

Unità <b>ENE - FOTO</b>	Classificazione ENE <b>EGE 04009</b>	Distribuzione: Libera
Commessa SOLTERM Ottica P00V: Progettazione e realizzazione di radiometri innovativi per impianti Solari Termodinamici.		Parole chiave: Concentratore solare termodinamico o Fotovoltaico, Caratterizzazione di Fasci concentrati, Diffusore Lambertiano
Attività: .Messa a punto di metodi per la caratterizzazione di fasci concentrati di radiazione.		

Titolo:

**“Analisi del fascio concentrato per riflessione da superficie lambertiana: caratterizzazione di diffusori ottici”**

Autori:

M. Luisa Addonizio, Antonio Parretta

**Sommario:**

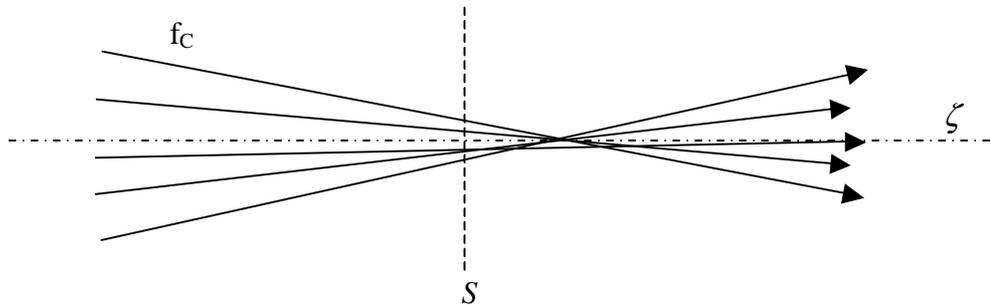
E' descritta una metodologia di misura della radiazione solare concentrata, basata sulla riflessione del fascio di luce da parte di un diffusore lambertiano, la ripresa dell'immagine con una videocamera digitale e la successiva elaborazione di essa al computer. In questa relazione sono riportati i risultati di una accurata caratterizzazione di diversi diffusori ottici, al fine di individuare i più idonei da impiegare quali diffusori lambertiani. Sono stati esaminati diffusori commerciali realizzati con materiale "Spectralon" della Labsphere, impiegati comunemente come standard di riflettanza nelle misure spettrofotometriche, e diffusori costituiti da strati sottili di Silicio poroso preparati su wafer di Silicio monocristallino. I diffusori che hanno mostrato le migliori proprietà di lambertianità, nelle condizioni di operatività dei concentratori solari di interesse per l'ENEA, sono risultati quelli "Spectralon" con riflettanza nominale  $\geq 40\%$ . Anche i campioni di Silicio poroso sono risultati idonei come diffusori lambertiani, ma il loro impiego deve prevedere l'esclusione della componente speculare.

4							
3							
2							
1							
0	Emissione	A. Parretta	09/02/04	C. Privato		C. Privato	
Rev	Descrizione	Redazione	Data	Convalida	Data	Approvazione	Data

## Indice

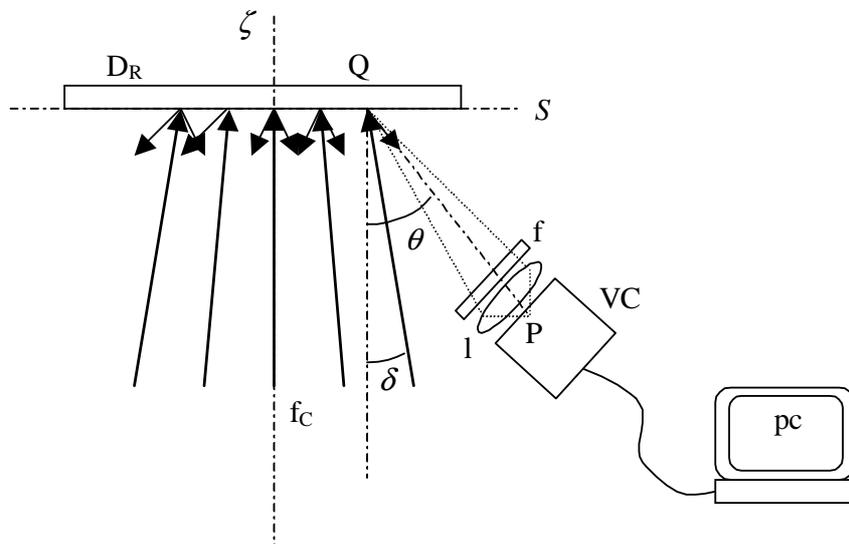
1.	Introduzione.....
2.	Caratterizzazione ottica di diffusori di luce.....
2.1	Misure di riflettanza emisferica.....
2.1.1	<i>Standard di riflettanza Labsphere</i> .....
2.1.2	<i>Campioni di Silicio poroso</i> .....
2.2	Misure di distribuzione angolare dell'intensità diffusa.....
2.2.1	<i>Standard di riflettanza Labsphere</i> .....
2.2.2	<i>Campioni di Silicio poroso</i> .....
2.3	Misure di polarizzazione della luce diffusa.....
2.3.1	<i>Standard di riflettanza Labsphere</i> .....
2.3.2	<i>Campioni di Silicio poroso</i> .....
3.	Caratterizzazione al SEM di diffusori di luce.....
3.1	Caratterizzazione morfologica.....
3.1.1	<i>Standard di riflettanza Labsphere</i> .....
3.1.2	<i>Campioni di Silicio poroso</i> .....
3.2	Relazione proprietà ottiche - struttura.....
4.	Conclusioni .....
	Appendice A ( <i>Legge di Lambert</i> ) .....
	Appendice B ( <i>Divergenza angolare del fascio</i> ) .....

## 1. Introduzione



**Figura 1** - Generico fascio di luce concentrata.

Sia dato un generico fascio di luce concentrata,  $f_c$  (Fig. 1). Si tratta di determinare la distribuzione spaziale dell'intensità (irradianza) su una sezione generica  $S$ , ad esempio ortogonale all'asse ottico del fascio. Adottiamo il metodo della riflessione da parte di una superficie diffondente (Fig. 2).



**Figura 2** - Schema semplificato dell'apparato per la caratterizzazione del fascio concentrato col metodo della riflessione da parte di una superficie diffondente.

Sia  $D_R$  un diffusore generico, le cui proprietà di riflessione siano date dalla riflettanza  $R(\delta, \theta, \phi, \lambda)$ , funzione dell'angolo d'incidenza  $\delta$ , dell'angolo d'osservazione zenitale  $\theta$ , dell'angolo d'osservazione azimutale  $\phi$ , e della lunghezza d'onda  $\lambda$ . Nel seguito faremo sempre riferimento a radiazione incidente non polarizzata e verranno considerati soltanto diffusori isotropi rispetto all'angolo azimutale, per cui la dipendenza da quest'angolo

scompare. Gli angoli d'incidenza  $\delta$  e d'osservazione  $\theta$  sono misurati a partire dalla normale a  $D_R$  sul punto  $Q$  (vedi Fig. 2).

Il campione  $D_R$  è posto con la superficie diffusiva sulla sezione del fascio da caratterizzare. Il sistema di rivelazione comprende una videocamera VC (CCD o Vidicon) posta a lato di  $D_R$  e provvista di un'ottica di focalizzazione, di filtri neutri per l'attenuazione del fascio e filtri interferenziali per la selezione di bande spettrali. La VC è inoltre collegata al computer, provvisto di scheda per la gestione della CCD e di un software per l'elaborazione delle immagini.

L'immagine del fascio luminoso prodotta sulla VC è composta allora da punti  $P$  corrispondenti ai punti  $Q$  del fascio (vedi Fig. 2), e la loro intensità d'illuminazione è funzione dell'intensità del fascio (irradianza) incidente sui punti  $Q$ , della riflettanza del diffusore  $R(\delta, \theta, \lambda)$ , e della distanza  $r(Q) = PQ$  secondo la relazione:

$$I(P, \lambda) \propto \frac{I(Q, \lambda) \cdot R(\delta, \theta, \lambda)}{r(Q)^2} \quad (1)$$

L'intensità del fascio incidente,  $I(Q, \lambda)$ , potrà essere determinata dalla (1) a partire dall'intensità  $I(P, \lambda)$  misurata con la VC e dalle proprietà riflessive del diffusore. Nel caso generale, queste ultime sono una funzione dell'angolo d'incidenza  $\delta$ , e quindi questo angolo dovrà essere noto per ogni punto del diffusore. La distribuzione angolare della luce incidente sul diffusore potrà essere ricavata a partire dalla particolare geometria del concentratore. Nel caso tale geometria risultasse complessa, allora si dovrà ricorrere a metodi specifici di caratterizzazione che comporteranno la movimentazione del diffusore rispetto alla sezione  $S$  di misura [1]. Nella (1) gli angoli  $\delta$  e  $\theta$  sono funzioni del punto  $Q$  e quindi avremo l'espressione generale:

$$I(P, \lambda) \propto \frac{I(Q, \lambda) \cdot R[\delta(Q), \theta(Q), \lambda]}{r(Q)^2} \quad (1')$$

Le Eq.ni (1) o (1') si semplificano molto nel caso in cui il diffusore sia di tipo lambertiano (vedi Appendice A) [2]. In questo caso, infatti, la riflettanza non dipende dall'angolo d'incidenza ma solo dall'angolo d'osservazione secondo la semplice funzione  $\cos(\theta)$ :

$$I(P, \lambda) \propto \frac{I(Q, \lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \cos[\theta(Q)]}{r(Q)^2} \quad (2)$$

L'Eq. (2) può essere applicata anche nel caso in cui il diffusore presenti una componente speculare. Se la componente diffusa ha caratteristiche di lambertianità, infatti, è possibile risalire all'intensità della radiazione incidente,  $I(P, \lambda)$ , mettendosi in condizioni sperimentali che escludano la raccolta della componente speculare. Se  $R_{diff}(\lambda)$  è la componente diffusa della radiazione riflessa, avremo allora:

$$I(P, \lambda) \propto \frac{I(Q, \lambda) \cdot R_{diff}(\lambda) \cdot \cos[\theta(Q)]}{r(Q)^2} \quad (2')$$

Se la VC è posta ad una distanza grande rispetto alle sue dimensioni lineari e a quelle del diffusore, allora l'angolo  $\theta$  e la distanza  $r$  possono essere considerati come costanti per i vari punti della sezione  $S$  ed  $I(P, \lambda)$  diventa:

$$I(P, \lambda) \propto \frac{I(Q, \lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \cos \theta_0}{r_0^2} \propto I(Q, \lambda) \cdot R(\lambda) \quad (3)$$

L'immagine del fascio luminoso riprodotto sulla VC diventa allora semplicemente la proiezione del fascio reale sul piano perpendicolare alla direzione di osservazione.

## 2. Caratterizzazione ottica di diffusori di luce

L'analisi ottica di un fascio concentrato secondo il metodo della riflessione da parte di un diffusore richiede, come risulta dalle Eq. (1)-(3), la conoscenza accurata delle sue proprietà ottiche diffuse.

Due tipi di campioni sono stati impiegati a tale scopo:

A) Campioni standard di riflettanza della Labsphere, realizzati con materiale Spectralon, disponibili in diametri da 1", 2" e 3". Ciascuna serie comprende fino a 8 campioni con diversa riflettanza nominale (2%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% e 99%), che corrisponde approssimativamente alla riflettanza media relativa nell'intervallo di lunghezze d'onda: 300-2500 nm. I campioni sono identificati dalla sigla SRS-xx-yyy, dove xx=riflettanza nominale e yy.y=diametro in pollici. Il campione SRS-05-020, ad esempio, corrisponde allo standard con riflettanza nominale  $R=5\%$  e con diametro  $d=2.0$  pollici.

Ogni campione Labsphere viene fornito insieme ad un certificato di calibrazione che dà la riflettanza direzionale/emisferica a  $8^\circ$  d'incidenza e per l'intervallo 250-2500 nm a step di 50 nm. Queste modalità di certificazione corrispondono alla procedura standard di caratterizzazione ottica di un campione fatta con uno spettrofotometro nel quale il fascio incide sul campione ad un angolo di  $8^\circ$ . Due serie di campioni diffusivi Labsphere da 2" e da 3" sono mostrate in Fig. 3.

B) Campioni di Silicio poroso realizzati per formazione di uno strato sottile (alcuni micrometri) di silicio poroso su un wafer di Silicio monocristallino.

I campioni adoperati sono stati realizzati per via elettrochimica, più precisamente per dissoluzione anodica a differenti concentrazioni di HF di wafer di silicio monocristallino orientato (100).

I campioni Labsphere e di Silicio poroso sono stati caratterizzati come segue:

\* misura della riflettanza emisferica totale del diffusore (comprendente sia la componente diffusa che l'eventuale componente speculare) al variare dell'angolo d'incidenza  $\delta$  (zenitale) di un fascio collimato, non polarizzato, di lunghezza d'onda  $\lambda$ ;

\* misura della riflettanza emisferica diffusa, per i diffusori che manifestano la presenza di una netta componente speculare, al variare dell'angolo d'incidenza  $\delta$  (zenitale) di un fascio collimato, non polarizzato, di lunghezza d'onda  $\lambda$ ;



a)



b)

**Figura 3** - a): Serie di campioni Labsphere SRS-xx-030 (3"). b): Serie di campioni Labsphere SRS-xx-020 (2").

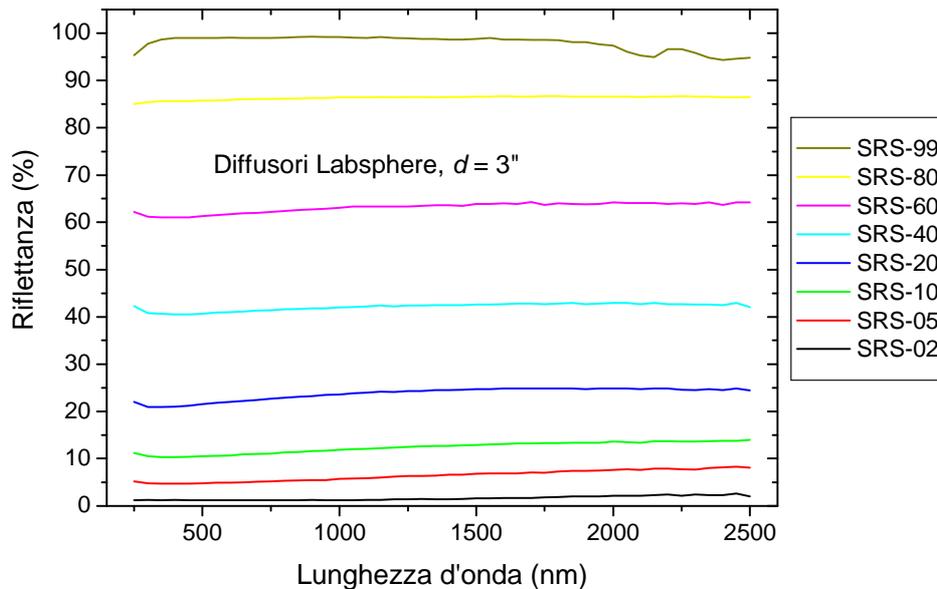
\*misura dell'intensità della radiazione riflessa (o diffusa) al variare dell'angolo di osservazione  $\theta$  (zenitale) quando il campione sia illuminato da un fascio collimato, di lunghezza d'onda  $\lambda$  non polarizzato, incidente ad un angolo  $\delta$ ;  
misura della polarizzazione della radiazione riflessa (o diffusa) al variare dell'angolo di osservazione  $\theta$  (zenitale) quando il campione sia illuminato da un fascio collimato, non polarizzato, di lunghezza d'onda  $\lambda$  incidente ad un angolo  $\delta$ .

## 2.1 Misure di riflettanza emisferica

La riflettanza emisferica dei campioni Labsphere, relativa all'angolo d'incidenza  $\delta = 8^\circ$ , è riportata nei certificati di calibrazione allegati ai campioni ed è mostrata in Fig. 4 per l'intervallo spettrale 250-2500 nm. La riflettanza emisferica di un campione rappresentativo di Silicio poroso, misurata allo spettrofotometro Lambda 900, è mostrata in Fig. 5 per l'intervallo di lunghezze d'onda 200-2500 nm. Per questo tipo di campioni la riflettanza spettrale non è piatta, ma mostra una serie di bande caratteristiche del Silicio. Questo fatto non pregiudica l'impiego del Silicio poroso come diffusore di luce, se la distribuzione spettrale dell'intensità della radiazione incidente non si modifica apprezzabilmente nell'arco temporale di lavoro del concentratore. La riflettanza media del p-Si nell'intero intervallo spettrale considerato si aggira intorno al 50% (51.4%).

La riflettanza emisferica totale risolta nell'angolo d'incidenza è stata misurata impiegando l'apparato CAR (Continuous Angle Reflectometer), realizzato all'ENEA di Portici e impiegato per la prima volta per misure di riflettanza. Esso è descritto schematicamente in Fig. 6 ed illustrato nelle foto di Fig. 7. Come sorgente (l) è stato impiegato un laser He-Ne Melles-Griot da ~10 mW operante a 543 nm (verde), un laser He-Ne Lot-Oriel da ~25 mW operante a 633 nm (rosso), e un laser diode-pumped solid

state BWTEK da ~50 mW operante a 1064 nm (NIR). Tutti i laser impiegati operano in modo CW. In alternativa, possono essere impiegate sorgenti a lampada accoppiate a un monocromatore per investigare un più ampio spettro di lunghezze d'onda. Il fascio laser, filtrato da (d) e (f), modulato meccanicamente dal "chopper" (ch) e controllato in intensità dal fotorivelatore ( $r_1$ ), incide sul campione da caratterizzare, posto su una finestra della sfera integratrice (is).



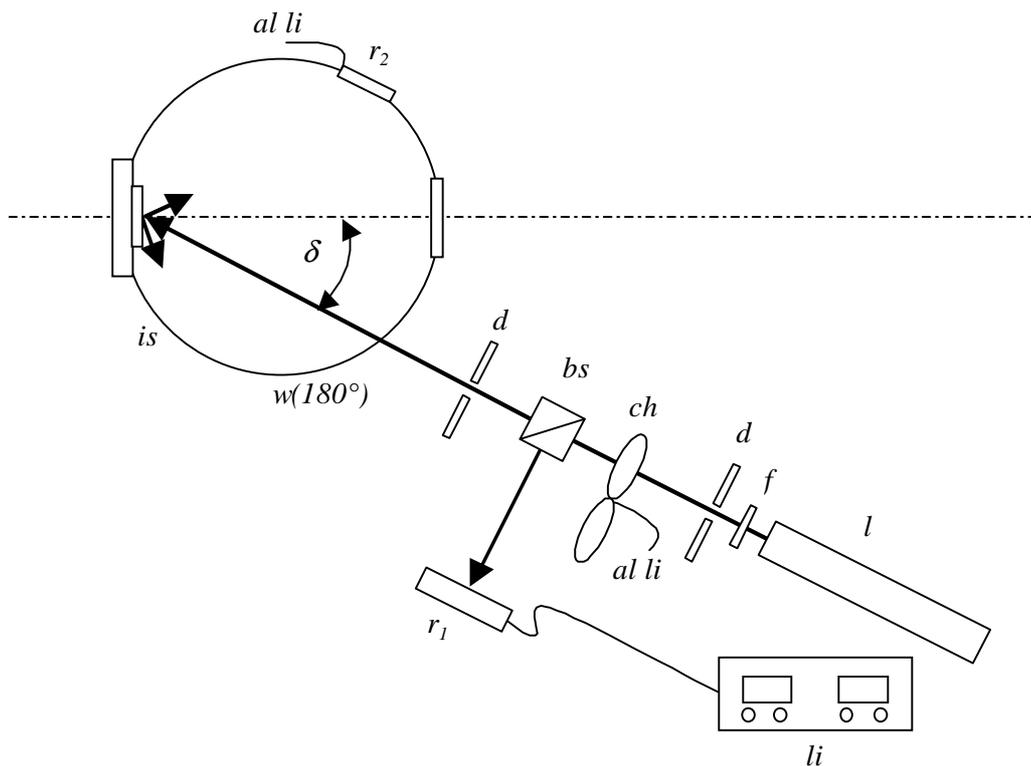
**Figura 4** - Curve di riflettanza emisferica, ad incidenza di  $8^\circ$ , della serie completa di standards da 2" di diametro della Labsphere



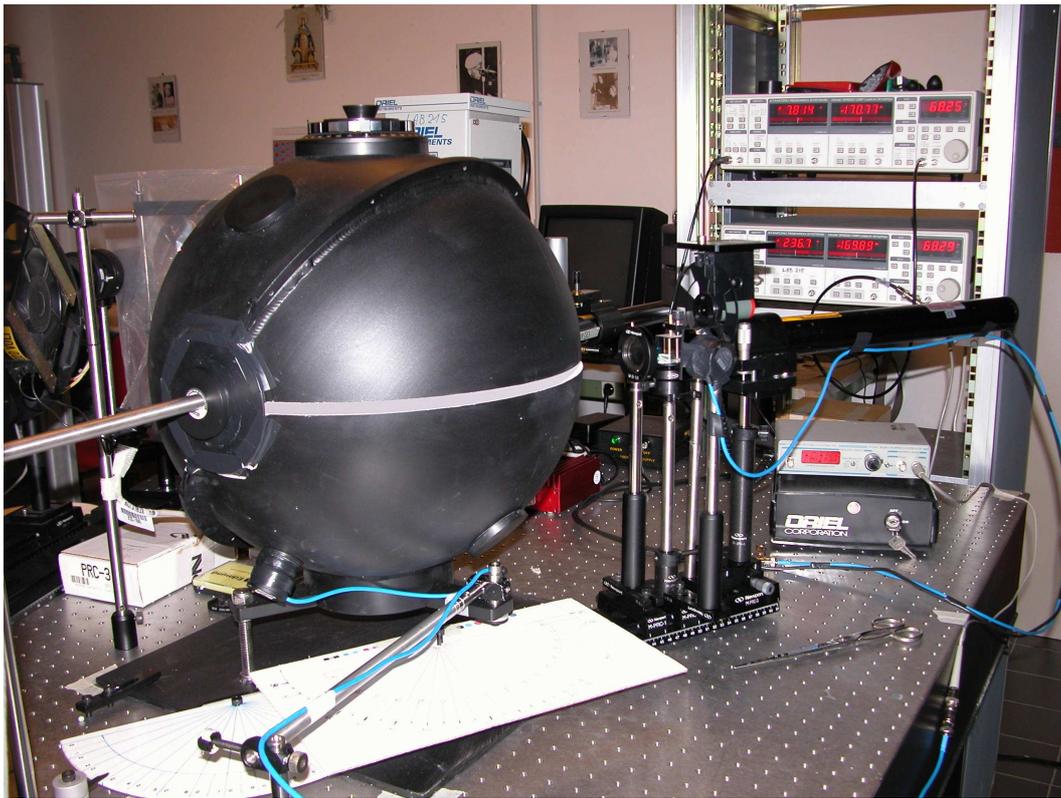
**Figura 5** - Riflettanza spettrale emisferica, ad incidenza di  $8^\circ$ , del campione di Silicio poroso, misurata allo spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 900.

La radiazione totale riflessa dal campione è raccolta dalla sfera, integrata e misurata dal fotorivelatore ( $r_2$ ). Sia ( $r_1$ ) che ( $r_2$ ) sono collegati al lock-in (li) che provvede ad amplificare selettivamente il segnale modulato alla frequenza del chopper. La sfera integratrice dell'apparato CAR è provvista di una fenditura ( $w$ ), larga  $\sim 1$  cm ed estesa ad un arco di  $180^\circ$  sul piano equatoriale.

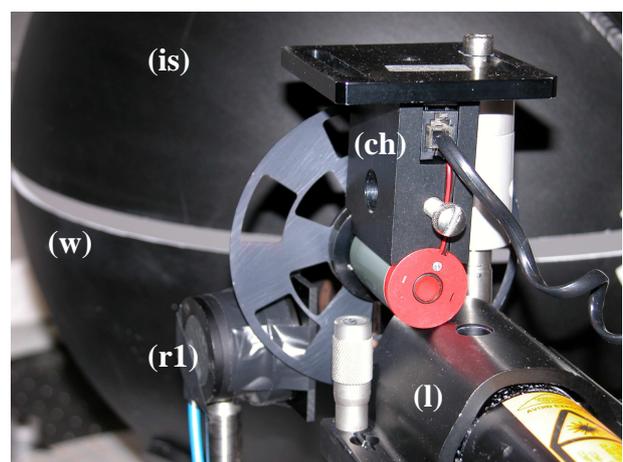
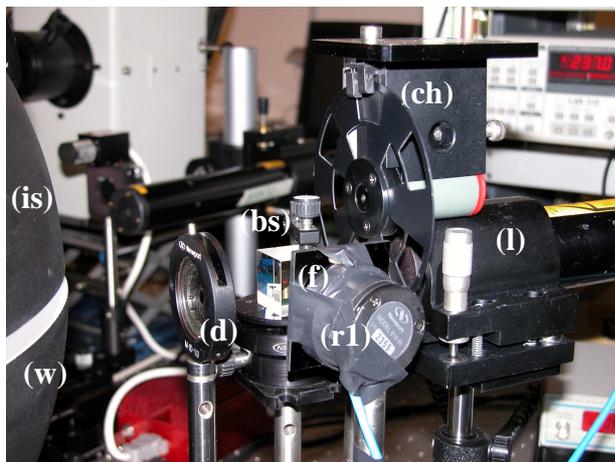
Grazie ad essa è possibile variare con continuità l'angolo d'incidenza del fascio sul campione. A tal fine è stato necessario montare la sorgente con i relativi accessori su un binario ( $b$ ) che viene ruotato dell'angolo  $\delta$ , letto dal goniometro ( $g$ ), rispetto all'asse verticale passante per il centro del campione. Con questa configurazione è stato possibile effettuare misure entro un intervallo continuo di valori tra  $\sim 10^\circ$  e  $\sim 80^\circ$ . La calibrazione delle misure è effettuata misurando il segnale corrispondente ad uno o più standard Labsphere ad un angolo di  $\sim 10^\circ$  ed assegnando ad esso la riflettanza spettrale riportata nei certificati di calibrazione (vedi Fig. 4).



**Figura 6** - Rappresentazione schematica dell'apparato CAR (Continuous Angle Reflectometer) per la misura della riflettanza totale risolta nell'angolo d'incidenza.



*Figura 7a - Foto d'insieme dell'apparato CAR (Continuous Angle Reflectometer).*



*Figure 7b - Particolari dell'apparato CAR.*

### 2.1.1 Standard di riflettanza Labsphere

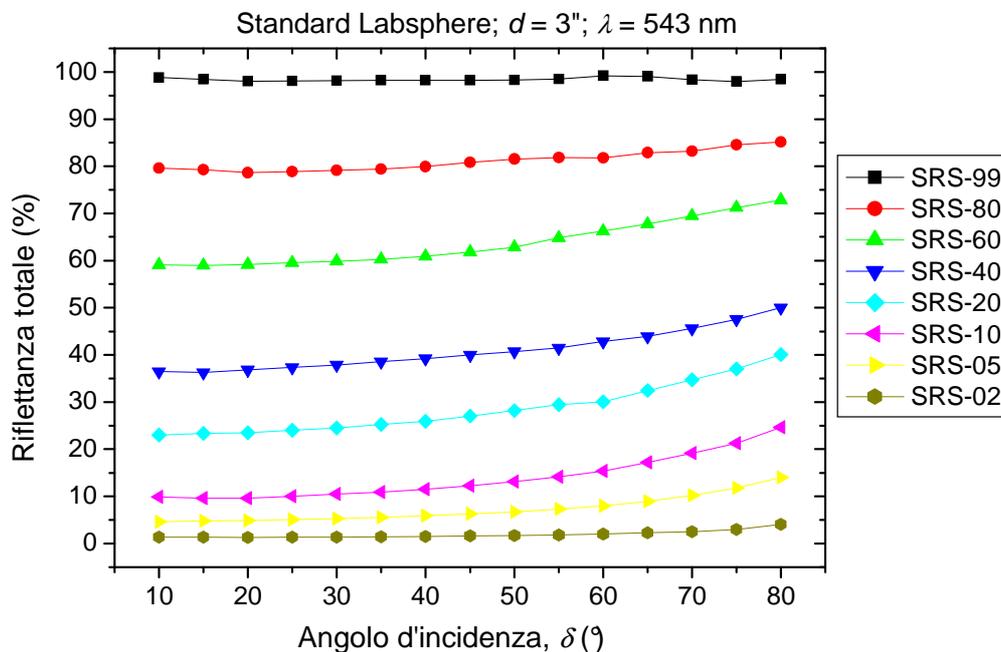
Le misure di riflettanza emisferica totale sono state svolte sulla serie completa di campioni Labsphere da 3" di diametro, con riflettanza nominale indicata tra parentesi: SRS-02-030 (2%), SRS-05-030 (5%), SRS-10-030 (10%), SRS-20-030 (20%), SRS-40-030 (40%), SRS-60-030 (60%), SRS-80-030 (80%) e SRS-99-030 (99%). La riflettanza emisferica totale

della serie di campioni Labsphere,  $R_{tot}(\delta)$ , misurata in funzione dell'angolo d'incidenza  $\delta$ , alle lunghezze d'onda di 543, 633 e 1064 nm, è riportata nelle Figg. 8, 9 e 10. Come era da aspettarsi per essere degli standard di luce diffusa, i campioni presentano buone caratteristiche di lambertianità, pur non essendo dei diffusori lambertiani ideali (vedi Appendice A). La proprietà di un diffusore lambertiano di mantenere la riflettanza emisferica costante con l'angolo d'incidenza è qui rispettata bene nei campioni con riflettanza nominale più alta.

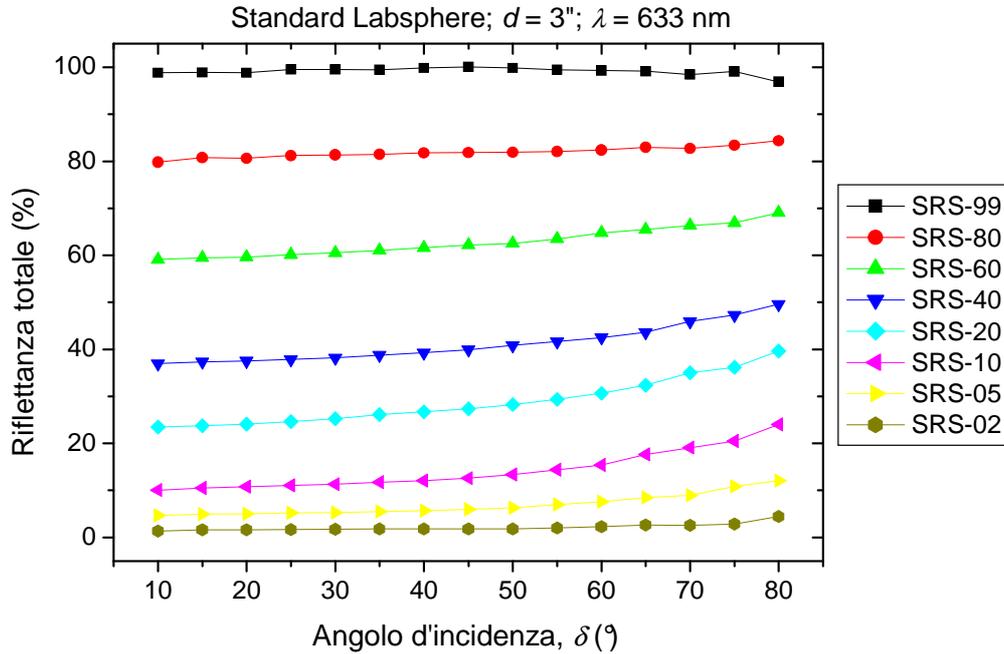
Per poter valutare meglio lo scostamento dall'idealità nei vari campioni, è stato calcolato (vedi Tab. I) l'incremento relativo della riflettanza totale,  $\Delta R_{tot}(\%)$ , passando da  $10^\circ$  a  $40^\circ$ , essendo quest'ultimo un angolo d'incidenza significativo nel progetto del concentratore solare termodinamico (vedi Appendice B).

Si trova che  $\Delta R_{tot}(\%)$  cresce monotonamente al diminuire della riflettanza nominale, se si fa eccezione per il dato di SRS-02 a 543 nm, che può essere spiegato dal comportamento anomalo del campione SRS-02 a questa lunghezza d'onda, come risulta dalla Sezione 2.2.1.

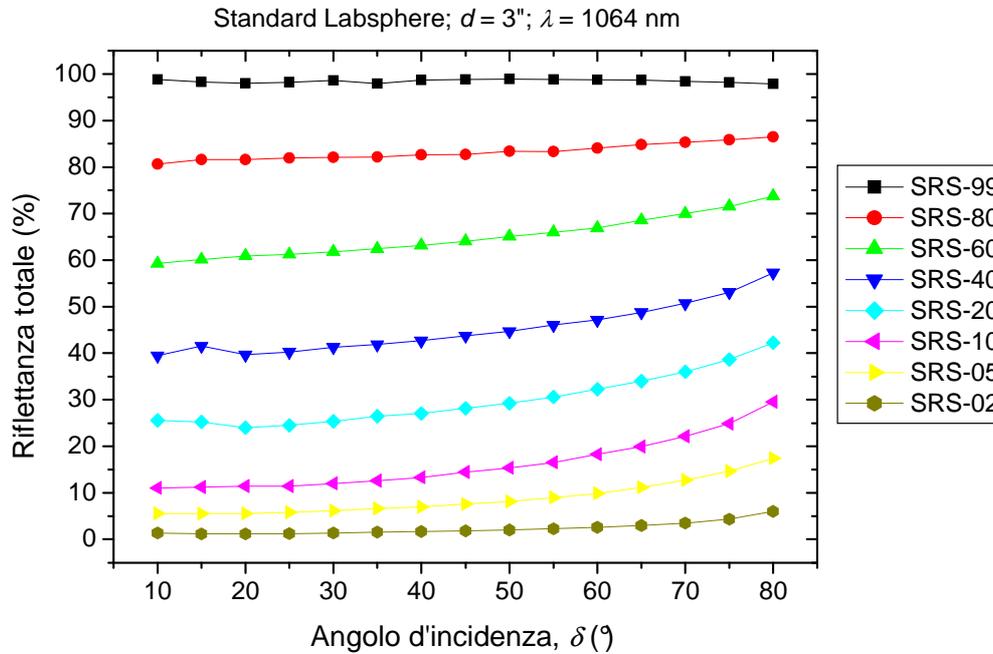
La grandezza  $\Delta R_{tot}(\%)$ , inoltre, cresce con l'aumentare della lunghezza d'onda. Per i campioni SRS-99, SRS-80, SRS-60 e SRS-40, l'incremento relativo si mantiene al di sotto del 10%. Come vedremo analizzando la distribuzione angolare della luce diffusa (Sezione 2.2.1.), i quattro campioni citati sono quelli che manifestano un comportamento più prossimo a quello ideale (vedi Appendice A). Per questi campioni, i dati di riflettanza sono riassunti nella Fig. 11.



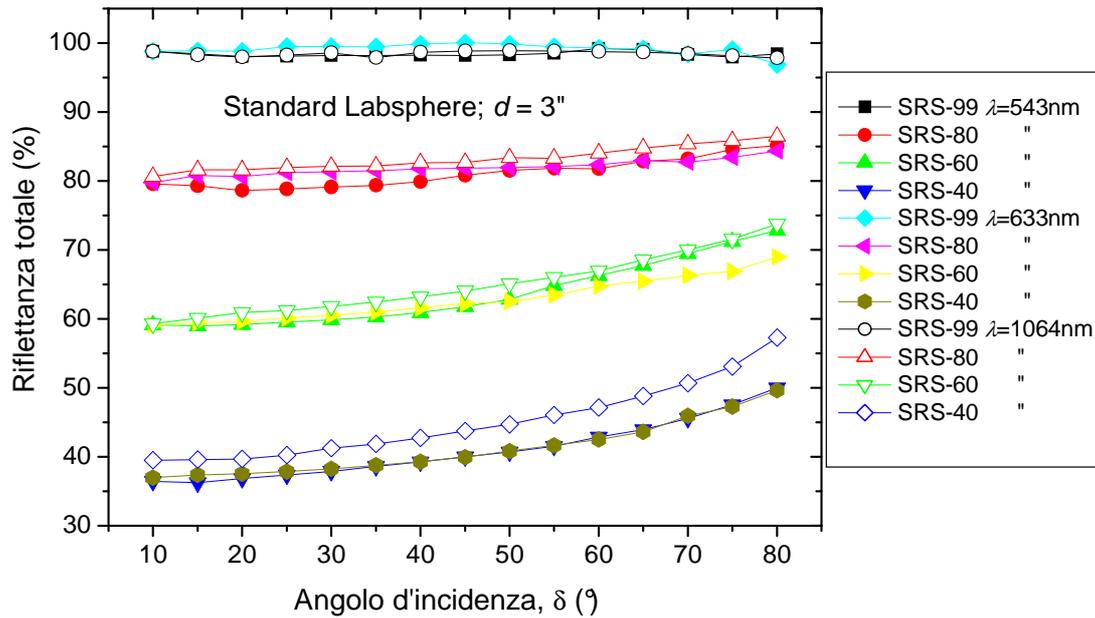
**Figura 8** - Riflettanza emisferica totale vs. l'angolo d'incidenza  $\delta$  per la serie di campioni standard Labsphere da 3" ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ).



**Figura 9** - Riflettanza emisferica totale vs. l'angolo d'incidenza  $\delta$  per la serie di campioni standard Labsphere da 3'' ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ).



**Figura 10** - Riflettanza emisferica totale vs. l'angolo d'incidenza  $\delta$  per la serie di campioni standard Labsphere da 3'' ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ).



**Figura 11** - Confronto tra le curve di riflettanza emisferica totale ricavate alle lunghezze d'onda di 543 nm, 633 e 1064 nm, per la serie di campioni standard Labsphere da 3" a più alta riflettanza nominale.

**Tabella I** - Variazione relativa della riflettanza emisferica, nel passaggio da  $\delta=10^\circ$  a  $\delta=40^\circ$ , per le tre lunghezze d'onda esaminate. Nei campioni SRS-XX riflettanza emisferica diffusa e totale si equivalgono, mentre nel campione p-Si esse si differenziano a causa della presenza di una netta componente speculare (vedi Sez. 2.2.2).

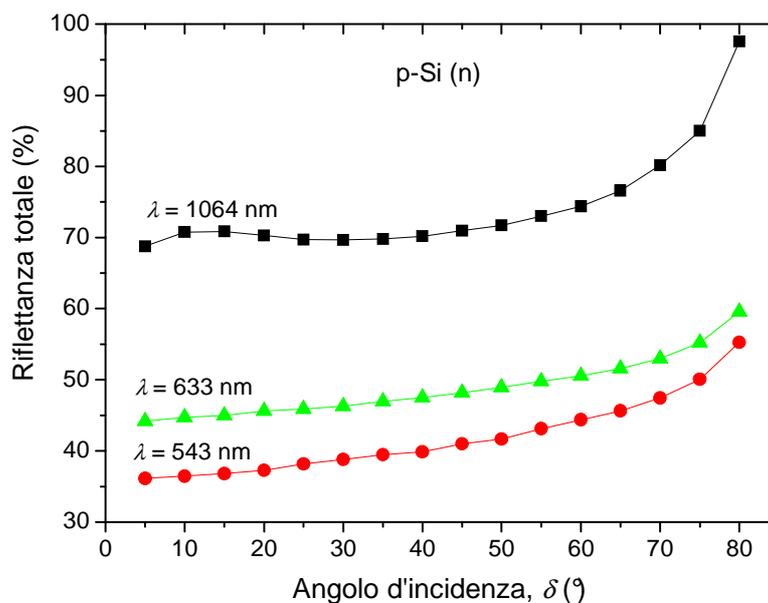
Campione	$\Delta R_{tot}$ (%)		
	$\lambda=543$ nm	$\lambda=633$ nm	$\lambda=1064$ nm
SRS-99	-0.58	1.05	-0.13
SRS-80	0.40	2.53	2.48
SRS-60	3.03	4.23	6.51
SRS-40	7.71	6.19	8.20
SRS-20	12.54	13.74	5.92
SRS-10	16.19	20.16	20.50
SRS-05	28.60	21.02	25.81
SRS-02	8.21	30.5	23.12
p-Si(n)			
$R_{tot}$	11.43	6.18	-0.83
$R_{diff}$	5.80	3.87	0.11

### 2.1.2 Campioni di Silicio poroso

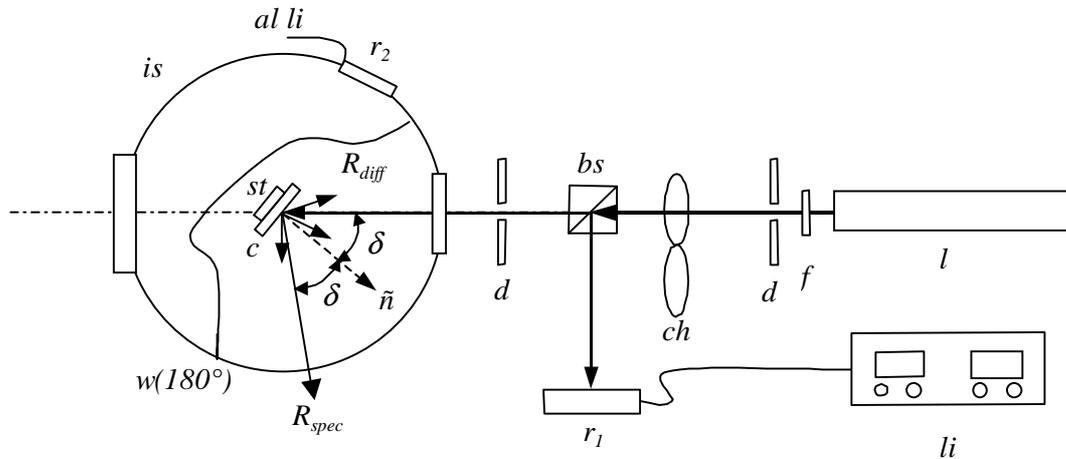
La riflettanza emisferica totale del Silicio poroso, misurata in funzione di  $\delta$  e  $\lambda$  con l'apparato CAR secondo lo schema di Fig. 6, è riportata in Fig. 12. Essa manifesta un comportamento simile a quello dei campioni Labsphere per quanto riguarda l'aumento della riflettanza totale all'aumentare dell'angolo d'incidenza. Occorre però tener presente che, diversamente dai diffusori Labsphere, il Silicio poroso presenta una componente speculare. Questa componente può essere trascurata ai fini della misura dell'irradianza totale incidente, come è stato discusso nell'Introduzione, in quanto, per valutare le caratteristiche di lambertianità del Silicio poroso, è sufficiente analizzare le caratteristiche della sola componente diffusa. A tal fine, è stato necessario modificare la configurazione dell'apparato CAR in modo da estrarre dalla sfera la componente speculare della luce riflessa e misurare solo la componente diffusa.

Lo schema dell'apparato CAR modificato è mostrato in Fig. 13. La sorgente (l) è ora mantenuta fissa e allineata con l'asse principale della sfera (is). Il campione (c) è fissato ad un portacampioni (pc) (non mostrato in figura) che lo mantiene al centro della sfera (is). Dietro il campione (c) è posto uno standard di riflettanza (st) per la calibrazione della misura. Ruotando il portacampioni attorno ad un asse verticale, è possibile variare con continuità l'angolo d'incidenza  $\theta$  del fascio laser sul campione.

La componente speculare della radiazione riflessa,  $R_{spec}$ , è estratta dalla sfera per mezzo della fenditura emisferica  $w(180^\circ)$ , mentre la componente diffusa della radiazione riflessa,  $R_{diff}$ , è raccolta dalla sfera, integrata e misurata dal fotorivelatore ( $r_2$ ) e dal lock-in (li). Con questa configurazione è stato possibile misurare la riflettanza diffusa per angoli d'incidenza continui nell'intervallo di valori tra  $\sim 0^\circ$  e  $\sim 80^\circ$ .

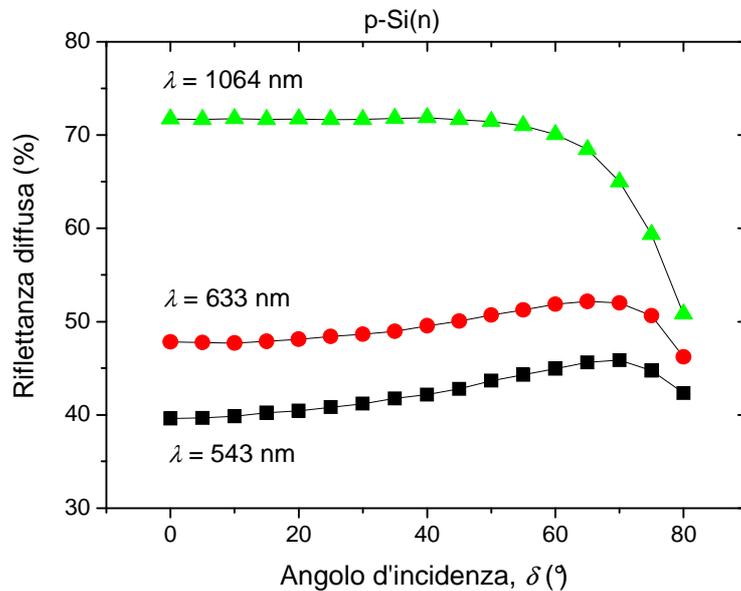


**Figura 12** - Riflettanza emisferica totale vs. l'angolo d'incidenza  $\delta$  per il campione di Silicio poroso, alle lunghezze d'onda di 543 nm, 633 e 1064 nm.



**Figura 13** - Rappresentazione schematica dell'apparato CAR per la misura della riflettanza diffusa risolta nell'angolo d'incidenza.

La riflettanza diffusa del Silicio poroso, misurata alle lunghezze d'onda di 543, 633 e 1064 nm in funzione dell'angolo d'incidenza, è mostrata in Fig. 14.



**Figura 14** - Riflettanza diffusa vs. l'angolo d'incidenza  $\delta$  per il campione di Silicio poroso, alle lunghezze d'onda di 543 nm, 633 e 1064 nm.

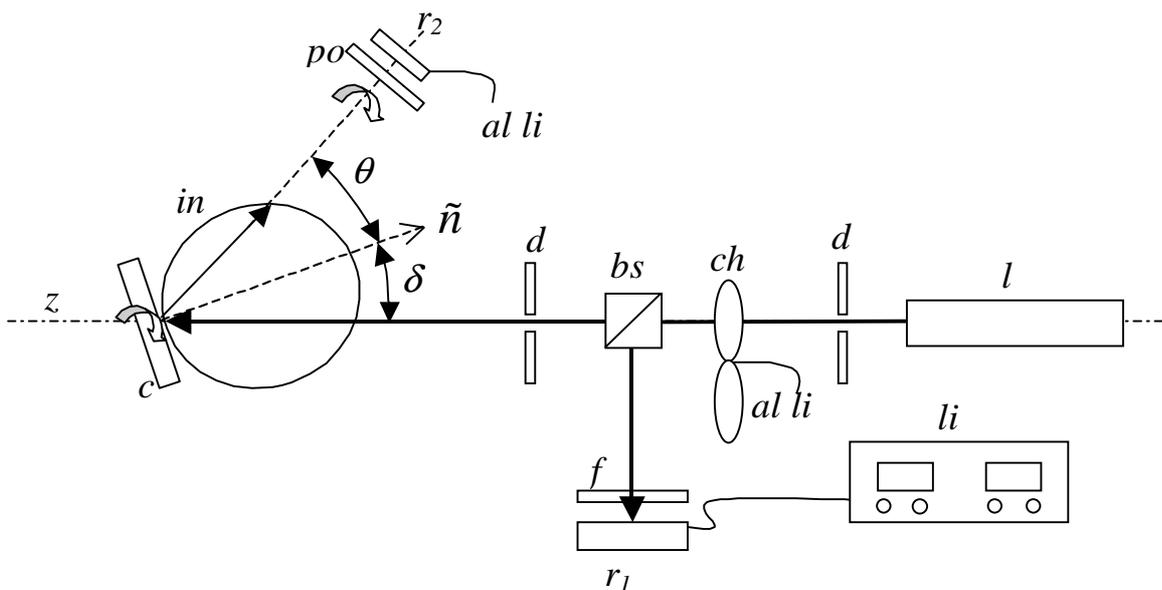
Come la riflettanza totale, a bassi angoli anche la riflettanza diffusa cresce lievemente al crescere dell'angolo d'incidenza. L'incremento relativo della riflettanza, in analogia al caso dei diffusori Labsphere, è stato calcolato anche per il p-Si ed è riportato in Tab. I. Si ottengono dei valori di  $\Delta R_{tot}(\%)$  molto bassi, confrontabili con quelli trovati per i campioni più riflettenti della Labsphere. Questo dimostrerebbe le eccellenti qualità diffuse del silicio poroso. La crescita della riflettanza si interrompe intorno ai 60° e si ha una

progressiva riduzione della riflettanza diffusa verso lo zero. Questo fatto è legato alla comparsa di una componente speculare che aumenta con l'angolo d'incidenza e sottrae energia alla componente diffusa. Essa trae origine dalla particolare struttura del silicio poroso, come si vedrà nella Sezione 3.1.2.

## 2.2 Distribuzione angolare dell'intensità diffusa

La distribuzione angolare dell'intensità della radiazione diffusa è rappresentata da una curva (in 2D) oppure da una superficie (in 3D), chiamata "indicatrice" ("indicatrix" [2]). Per la misura dell'indicatrice, è stato allestito l'apparato ottico mostrato schematicamente in Fig. 15 e riprodotto nella foto di Fig. 16. Il fascio collimato della sorgente (l) è modulato meccanicamente da (ch), monitorato dal rivelatore ( $r_1$ ) e dal lock-in (li) e incide sul campione (c) con angolo  $\delta$ . La luce diffusa dal campione è descritta dalla curva indicatrice (in) (vedi Fig. 15), che descrive la variazione dell'intensità diffusa in funzione dell'angolo d'osservazione  $\theta$ .

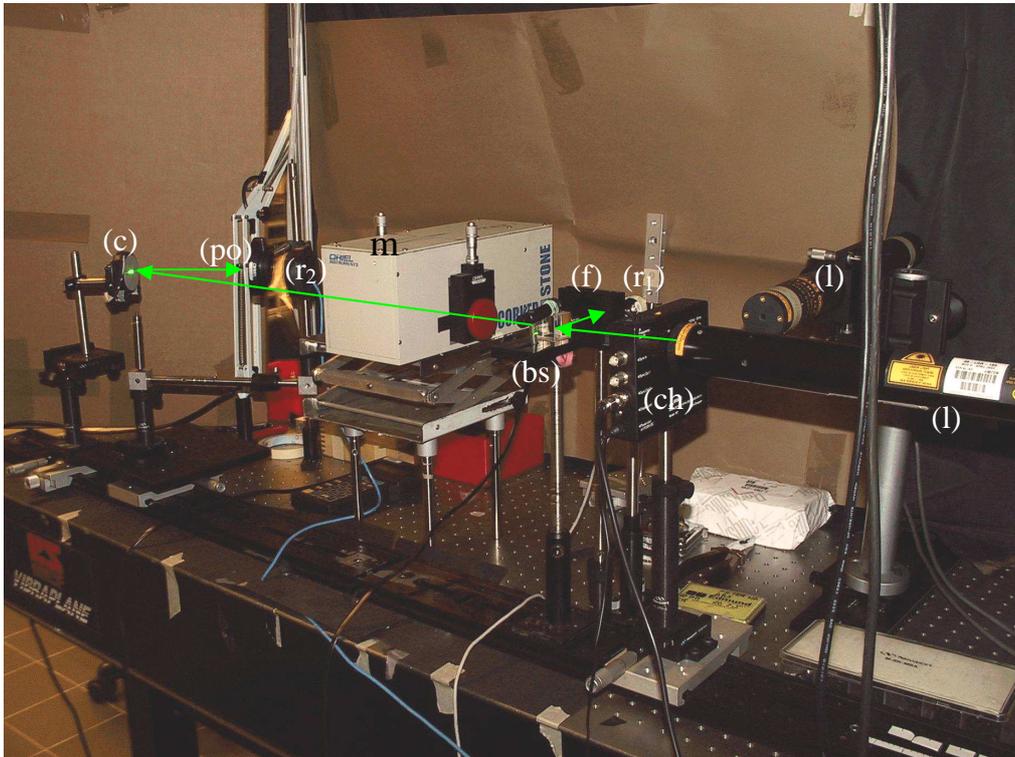
**Errore.**



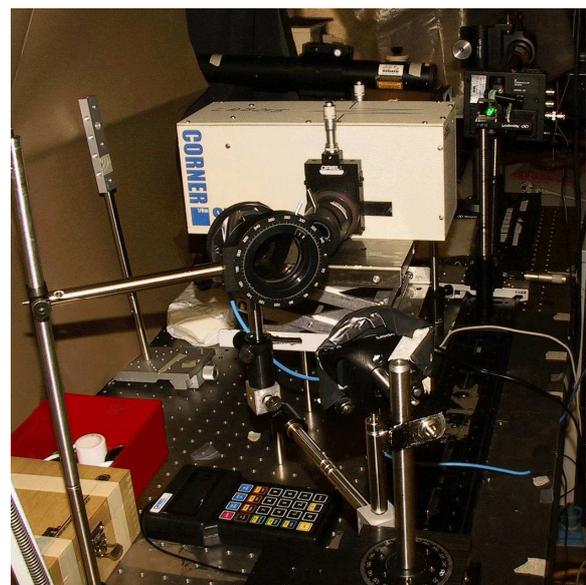
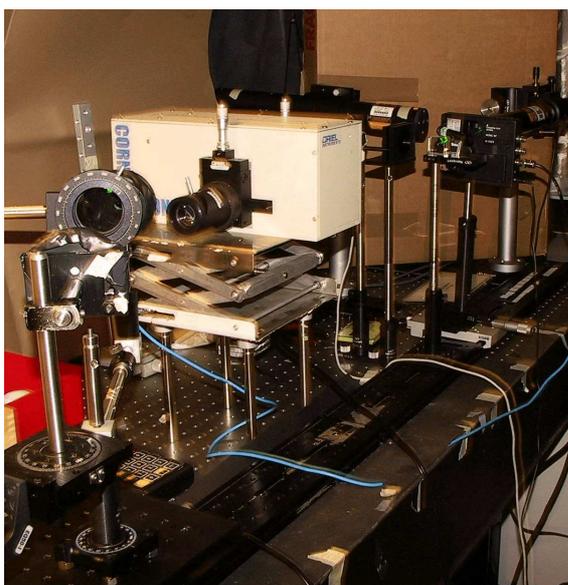
**Figura 15** - Apparato per la misura della distribuzione angolare dell'intensità diffusa e della polarizzazione.

L'intensità diffusa è misurata dal rivelatore ( $r_2$ ) e dal lock-in (li). Le misure vengono fatte variando  $\theta$  da  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$  in quanto, per  $\delta \neq 0$ , la curva indicatrice non è simmetrica rispetto all'asse  $\tilde{n}$  normale alla superficie del campione. Se il campione è un diffusore lambertiano, la curva indicatrice è rappresentata naturalmente da un cerchio (vedi Appendice A).

La polarizzazione della luce diffusa verso la direzione  $\theta$ , è misurata interponendo il polarizzatore (po) davanti a ( $r_2$ ). In alternativa al laser, si può impiegare una sorgente a lampada con monocromatore (m).



**Figura 16a** - Foto dell'apparato ottico per la misura della distribuzione angolare dell'intensità e della polarizzazione della luce diffusa. Il campione è illuminato da luce verde ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ). E' indicato anche il percorso di un raggio virtuale di luce.



**Figure 16b** - Foto con altri particolari dello scatterometro per la misura della distribuzione angolare dell'intensità e della polarizzazione della luce diffusa.

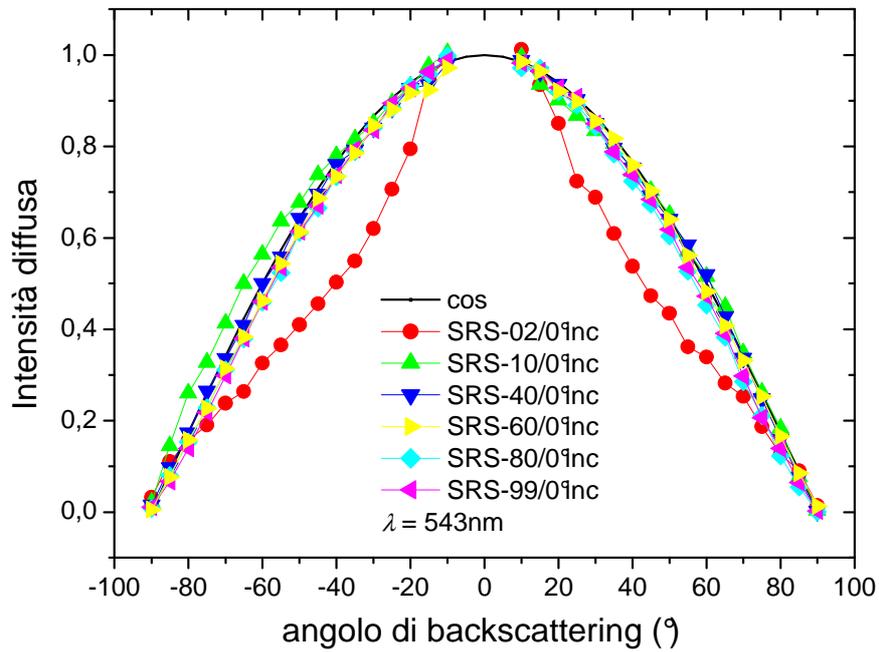
### 2.2.1 Standard di riflettanza Labsphere

Le misure di distribuzione angolare dell'intensità sono state svolte sui campioni SRS-02-020, SRS-10-020, SRS-40-020, SRS-60-020, SRS-80-020, SRS-99-020, scegliendo, per l'angolo d'incidenza, i valori:  $\delta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  e  $40^\circ$ , secondo quanto risultato dallo studio riportato in Appendice B. I campioni SRS-05-020 e SRS-20-020 sono stati al momento tralasciati per non appesantire troppo le misure, potendo essere caratterizzati in seguito, qualora necessario.

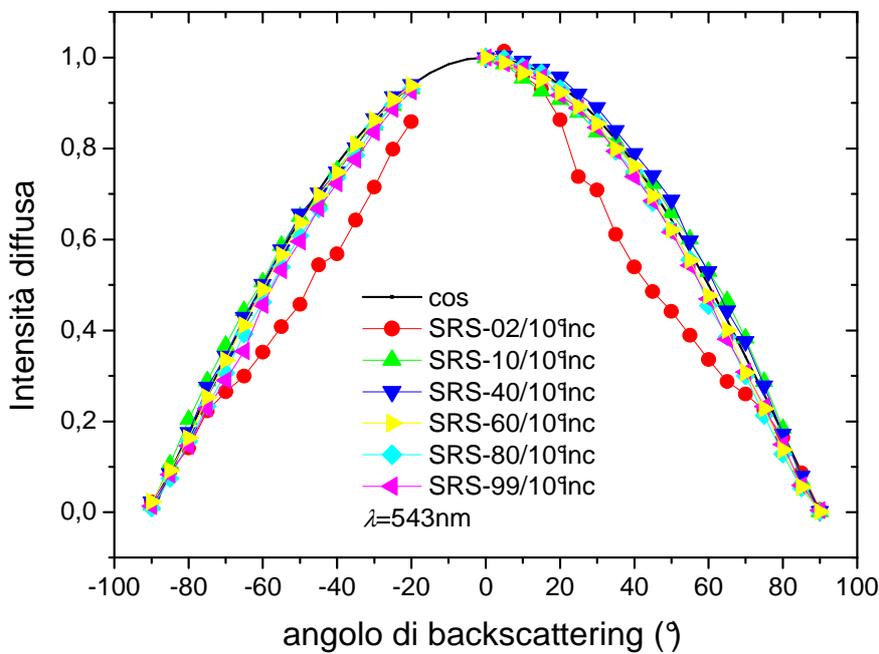
Le prime misure sono state effettuate a  $\lambda = 543$  nm (verde), utilizzando un laser He-Ne Melles Griot da 15 mW, non polarizzato. I risultati sono riportati nelle Figg. 17-21. Nelle Figg. 17-21 è riportata anche la curva di riferimento  $\cos^2$  che serve a mostrare quanto la curva sperimentale si discosta da quella del diffusore ideale. Nelle curve mostrate, gli angoli negativi rappresentano gli angoli misurati dalla parte del fascio incidente e quindi sono affetti da una zona d'ombra prodotta dal photorivelatore, mentre quelli positivi rappresentano gli angoli misurati dalla parte del fascio "speculare", immaginando il diffusore come uno specchio. Tutte le curve sono state normalizzate ponendo uguale all'unità l'intensità diffusa all'angolo di scattering di  $0^\circ$ . Nella realtà, le curve corrispondenti ad angoli d'incidenza maggiori sono lievemente più intense. Come si può notare nella Fig. 17 (angolo d'incidenza  $\delta = 0^\circ$ ), tutti i campioni, eccetto lo SRS-02, quello più scuro, mostrano un comportamento quasi-lambertiano; più in particolare notiamo che i campioni dal 40% al 99% mostrano un ottimo comportamento lambertiano. Il campione 2% invece mostra un forte carattere speculare. In corrispondenza dell'angolo d'incidenza  $\delta = 10^\circ$  (Fig. 18), la situazione migliora in quanto tutti i campioni dal 10% al 99% possono essere considerati lambertiani, pur rimanendo il campione 2% molto lontano dall'idealità e con forte carattere speculare. La situazione cambia notevolmente all'angolo d'incidenza  $\delta = 20^\circ$  (Fig. 19) per il campione 2%, il quale si trasforma in un diffusore lambertiano, se si eccettua il piccolo riflesso speculare a  $+20^\circ$ . Contemporaneamente il campione 10% esce dall'idealità mostrando una gobba speculare. Gli altri campioni si mantengono lambertiani. In corrispondenza dell'angolo d'incidenza  $\delta = 30^\circ$  (Fig. 20), la situazione peggiora per molti campioni.

Intanto il campione 2% mostra un netto riflesso speculare, si accentua per il campione 10% la gibbosità speculare, e il campione 40% comincia anch'esso a mostrare una gibbosità speculare. A quest'angolo d'incidenza, inoltre, i campioni 2% e 10% cominciano a mostrare un riflesso speculare indietro, ovvero verso la sorgente. L'angolo d'incidenza  $\delta = 40^\circ$  (Fig. 21) allontana quasi tutti i campioni dall'idealità, pur se in diversa misura. I campioni che possono essere ancora considerati lambertiani sono l'80% e il 99%; in misura minore lo è il 60%. Se l'angolo d'incidenza limite da considerare è di  $30^\circ$  (Progetto phoCUS), la serie di diffusori adatti alla caratterizzazione del fascio sono: 40%, 60%, 80% e 99%. Se invece l'angolo d'incidenza limite da considerare è di  $40^\circ$  (Progetto Solare Termodinamico), la serie di diffusori adatti alla caratterizzazione del fascio sono: 60%, 80% e 99%.

Misure d'intensità diffusa sono state effettuate anche nel NIR a  $\lambda = 1064$  nm utilizzando un Diode-Pumped Solid State Laser BWR-50-E della BWTEK. I risultati sono riportati nelle Figg. 22-24. A questa lunghezza d'onda, i quattro campioni selezionati dopo la prima serie di misure a  $\lambda = 543$  nm mostrano tutti un comportamento molto prossimo a quello ideale.



*Figura 17 - Intensità diffusa vs.  $\theta$  per l'angolo d'incidenza  $\delta = 0^\circ$  ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ).*



*Figura 18 - Intensità diffusa vs.  $\theta$  per l'angolo d'incidenza  $\delta = 10^\circ$  ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ).*

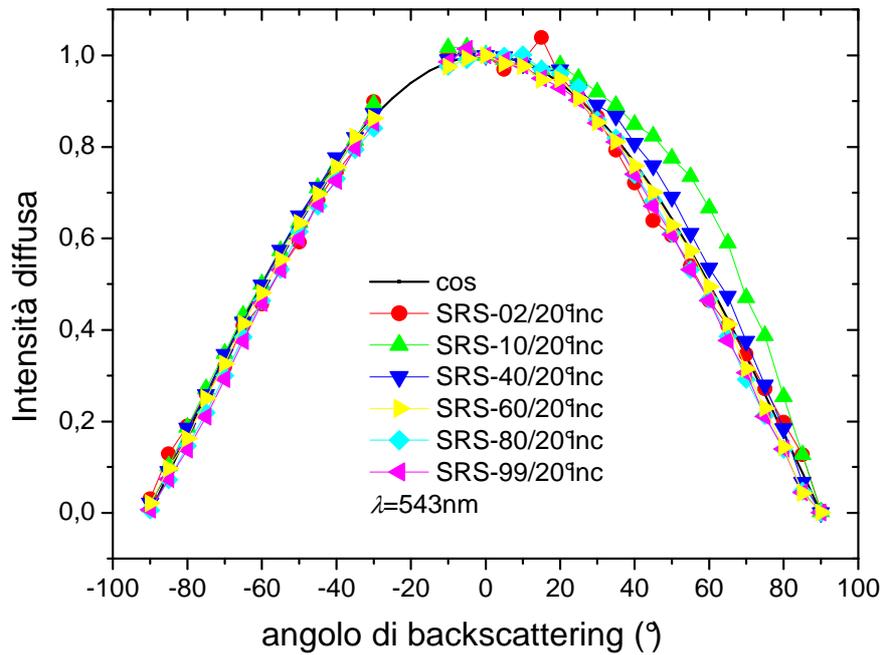


Figura 19 - Intensità diffusa vs.  $\theta$  per l'angolo d'incidenza  $\delta = 20^\circ$  ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ).

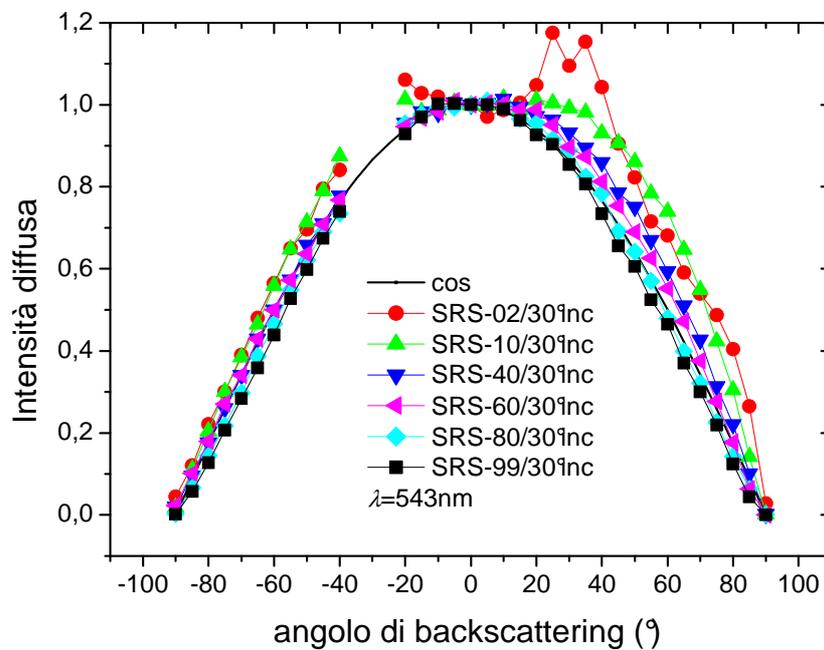
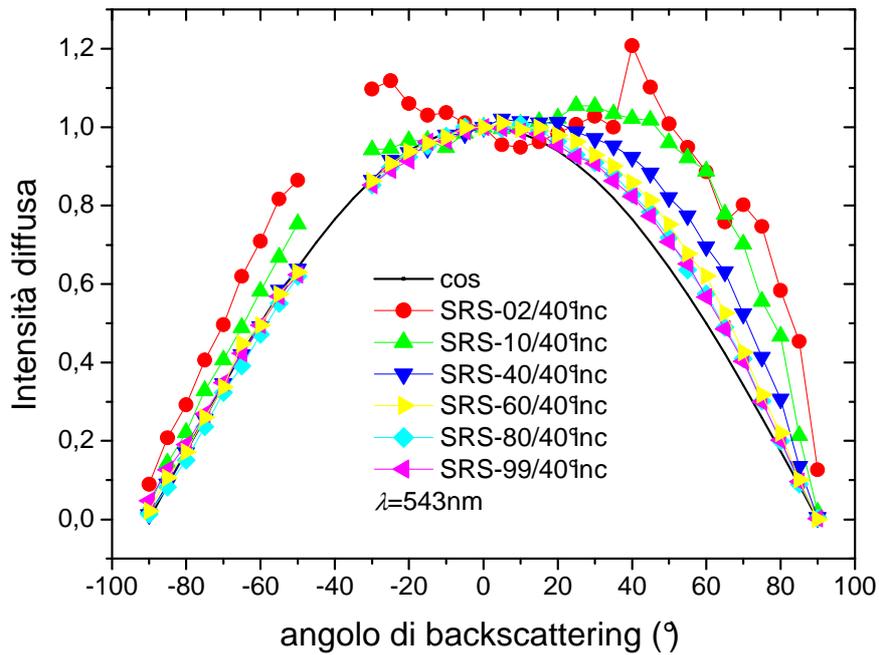
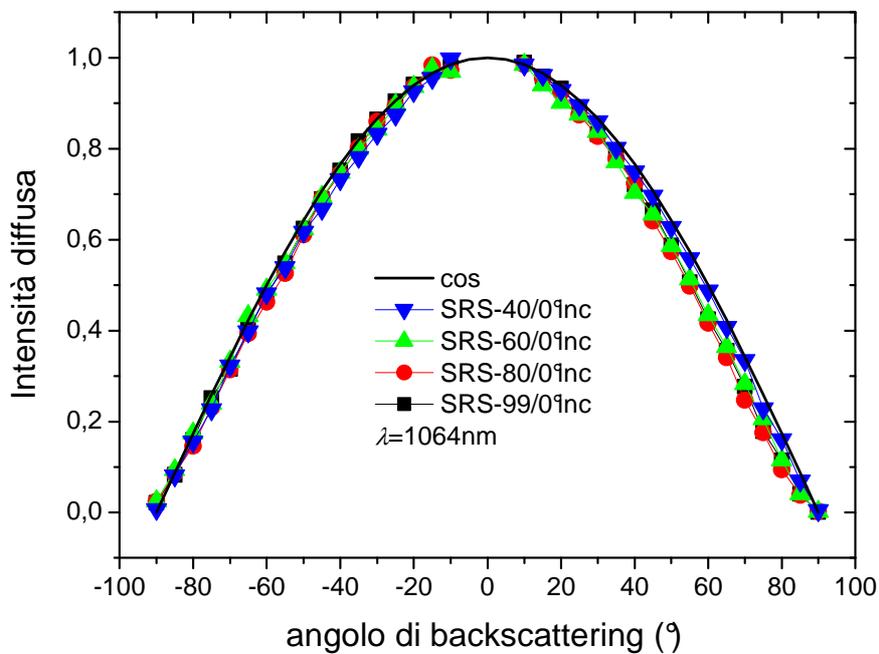


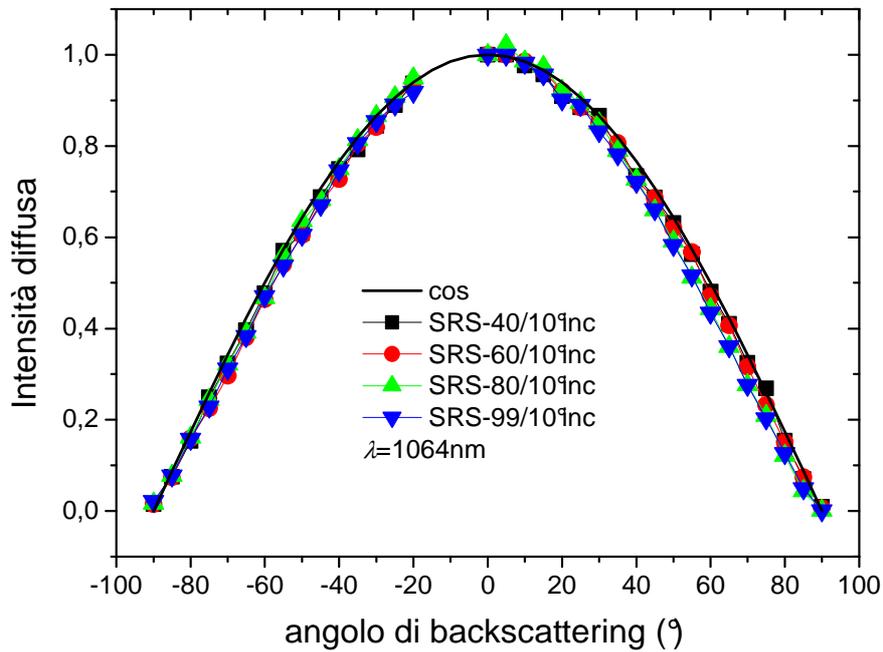
Figura 20 - Intensità diffusa vs.  $\theta$  per l'angolo d'incidenza  $\delta = 30^\circ$  ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ).



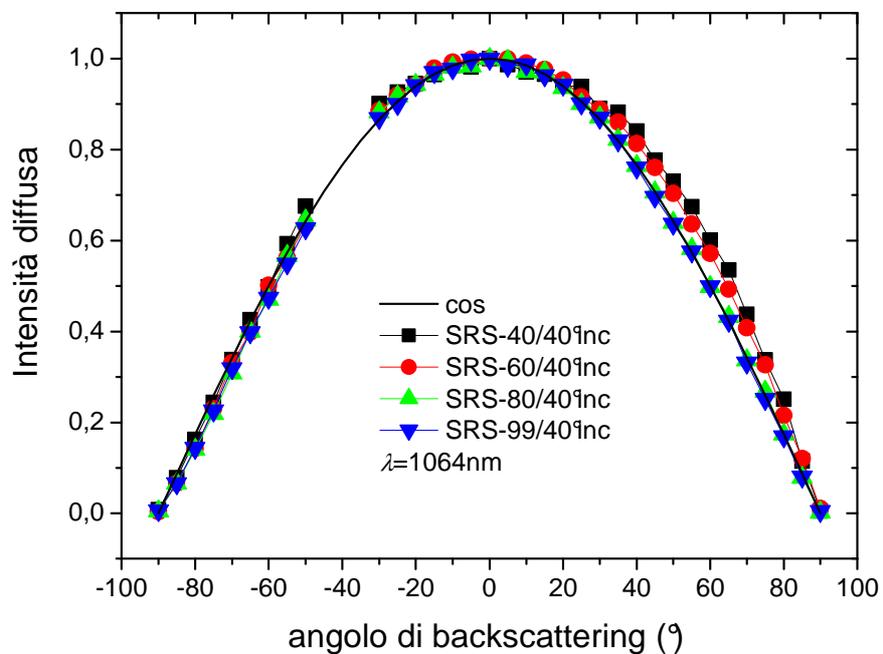
**Figura 21** - Intensità diffusa vs.  $\theta$  per l'angolo d'incidenza  $\delta = 40^\circ$  ( $\lambda = 543$  nm).



**Figura 22** - Intensità diffusa vs.  $\theta$  per l'angolo d'incidenza  $\delta = 0^\circ$  ( $\lambda = 1064$  nm).



**Figura 23** - Intensità diffusa vs.  $\theta$  per l'angolo d'incidenza  $\delta = 10^\circ$  ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ).

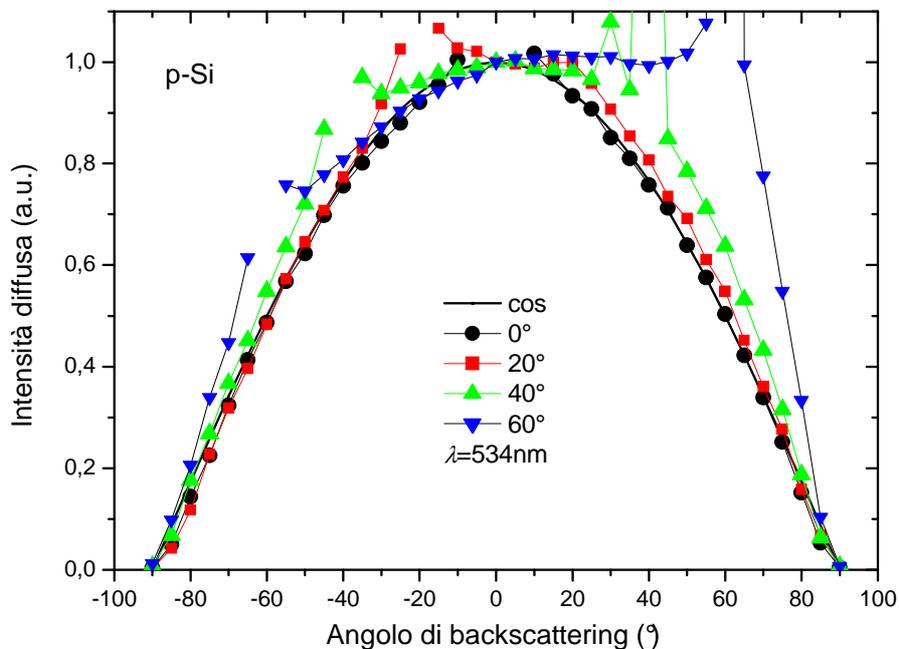


**Figura 24** - Intensità diffusa vs.  $\theta$  per l'angolo d'incidenza  $\delta = 40^\circ$  ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ).

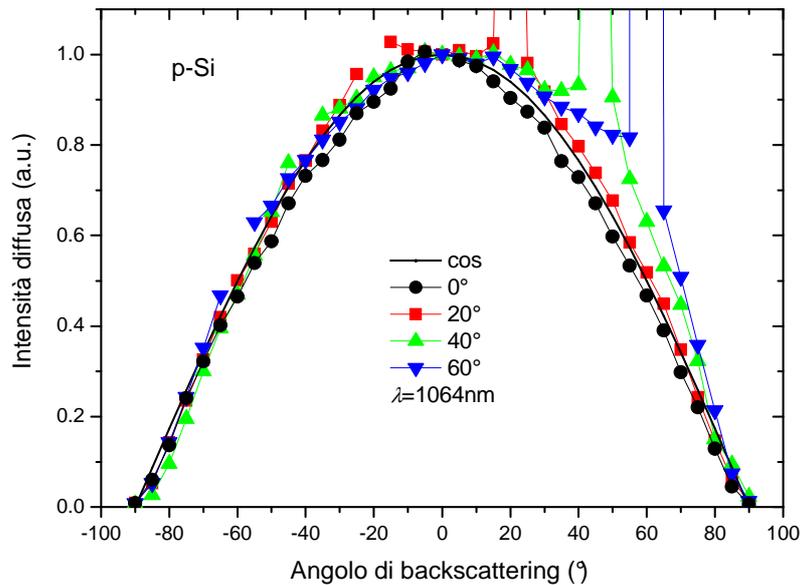
Evidentemente, la maggiore profondità di penetrazione nel materiale della radiazione NIR rispetto a quella visibile fa sì che essa sia più facilmente randomizzata dal materiale poroso e quindi fuoriesca con una distribuzione diffusa di tipo lambertiano. Questo aspetto verrà ampiamente discusso nella sezione dedicata alla caratterizzazione morfologica e strutturale al SEM. Dalle curve delle Figg. 22-24, come conseguenza di quanto affermato, si può notare la quasi completa assenza di caratteristiche riflesse di tipo speculare.

### 2.2.2 Campioni di Silicio poroso

Anche campioni di Silicio poroso con conducibilità di tipo n (colore giallo-oro) sono stati caratterizzati a  $\lambda = 543 \text{ nm}$  e  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ . Le curve d'intensità diffusa per uno di questi campioni, per angoli d'incidenza di  $\delta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$  e  $60^\circ$  sono mostrate nelle Figg. 25 e 26. La principale differenza del campione di p-Si(n) rispetto a quelli Labsphere è la presenza di una componente speculare che cresce con l'angolo  $\delta$ . La componente diffusa segue comunque un andamento pressoché lambertiano per  $\delta \leq 40^\circ$  per entrambe le lunghezze d'onda. Un leggero riflesso speculare all'indietro è presente per  $\lambda = 543 \text{ nm}$ . L'impiego del diffusore di Silicio poroso resta valido qualora si scelga opportunamente l'angolo di osservazione della VC rispetto al campione (Fig.2). In particolare, un angolo d'osservazione  $\theta > 40^\circ$  permette di escludere la raccolta di un raggio speculare con la telecamera. In alternativa, si può tentare di ottimizzare le proprietà diffuse del campione, ad esempio aumentando lo spessore dello strato di Silicio poroso.



**Figura 25** - Intensità diffusa vs.  $\theta$  del campione di Silicio poroso, misurata per diversi valori dell'angolo d'incidenza  $\delta$ . ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ).



**Figura 26** - Intensità diffusa vs.  $\theta$  del campione di Silicio poroso, misurata per diversi valori dell'angolo d'incidenza  $\delta$ . ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ).

## 2.3 Misure di polarizzazione della luce diffusa

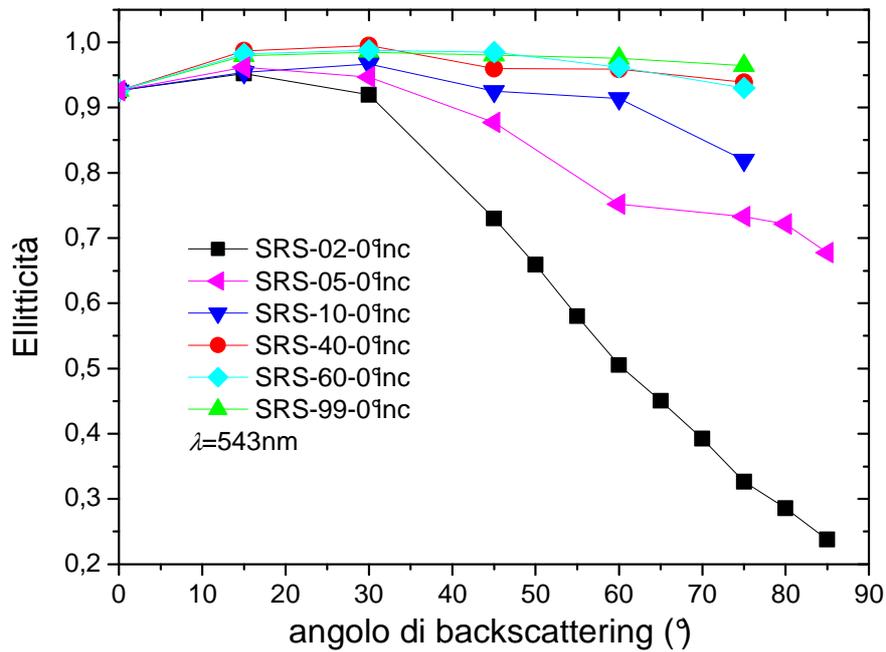
### 2.3.1 Standard di riflettanza Labsphere

Le curve di polarizzazione della luce diffusa per alcuni campioni Labsphere della serie SRS-xx-020 e relative a  $\lambda = 543 \text{ nm}$ , sono mostrate in Fig. 27. Le curve si riferiscono tutte ad un angolo d'incidenza di  $0^\circ$  ed esprimono la polarizzazione secondo il parametro "ellitticità", dato dal rapporto  $a/b$  tra semiasse minore e semiasse maggiore dell'ellissoide di polarizzazione.

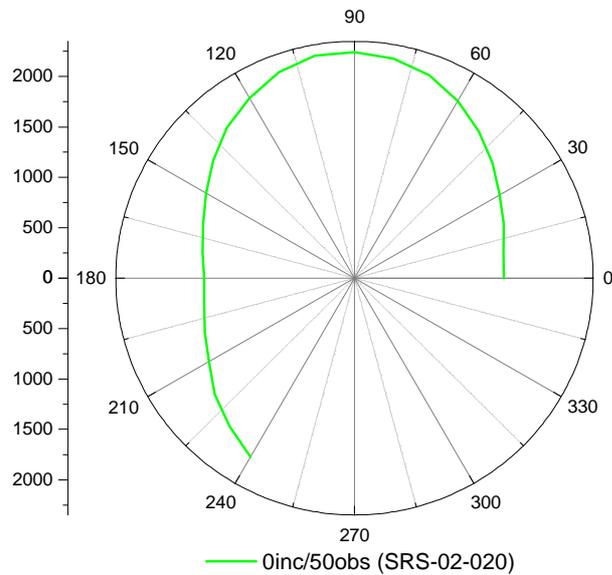
Dalla Fig. 27 risulta che soltanto i campioni meno riflettenti inducono una polarizzazione nella luce diffusa, e in misura crescente con l'angolo d'osservazione, in modo particolare il campione al 2%. In Fig. 28 è mostrato, a titolo d'esempio, la curva di polarizzazione misurata per il campione al 2% ad un angolo d'osservazione di  $50^\circ$ . I campioni Labsphere che hanno mostrato un comportamento quasi lambertiano, ovvero i campioni SRS-40/60/80/99 non mostrano un'apprezzabile polarizzazione della luce diffusa fino agli angoli più alti.

### 2.3.2 Campioni di Silicio poroso

Le misure del grado di polarizzazione della luce diffusa dai campioni di Silicio poroso hanno mostrato che nel NIR ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) la luce diffusa non è polarizzata affatto, mentre nel Vis ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ) essa è solo lievemente polarizzata, ma soltanto per gli angoli d'incidenza più alti.



**Figura 27** - Grado di polarizzazione della luce diffusa, espressa come “ellitticità”, in funzione dell’angolo d’osservazione, per un’incidenza costante di  $\delta = 0^\circ$  ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ).



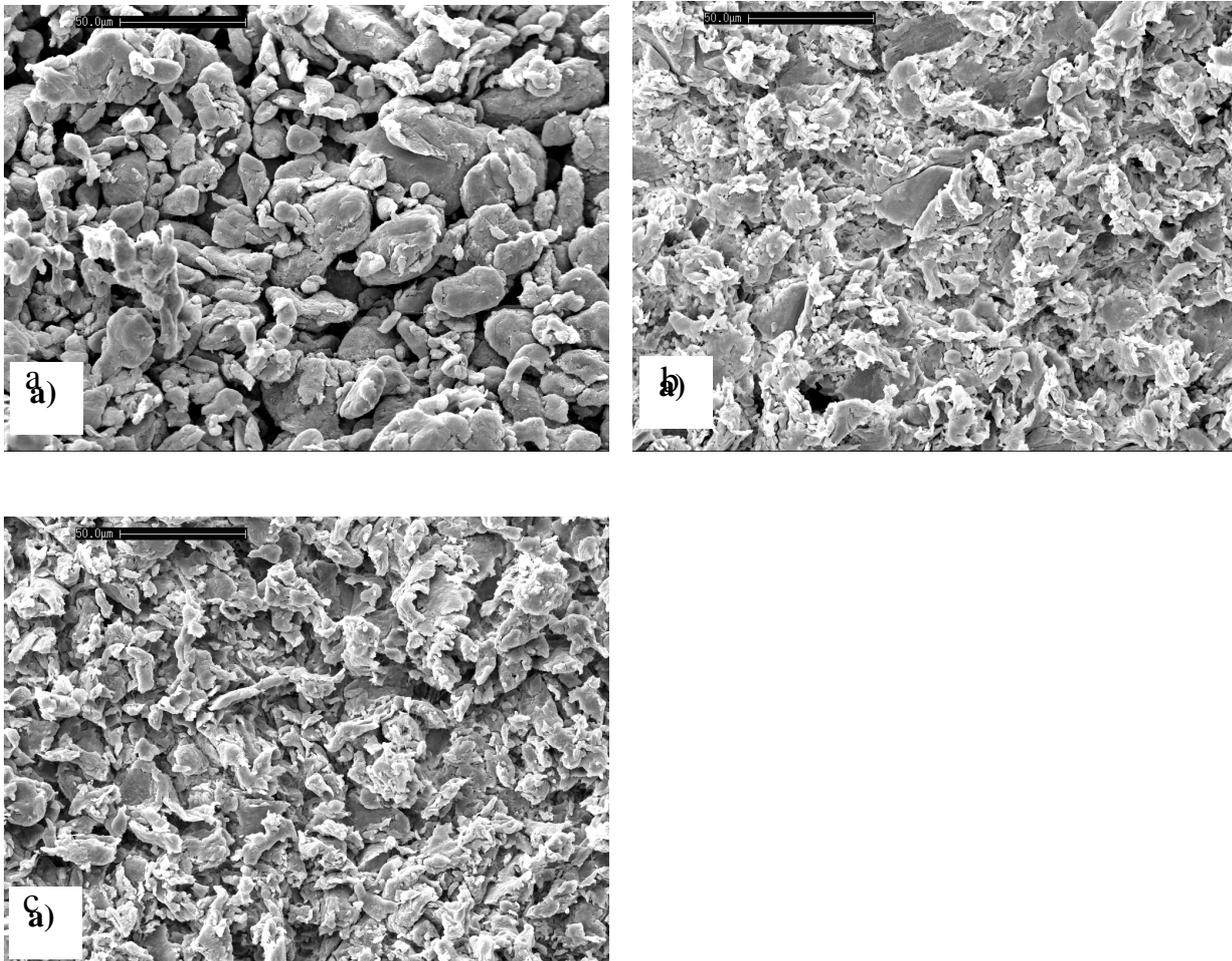
**Figura 28** - Ellissoide di polarizzazione della luce diffusa misurato per il diffusore al 2% per angolo d’incidenza  $\delta = 0^\circ$  e angolo d’osservazione  $\theta = 50^\circ$  ( $\lambda = 543 \text{ nm}$ ).

### 3. Caratterizzazione al SEM di diffusori di luce

#### 3.1 Caratterizzazione morfologica

##### 3.1.1 Standard di riflettanza Labsphere

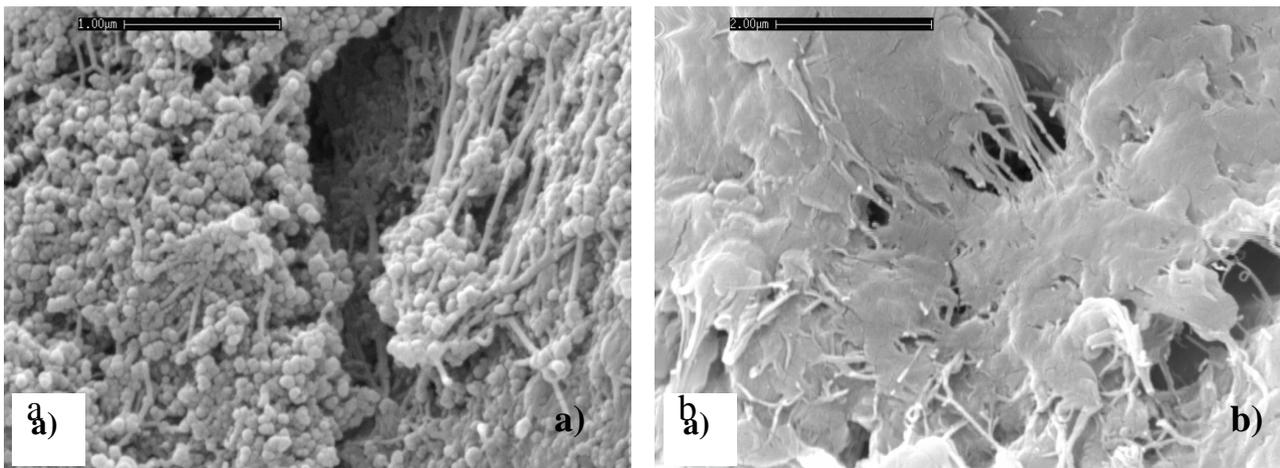
La caratterizzazione della morfologia superficiale e della struttura interna degli standard di riflettanza diffusa Labsphere è stata effettuata mediante microscopia elettronica a scansione (SEM), mentre l'analisi composizionale, per l'identificazione dei costituenti elementari del materiale utilizzato, è stata effettuata mediante microanalisi a raggi-x (EDS). Le misure sono state eseguite sui campioni SRS-02-020, SRS-40-020 e SRS-99-020 (2%, 40% e 99% di riflettività nominale, rispettivamente).



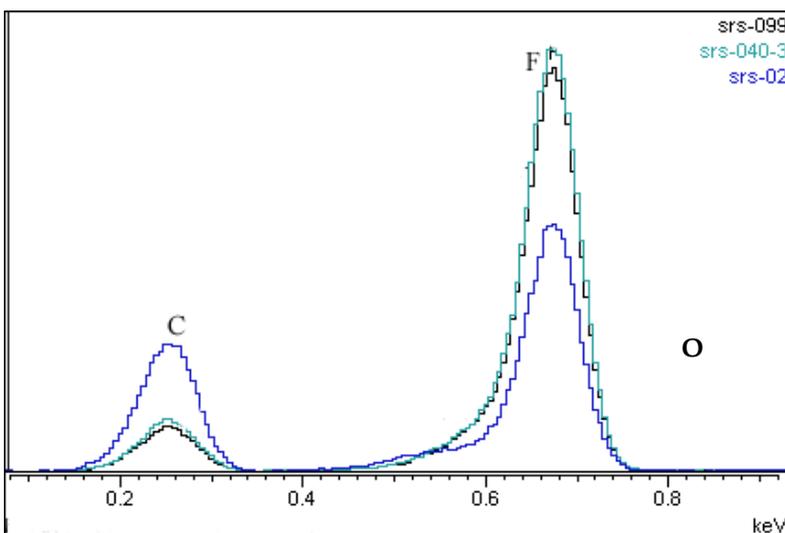
**Figura 29** – Immagini SEM della morfologia superficiale dei campioni SRS-02 (a), SRS-40 (b) e SRS-99 (c).

La morfologia superficiale dei tre campioni è mostrata a confronto nelle immagini di Fig. 29. La superficie si presenta in tutti i casi estremamente rugosa. Nel campione a più bassa riflettività essa ha l'aspetto di un conglomerato di grani di forma tondeggiate e di dimensioni disomogenee (da qualche micron ad alcune decine di micron), mentre nei

campioni a più alta riflettività essa è caratterizzata da asperità di tipo frattale, sempre più accentuate all'aumentare della riflettività del campione. Tutti i campioni hanno una elevata porosità interna. Osservazioni a più elevato ingrandimento hanno evidenziato, sia nei campioni al 40% che in quelli al 99% di riflettività, una struttura amorfa compatta interconnessa da materiale di tipo fibroso. Invece, nel campione a bassa riflettività sono presenti particelle sferiche, di dimensioni comprese tra i 500 Å e gli 800 Å, mescolate alla struttura amorfa fibrosa, verosimilmente dovute alla carica di nerofumo utilizzata come pigmento nero per abbattere la riflettività del materiale.



**Figura 30** – Immagini SEM ad elevato ingrandimento della struttura dei campioni : a) SRS-02 e b) SRS-99.



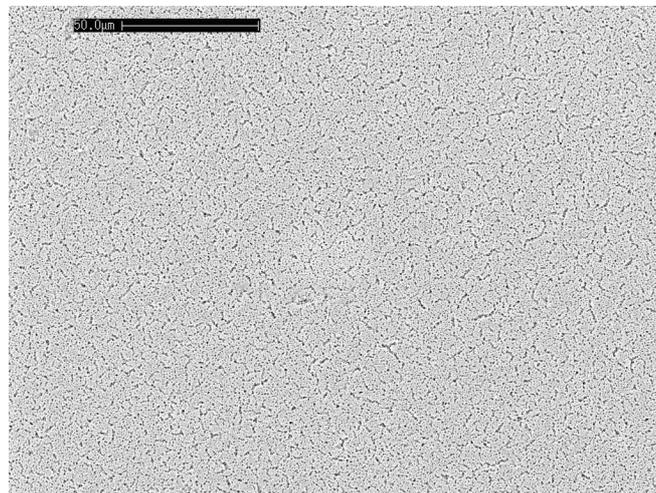
**Figura 31** – Spettri EDS a confronto per i tre campioni Labsphere.

Le misure composizionali eseguite sui tre campioni sono mostrate negli spettri riportati in Fig. 31. L'analisi qualitativa degli spettri mostra nei campioni SRS-99 e SRS-40 solo la

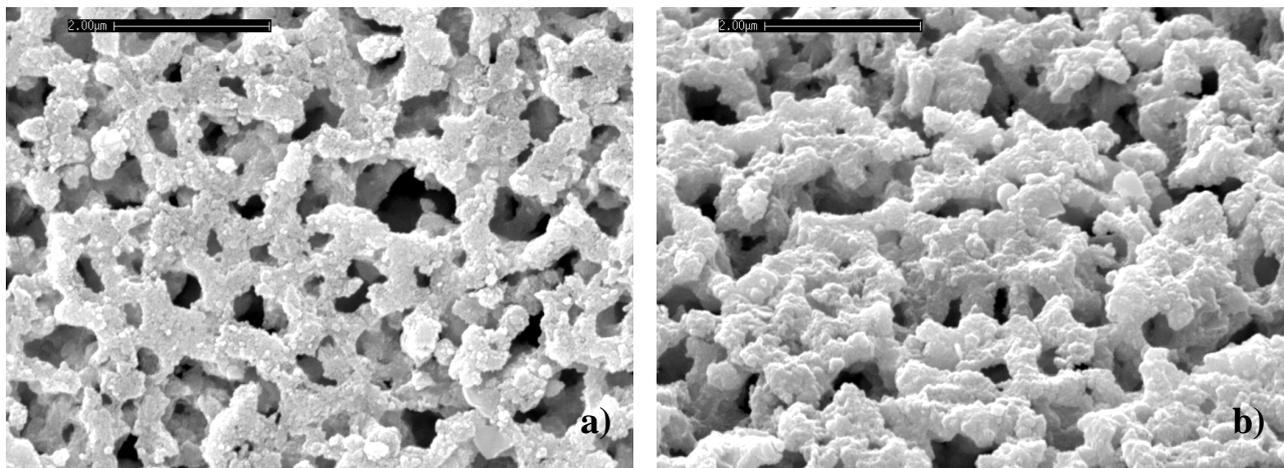
presenza di fluoro e carbonio mentre nel campione SRS-02 sono presenti anche tracce di ossigeno. Nel campione al 40% di riflettività è presente solo una piccolissima quantità di carbonio in più rispetto al 99%, invece, nel campione a bassa riflettività c'è un notevole aumento della quantità di carbonio dovuto al nerofumo usato come pigmento nero. Si può ritenere che gli standard Labsphere sono costituiti da una resina polimerica a base di fluoropolimeri.

### 3.1.2 Campioni di Silicio poroso

Nella figura 32 è mostrato l'aspetto della superficie di un campione di silicio poroso ottenuto per attacco elettrochimico su silicio monocristallino di tipo n. La superficie si presenta a bassissima rugosità, solcata da fratture e presenta un reticolo di macropori di dimensioni comprese tra 0.15 e 1.12  $\mu\text{m}$ . Il materiale poroso, caratterizzato da un poro centrale da cui partono le ramificazioni, si estende per una profondità di circa 50  $\mu\text{m}$ .



**Figura 32** – Immagine SEM della superficie del silicio poroso.



**Figura 33** – Morfologia superficiale del silicio poroso a differenti angoli di osservazione: a) campione visto dall'alto, b) campione tiltato a 45°.

### 3.2 Relazione proprietà ottiche - struttura

Nel campione di silicio poroso ad angoli di incidenza inferiori a  $40^\circ$  l'intensità diffusa ha un comportamento lambertiano con un ottimo intrappolamento della luce, ad angoli più elevati compare la componente speculare. Questo campione presenta bassa rugosità ma è costituito da un reticolo di pori (vedi figura 33a) le cui dimensioni medie (circa  $0.8 \mu\text{m}$ ) sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce visibile, l'efficacia dell'intrappolamento è massima a bassi angoli di incidenza, quando il raggio incidente è parallelo alla direzione di propagazione del poro, essendo in questo caso favorite le riflessioni multiple. Ad alti angoli di incidenza l'area porosa intercettata dalla luce è inferiore (vedi figura 33b), questo riduce l'efficacia dell'intrappolamento e c'è la comparsa di una componente speculare. L'intrappolamento della luce è quindi dipendente dall'orientamento del poro verso la luce incidente.

Gli standard di riflettanza diffusa Labsphere presentano una rugosità superficiale che è molto maggiore della lunghezza d'onda della luce, per cui l'intrappolamento è indipendente da  $\lambda$ . Nel campione SRS-99 l'intrappolamento è sempre efficace a qualsiasi angolo di incidenza, in quanto le asperità superficiali e la rete porosa che interessano la struttura della superficie e della adiacente zona sub-superficiale consentono di produrre riflessioni multiple della luce in questa zona del campione, condizione questa necessaria affinché si comporti in maniera lambertiana.

Nel campione SRS-40 le asperità superficiali hanno subito un leggero effetto di "smoothing" forse a causa di una meno spinta lavorazione meccanica della superficie o dell'aggiunta di piccole quantità di nerofumo usate per ridurre la riflettanza diffusa che determina anche l'assorbimento di parte della radiazione. Per angoli di incidenza fino a  $30^\circ$  si realizza un'efficiente multiriflessione ed intrappolamento della luce ed il materiale conserva un comportamento lambertiano, per angoli di incidenza di  $40^\circ$  compare una lievissima componente speculare forse a causa del leggero arrotondamento delle asperità superficiali.

Nel campione SRS-02 i domini superficiali hanno subito un elevato arrotondamento per cui solo alcuni particolari angoli di incidenza consentono di ottenere una multiriflessione efficiente della luce, in tutti gli altri casi è sempre presente una notevole componente speculare. Non sembra avere alcuna efficacia sull'intrappolamento della luce la microrugosità introdotta dai grani di nerofumo le cui dimensioni medie sono circa  $700 \text{ \AA}$ .

### 4. Conclusioni

La caratterizzazione ottica di una serie di campioni standard di riflettanza, del tipo Spectralon della Labsphere, ha mostrato come alcuni di essi, in particolare quelli di riflettanza nominale  $\geq 40^\circ$ , abbiano buone caratteristiche di lambertianità e quindi siano idonei ad essere impiegati come diffusori di fasci solari concentrati per la loro caratterizzazione in termini di distribuzione spaziale dell'irradianza, mediante il metodo della ripresa dell'immagine prodotta sul diffusore attraverso una videocamera digitale.

Anche campioni di silicio poroso sono risultati idonei a tale scopo, ma con questi campioni è necessario posizionare la videocamera ad angoli d'osservazione sufficientemente alti da non captare nessuna componente speculare del fascio riflesso.

Il migliore diffusore di radiazione luminosa tra quelli esaminati, dal punto di vista delle proprietà di lambertianità, è risultato il campione Labsphere SRS-99, con riflettanza nominale del 99%, riflettanza effettiva di circa 99% tra 250 e 1600 nm e > 92% nell'intervallo tra 1600 e 2500 nm. Grazie alla sua elevata riflettività, il campione SRS-99 presenta minori problemi di surriscaldamento quando sottoposto a radiazione solare concentrata.

I diffusori che hanno mostrato le migliori qualità come diffusori lambertiani, verranno impiegati per la caratterizzazione "indoor" di fasci luminosi concentrati, secondo il metodo illustrato nell'Introduzione della ripresa con videocamera digitale. L'importanza del comportamento lambertiano da parte del diffusore sta nel fatto che, in tal caso, le immagini riprese con la videocamera possono essere tradotte in termini di irradianza incidente attraverso delle semplici elaborazioni del contrasto.

#### Riferimenti

- [1] A. Parretta et al., *"Metodi per la caratterizzazione di fasci luminosi concentrati"*, in preparazione.
- [2] G. Kortum, *"Reflectance Spectroscopy, Principles, Methods, Applications"*. Ed. By Springer Verlag, Berlin, 1967, p. 28.

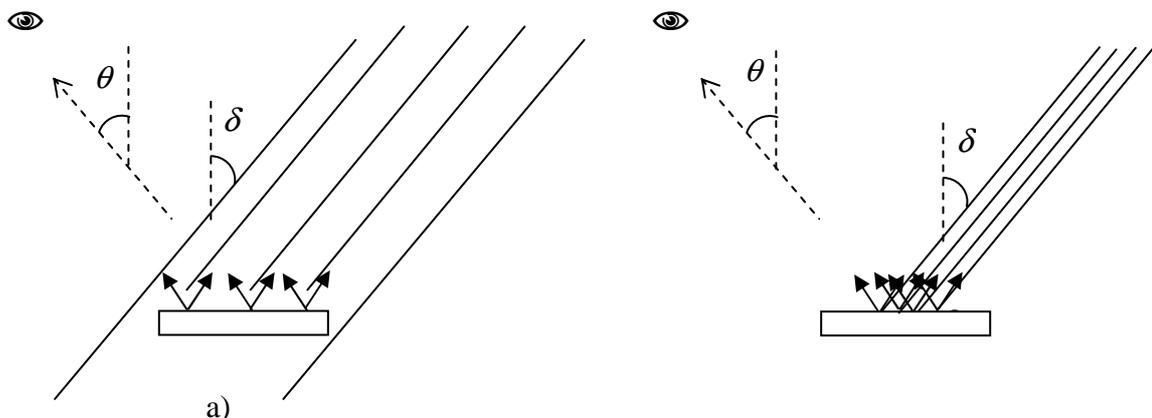
#### Ringraziamenti

Si ringrazia il Dott. E. Massera per la gentile fornitura dei campioni di Silicio poroso e la Dott.ssa E. Bobeico per le misure allo spettrofotometro.

## Appendice A

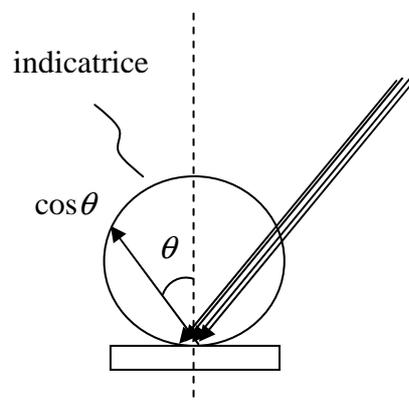
### Legge di Lambert

La legge di Lambert stabilisce quanto segue per un diffusore isotropo ideale (lambertiano) piano, di dimensioni finite, illuminato da un fascio di luce collimata e uniforme di estensione illimitata: "L'intensità luminosa diffusa dall'unità di superficie e su un angolo solido unitario è: a) proporzionale al coseno dell'angolo d'incidenza; b) proporzionale al coseno dell'angolo d'osservazione.



**Figura A1** - a) Campione illuminato da un fascio collimato e spazialmente esteso; b) campione illuminato da un fascio collimato e spazialmente limitato.

Per meglio illustrare la legge di Lambert, consideriamo due casi di diffusore ideale illuminato da un fascio collimato e uniforme incidente con angolo zenitale  $\delta$  (vedi Fig. A1). Nel caso a) il fascio illumina tutto il campione, per qualsiasi valore dell'angolo  $\delta$ . Nel caso b) il fascio illumina soltanto una porzione del campione, per un certo intervallo più o meno esteso di valori di  $\delta$ . Si trova allora che la riflettanza totale direzionale/emisferica,  $R(\delta, \lambda)$ , varia come  $\cos \delta$  in a), mentre rimane costante in b). In entrambi i casi, l'intensità diffusa varia con l'angolo d'osservazione zenitale  $\theta$  secondo la funzione  $\cos \theta$ , come mostrato dalla curva indicatrice (vedi Fig. A2).



**Figura A2** - Andamento dell'intensità della luce diffusa dal diffusore ideale (lambertiani) in funzione dell'angolo d'osservazione.

## Appendice B

### *Divergenza angolare di fasci concentrati*

Le misure d'intensità di luce diffusa discusse precedentemente servono a definire la grandezza  $R(\delta, \theta, \lambda)$  che compare nell' Eq. (1). A tal fine, l'angolo d'incidenza del fascio dovrà essere variato entro un certo intervallo di valori definito dalle particolari caratteristiche del concentratore solare. Nel seguito faremo riferimento a due applicazioni importanti di concentratori solari, entrambi in fase di sviluppo in ENEA, una è quella di tipo fotovoltaico (progetto PhoCUS) finalizzata alla produzione di energia elettrica, l'altra è quella di tipo termodinamico finalizzata alla produzione d'idrogeno.

#### *B1. Concentratore solare fotovoltaico per il Progetto PhoCUS.*

Le caratteristiche di massima del concentratore sono:

Rapporto di concentrazione  $C \sim 200x$ ;

Apertura frontale a sezione quadra di  $D \sim 140$  mm di lato;

Concentratore: lente prismatica o di Fresnel con lunghezza focale  $f \sim 140$  mm;

Cella solare quadra di  $\sim 11$  mm di lato, posizionata sullo "pseudofuoco" della lente prismatica (vedi Fig. B1) o a  $\sim 1$  cm dal fuoco della lente di Fresnel (vedi Fig. B2).

In queste condizioni, la divergenza massima della luce concentrata è  $\theta_{max} \sim 27^\circ$ .

Naturalmente è la particolare geometria del concentratore PhoCUS a richiedere tali divergenze angolari. Nel caso della lente di Fresnel (vedi Fig. B2), ad esempio, la cella solare non è posta sul fuoco della lente, dove si ha la massima concentrazione della luce, ma ad una distanza tale che tutta la cella risulti illuminata.

La massima concentrazione raggiungibile dal sistema illustrato in Fig. B2 è infatti data da:

$$C_{\frac{m}{a}}^x = \left( \frac{\sin \theta_{out}}{\sin \theta_{in}} \right)^2 \quad (B1)$$

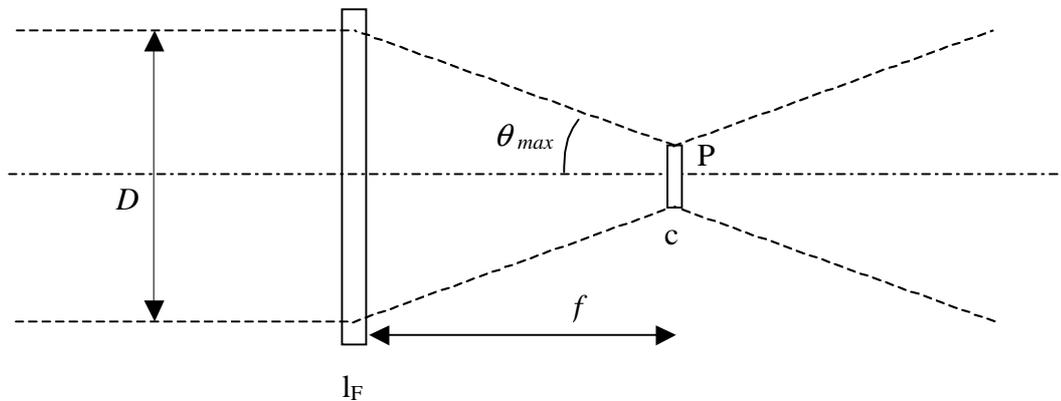
dove  $\theta_{out} = \theta_{max}$  è la divergenza del fascio all'uscita del concentratore e  $\theta_{in}$  è la divergenza del fascio all'ingresso del concentratore, corrispondente alla divergenza dei raggi solari ( $\sim 0.27^\circ$ ).

#### **Errore.**

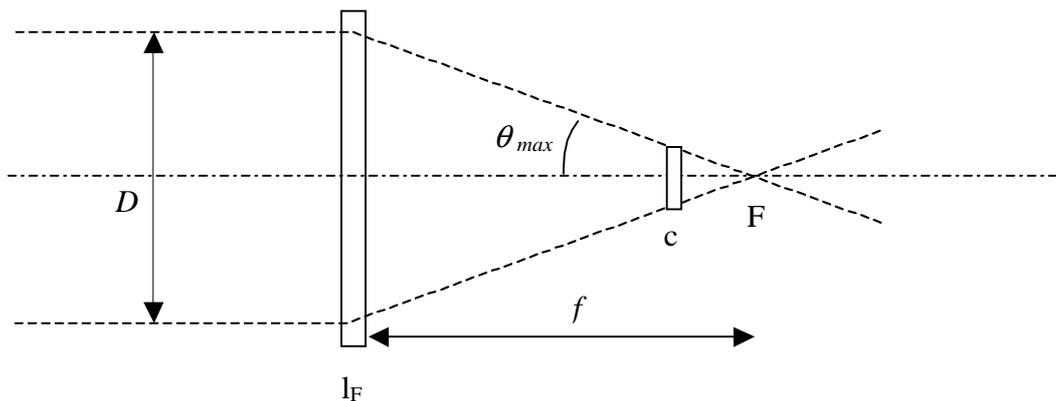
Si trova facilmente per  $C_{max}$ :

$$C_{\frac{m}{a}}^x = \left( \frac{\sin \theta_{out}}{\sin \theta_{in}} \right)^2 = \left( \frac{\sin(\tan^{-1}(D/(2f)))}{\sin(0.27^\circ)} \right)^2 \approx 9000x \quad (B1')$$

quindi una concentrazione molto superiore a quella richiesta ( $\sim 200x$ ).



**Figura B1** - Schema del concentratore fotovoltaico PhoCUS realizzato con lente prismatica. La cella solare (c) è posta sullo “pseudofuoco” P.



**Errore.**

**Figura B2** - Schema del concentratore fotovoltaico PhoCUS realizzato con lente di Fresnel. La cella solare (c) è posta a ~ 1 cm al di qua del fuoco F.

Dalla Eq. (B1), valida per un concentratore in aria si ricava quindi che la divergenza angolare del fascio in uscita dal concentratore definisce il massimo rapporto di concentrazione raggiungibile, essendo la divergenza dei raggi solari in ingresso una costante. Per un concentratore solare, questo rapporto massimo si ha, sul fuoco, per  $\theta_{out} = 90^\circ$  e vale circa 46.000x.

Concentratori del tipo di Fig. B2 sono quindi in grado di concentrare la luce su un campione da  $C=1x$  a  $C_{max}$  a seconda della distanza cui è posto il campione, naturalmente su aree diverse.

Se il concentratore di Fig. B2 fosse stato progettato per una  $C_{max} = 200x$ , sarebbe stata sufficiente una divergenza molto inferiore a  $27^\circ$ :  $\theta_{out} \sim 4^\circ$ , ma in tal caso, per illuminare un campione di area  $\sim 1 \text{ cm}^2$ , sarebbe stato necessario un concentratore lungo circa 1m.

B2. *Concentratore solare termico per il Progetto SOLTERM.*

In Fig. B3 è mostrato lo schema di massima di un impianto a concentrazione indoor di media potenza (~5 kW) da realizzare in Casaccia al fine di avviare le prime sperimentazioni su un reattore per la produzione di idrogeno per via termodinamica. La temperatura di lavoro del reattore dovrà essere di  $T \sim 2500$  K. La sorgente del concentratore è una lampada ad arco di ~125 kWe, che produce un fascio approssimativamente collimato di  $\sim 1300$  W/m<sup>2</sup> su un'area di  $\sim 4$  m<sup>2</sup>.

L'obiettivo è di raggiungere la temperatura di  $T \sim 2500$  K su un'area attiva del ricevitore di  $\sim 10$  cm<sup>2</sup>. Dal rapporto tra la sezione del fascio in ingresso al concentratore e quello in uscita sul ricevitore, si ricava un rapporto di concentrazione di  $\sim 4000x$ . Rapporti di concentrazione di questo ordine di grandezza sono idonei per il raggiungimento delle temperature di lavoro descritte. Infatti, dall'equazione di Stefan-Boltzmann, che dà la densità di potenza di emissione di un corpo generico all'equilibrio termico alla temperatura  $T_{eq}$ :

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_{eq}^4 \quad (B2)$$

con:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$\varepsilon$  = emissività

e ipotizzando come ricevitore un corpo nero, si trova per la temperatura d'equilibrio  $T_{eq}$  del ricevitore:

$$T_e = \left[ \frac{G_s \cdot C_{geo} \cdot \eta_{opt}}{\sigma} \right]^{1/4} = \left[ \frac{G_s \cdot (A_{in} / A_{out}) \cdot \eta_{opt}}{\sigma} \right]^{1/4} \quad (B3)$$

con:

$G_s$  = irradianza della sorgente = 1300 W/m<sup>2</sup>;

$A_{in}$  = area d'ingresso al concentratore = 4 m<sup>2</sup>;

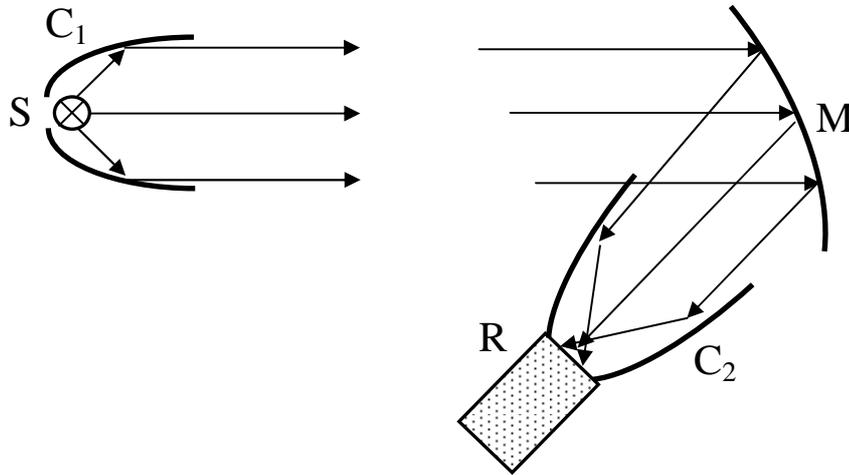
$A_{out}$  = area attiva del ricevitore = 10 cm<sup>2</sup>;

$C_{geo}$  = rapporto di concentrazione geometrico = 4000x;

$\eta_{opt}$  = efficienza ottica del concentratore.

Si trova  $T_{eq} \sim 3100$  K per un valore ideale di  $\eta_{opt} = 1.0$ , e  $T_{eq} \sim 2600$  K per un valore conservativo di  $\eta_{opt} = 0.5$ .

La divergenza angolare massima del fascio sul ricevitore va calcolata dalla Eq. (B1), ponendo il valore realistico di  $\theta_{in} \sim 0.5^\circ$  e  $C_{geo} = 4000x$ . Si ottiene  $\theta_{out} \sim 35^\circ$ . <decidiamo allora, in via conservativa, di studiare la diffusione alla luce dei diffusori reali fino ad una divergenza angolare massima di  $\theta_{out} \sim 40^\circ$ .



**Figura B3** - Schema di massima del concentratore “point focus” indoor del progetto SOLTERM.  
 S: sorgente ad arco; C<sub>1</sub>: collimatore; M: specchio parabolico; C<sub>2</sub>: concentratore “nonimaging”;  
 R: ricevitore.