione (c) ed una volta successiva la luce riflessa dal riferimento (s); e nel misurare a mezzo di detto voltmetro digitale (d), sempre secondo detta sequenza di illuminazione, una volta la corrente prodotta nel campione (c) dall'insieme dell'illuminazione diretta del fascio di test (1) e di quella diffusa nella sfera integratrice (S) causata dalla riflessione del fascio di test (1) sul campione (c) ed una volta successiva la corrente prodotta nel campione (c) dalla luce diffusa nella sfera integratrice (S) causata dalla riflessione del fascio di riferimento (2) sul riferimento (s), consentendo in tal modo di misurare simultaneamente la riflettanza del campione (c) e la corrente indotta in esso in seguito all'illuminazione da parte del fascio di test (1).

5.- Metodo secondo la rivendicazione 4, ulteriormente comprendente una procedura di correzione per risalire al valore di corrente di corto circuito prodotta nel campione dal fascio di test, eliminando dalla corrente misurata il contributo derivante dalla luce diffusa prodotta nella sfera per effetto della riflessione del fascio di test sul campione stesso.

6.- Apparecchio e metodo per la misura simultanea della corrente e della riflettanza totale di dispositivi fotovoltaici secondo le

rivendicazioni 1, 2, 3 e 4, 5, rispettivamente e come precedentemente descritti e rappresentati nelle Figure dei disegni allegati.

Roma,

p.p.: 1) ENEA – Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente,

2) INFN – Istituto Nazionale per la Fisica della Materia

ING. BARZANO' & ZANARDO ROMA S.p.A.

TA

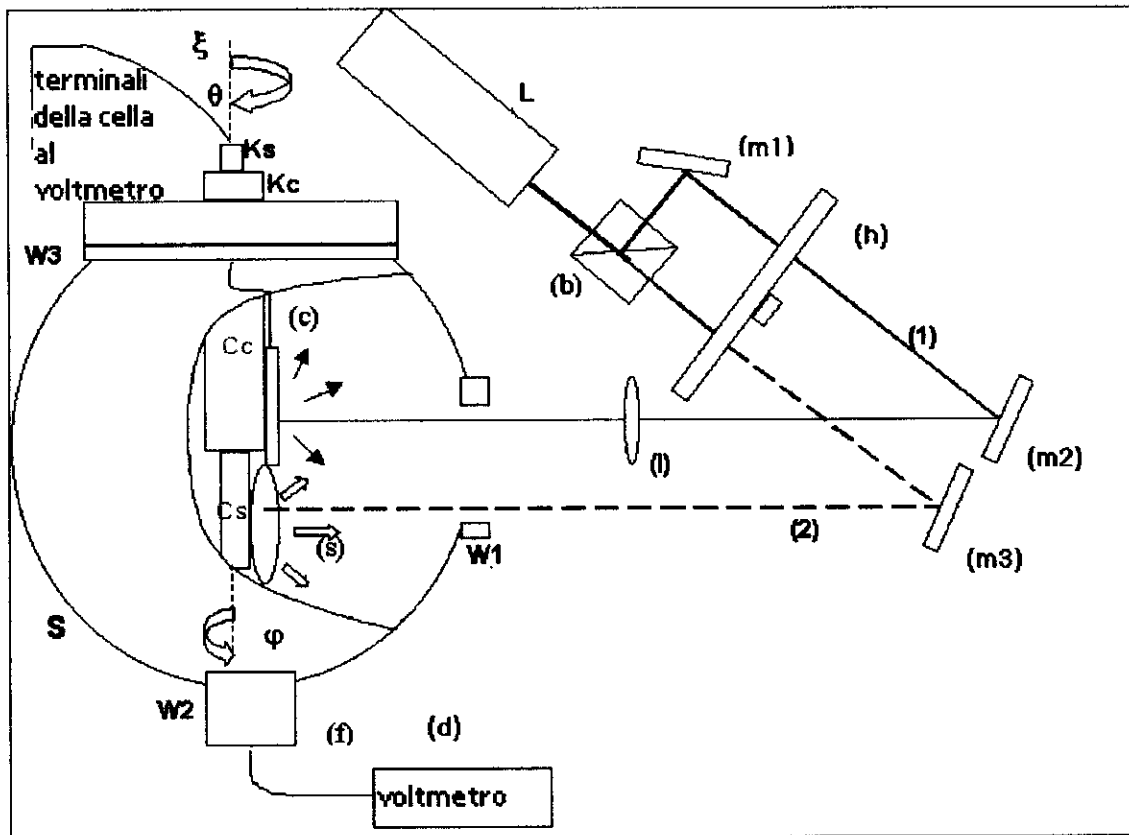
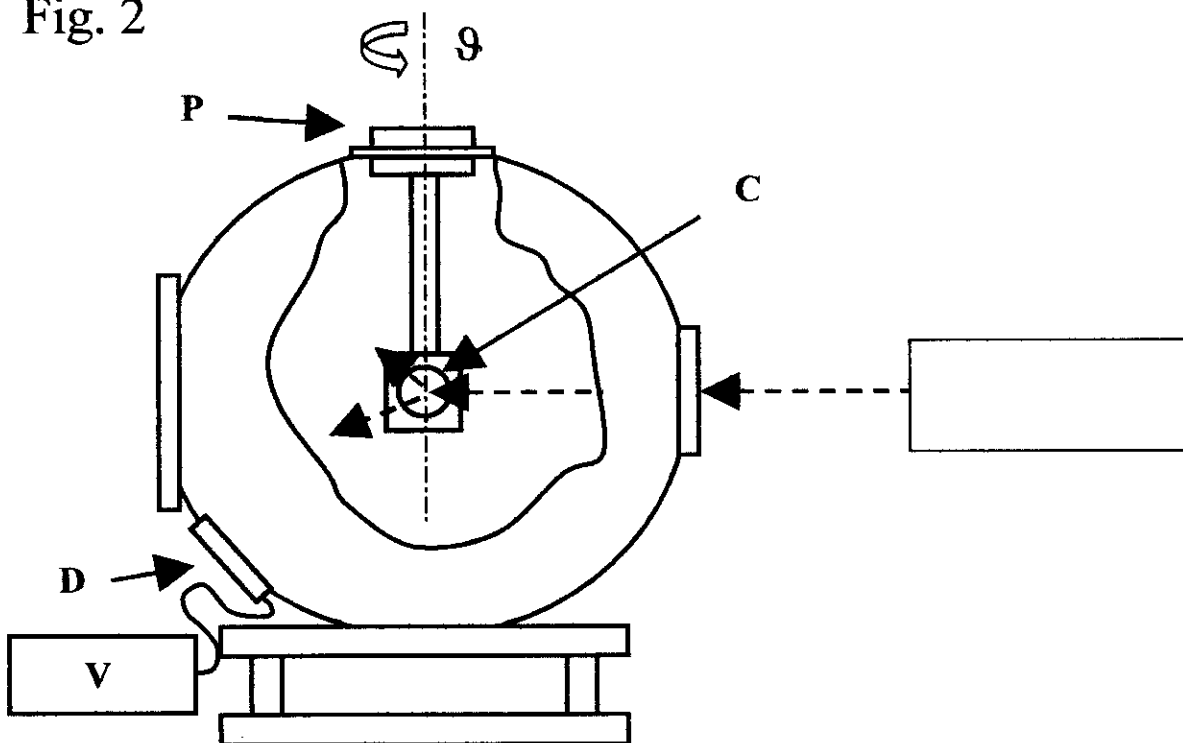


Fig. 1

Fig. 2



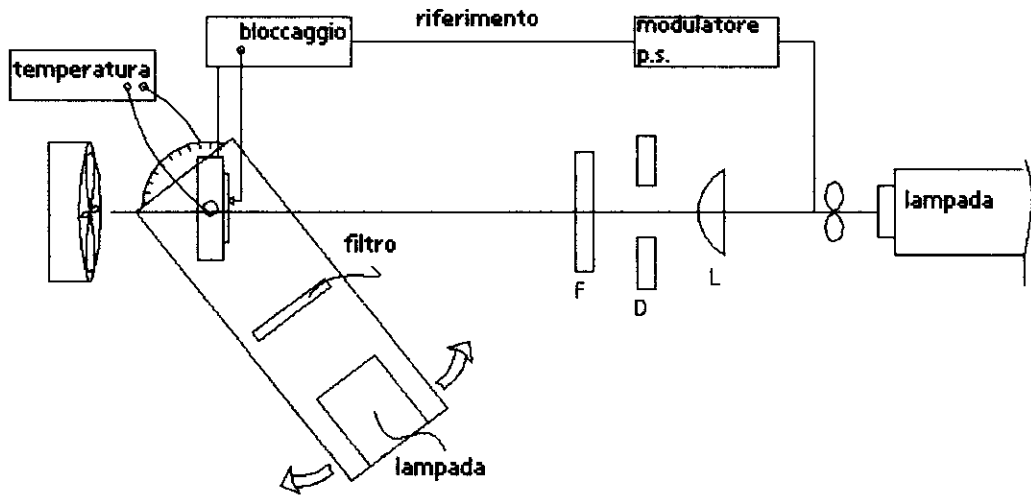


Fig. 3

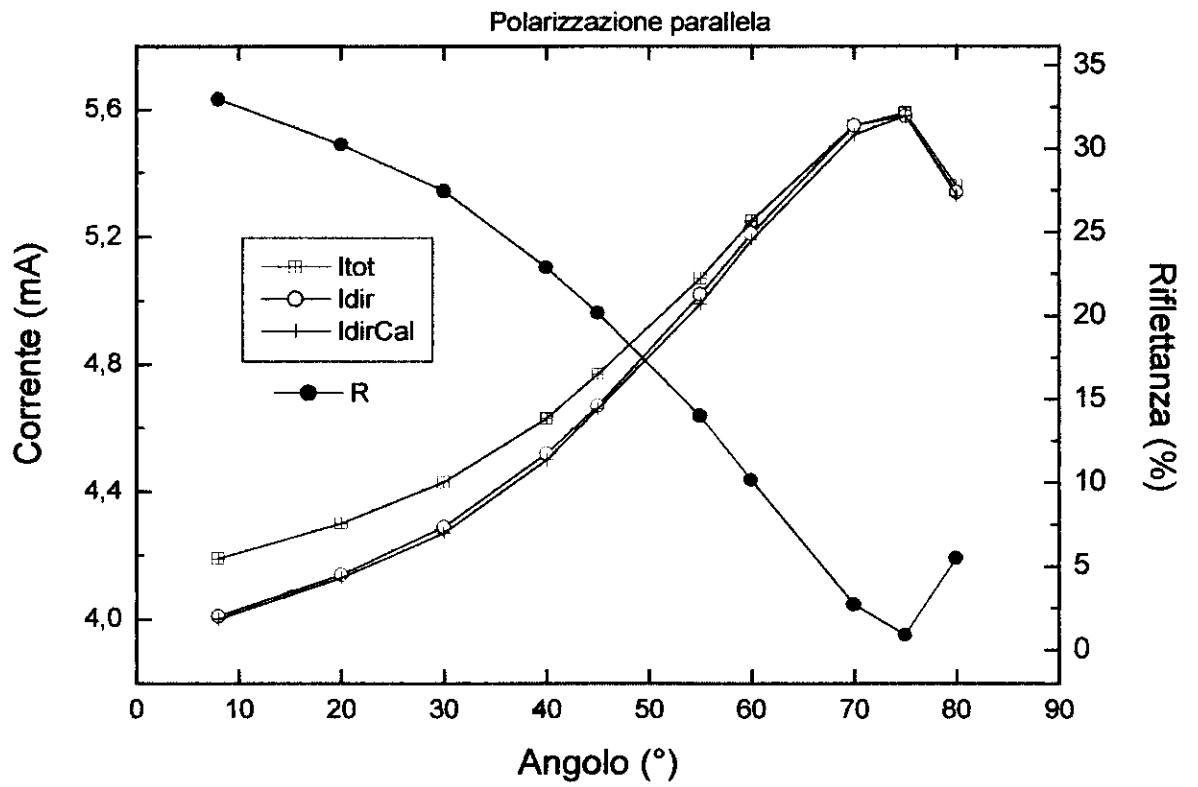


Fig. 4

Fig. 4(b)

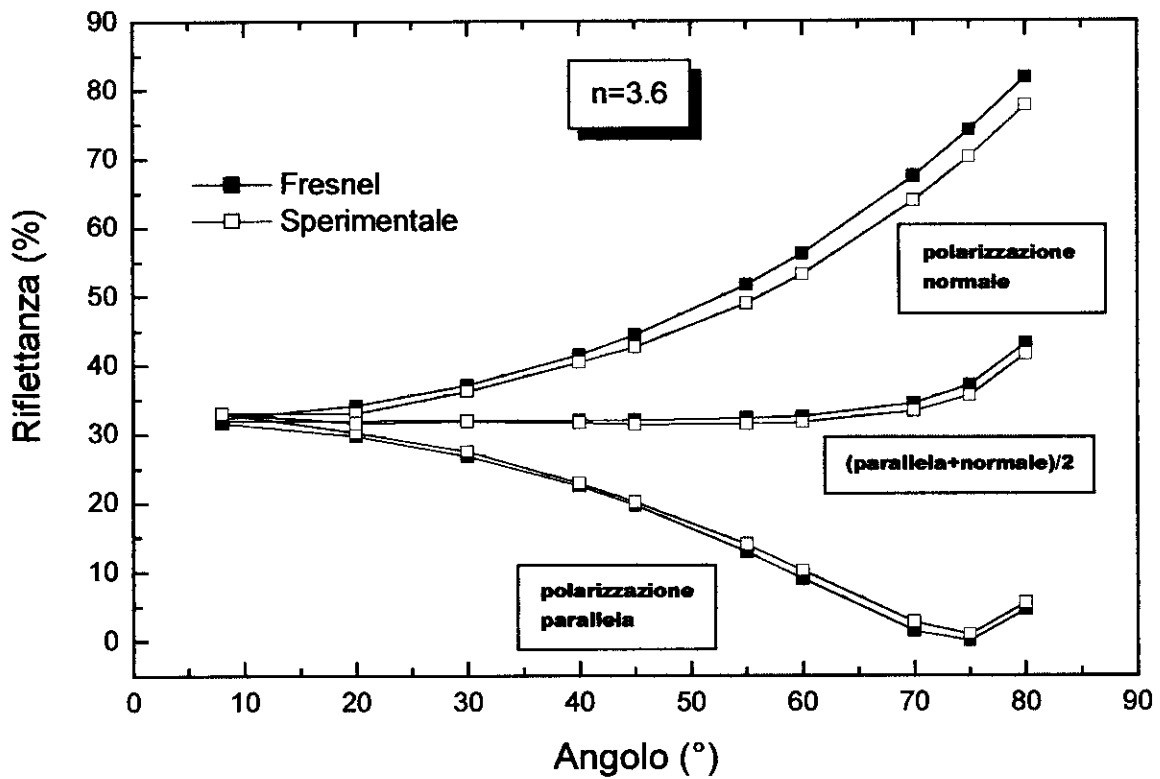
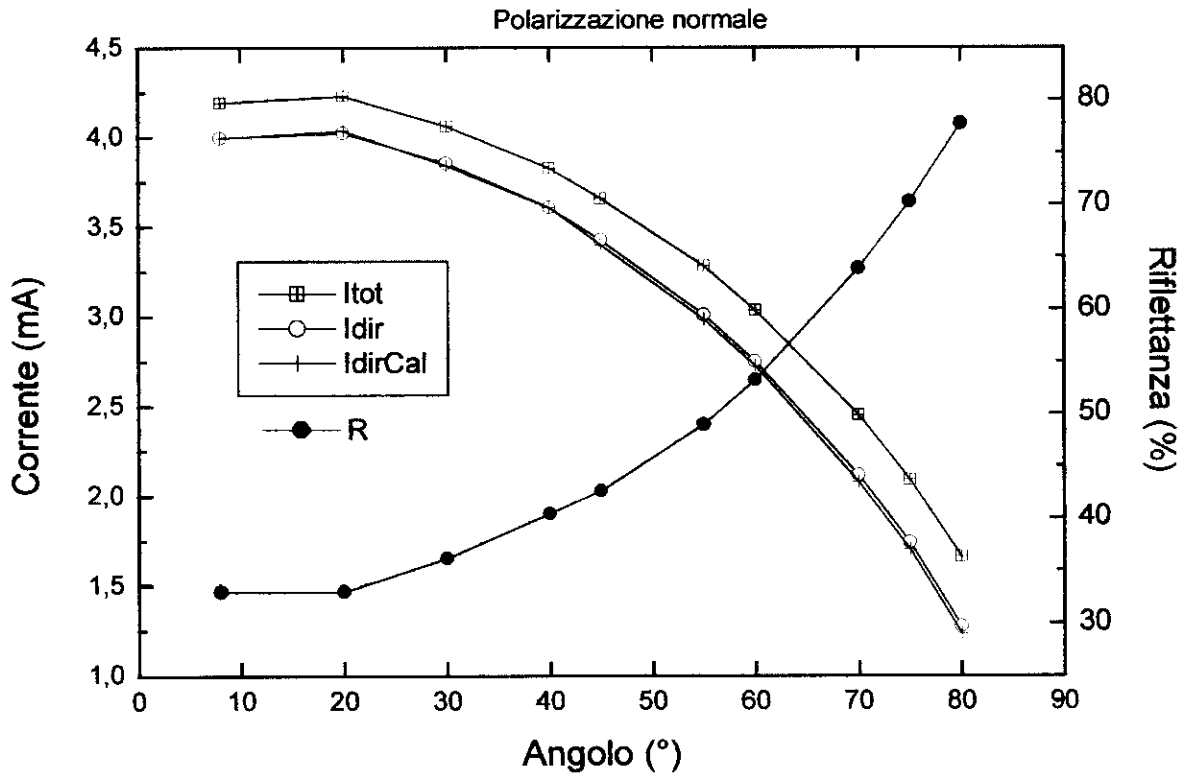


Fig. 5

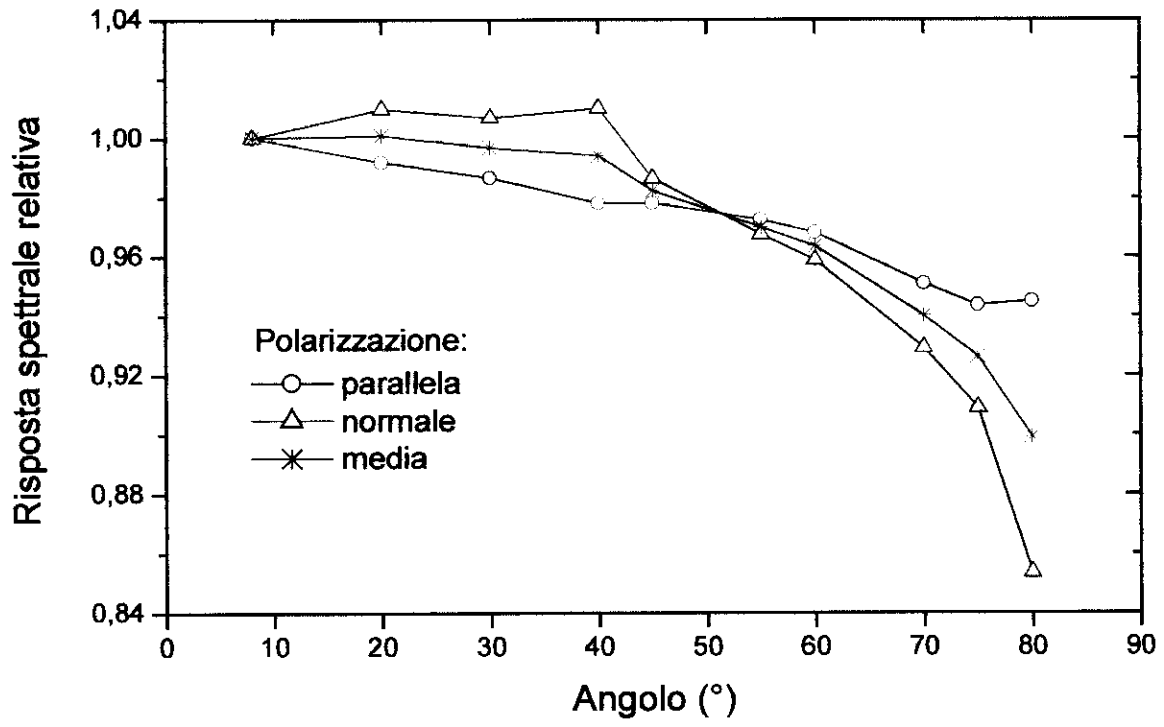


Fig. 6

