

Concentrazione fv

SOLFOCUS



RADIOMETRI per sistemi Cpv

La misura della radiazione solare concentrata richiede l'uso di strumenti innovativi non ancora presenti sul mercato. In questo articolo presentiamo una rassegna delle soluzioni sviluppate da Enea e dall'Università di Ferrara per la caratterizzazione ottica di fasci solari in concentratori *point-focus*. L'articolo prosegue sul prossimo numero di *PV Technology*, dove i nuovi dispositivi verranno analizzati in dettaglio.

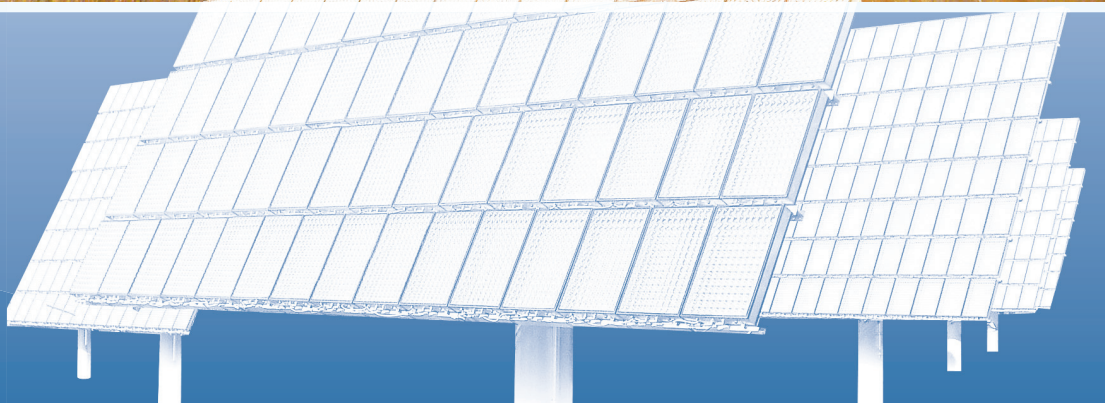
■ **ANTONIO PARRETTA** – Enea, Università di Ferrara, **NICOLÒ BARONI** – Università di Ferrara

Molto forte è l'interesse della comunità scientifica verso i sistemi fotovoltaici a concentrazione, in considerazione dell'impatto non sostenibile che avrebbe il costo del dispositivo fotovoltaico negli impianti solari piani per una produzione di energia solare su larga scala, tenendo conto dei livelli di efficienza di conversione ancora troppo bassi delle celle solari a singola giunzione. I sistemi solari a concentrazione richiedono però tecnologie sofisticate sia per la loro realizzazione sia per la loro caratterizzazione. La misura della radiazione solare concentrata, ovvero di radiazione elettromagnetica nella regione Vis-NIR (visibile-vicino infrarosso) caratterizzata da alte densità di flusso, richiede ad esempio l'uso di strumen-

ti innovativi non ancora presenti sul mercato.

L'Enea già da alcuni anni ha affrontato questo problema, tenendo conto del suo rilevante impegno nel settore della conversione dell'energia solare con impianti a concentrazione di tipo fotovoltaico o termodinamico [1-3]. In questo articolo presentiamo una rassegna della strumentazione sviluppata, dapprima presso Enea e in seguito presso l'Università di Ferrara, per la caratterizzazione ottica di fasci solari in concentratori fotovoltaici 3D (*point-focus*). Seguiranno altri articoli dedicati alla caratterizzazione di fasci solari in concentratori solari lineari, o di tipo *trough*.

**Sistema Cpv
di ArimaEco
installato presso
il centro Isfoc
di Puertollano,
in Spagna.**



Nel settore fotovoltaico la radiazione solare è concentrata a livelli intorno alle decine o centinaia di soli ($1 \text{ sole} = 1 \text{ kW/m}^2 = 100 \text{ mW/cm}^2$) e laddove la luce è più concentrata l'area del ricevitore è generalmente molto piccola, dell'ordine di pochi cm^2 . Inoltre, esiste una grande variabilità nella geometria dei concentratori e questo rende difficile realizzare uno strumento universale per la radiometria del fascio, tenendo conto che vi sono diverse esigenze quali la misura del flusso totale o la sua distribuzione spaziale e angolare sul ricevitore.

Le caratteristiche principali che ci aspettiamo da un radiometro "universale" sono:

- 1) misura della radiazione indipendente dalla geometria del fascio (*F-number*), e quindi dalla geometria del concentratore;
- 2) intervallo di misura dell'intensità facilmente regolabile e il cui limite superiore si aggiri intorno alle migliaia di soli;
- 3) possibilmente realizzabile in una versione portatile, sì da poterlo impiegare all'esterno su vari impianti;
- 4) misura stazionaria della radiazione, senza che ciò comporti un surriscaldamento del fotorivelatore, evitando la complessa elettronica associata a misure di tipo impulsivo;
- 5) facile regolazione del fattore di attenuazione dell'intensità della radiazione;
- 6) adatto alle lunghezze d'onda caratteristiche della luce solare ($\lambda \approx 350\text{-}2.500 \text{ nm}$).

In questo lavoro presentiamo due modelli di radiometri con aree

di misura al massimo di pochi cm^2 , adatti quindi a misure di flusso totale incidente su piccole aree, oppure a misure di distribuzione di flusso su sistemi a più larga area movimentando i radiometri davanti al fascio.

La calibrazione dei radiometri presenta qualche difficoltà per l'assenza di una procedura definita tramite un protocollo CEI (Comitato elettrotecnico italiano), ma siamo stati comunque in grado di effettuarla grazie alle apparecchiature disponibili presso l'Enea di Portici.

I radiometri che presentiamo sono realizzati a partire da sfere integratrici, quindi è bene far precedere alla descrizione dei dispositivi una parte introduttiva teorica nella quale verrà mostrato come si derivano le principali grandezze ottiche che caratterizzano le sfere integratrici e come queste si applicano al progetto di un radiometro.

MODELLI TEORICI DI SFERE INTEGRATRICI

Alla base del funzionamento del radiometro Dcr (*Double-cavity radiometer*), così come del Disr (*Double integrating sphere radiometer*), che vedremo nei prossimi numeri di questa rivista, è la sfera integratrice, una cavità sferica la cui parete interna è ricoperta da un materiale molto riflettente e diffusivo e provvista di finestre d'ingresso e d'uscita per il flusso, nonché di altre finestre per l'accoppiamento della sfera con i sensori per la caratterizzazione del flusso al suo interno. →

Concentrazione fv

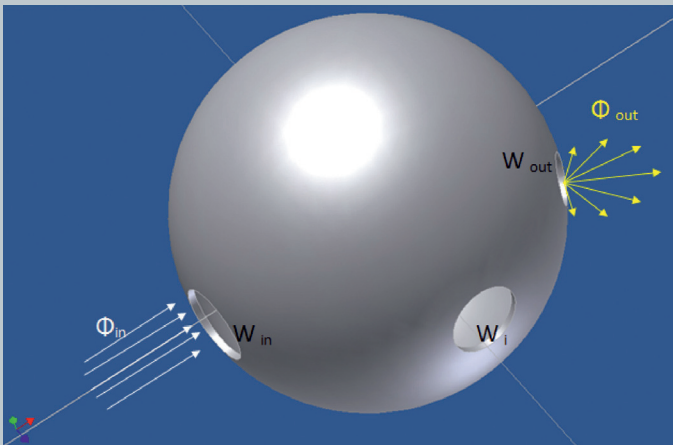


Figura 1. Rappresentazione schematica del principio di funzionamento di una sfera integratrice.

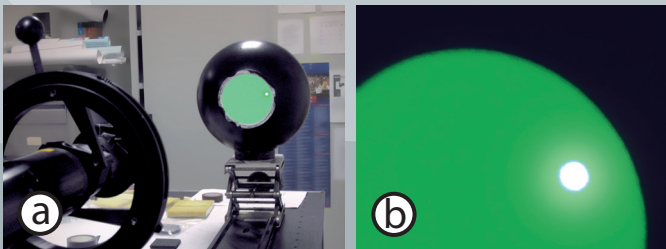


Figura 2. Sfera integratrice illuminata da un fascio laser verde (a). Le proprietà integranti della sfera fanno sì che la parete interna risulti uniformemente illuminata, ad esclusione naturalmente della zona di primo impatto, come si vede nell'immagine (b).

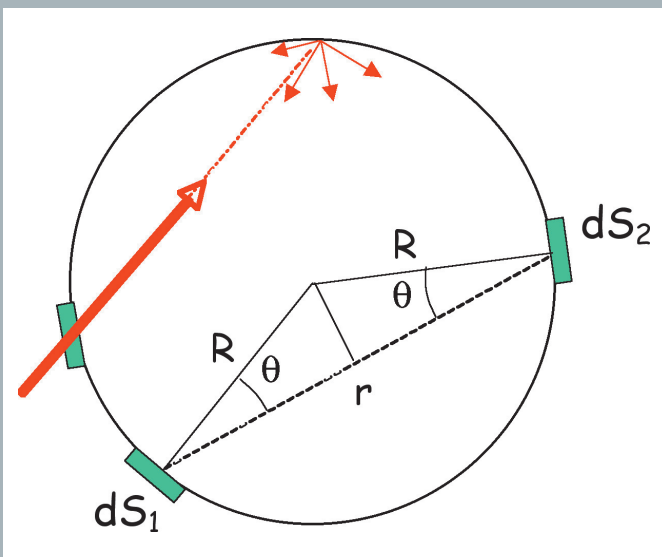


Figura 3. Rappresentazione schematica dello scambio di flusso tra due elementi di superficie all'interno della sfera.



Nella sua forma più semplice un radiometro può essere realizzato con una singola sfera integratrice. Cominciamo allora con l'analizzare la più semplice delle sfere integratrici, comprendente soltanto un certo numero di porte aperte, tra le quali una per l'ingresso del flusso e una per la sua uscita, dove verrà misurato (vedi **Figura 1**). La sfera è caratterizzata dai seguenti parametri ottico-geometrici: R = raggio della sfera; ρ_w = riflettività della parete interna; $f = (A_f / A_{sph})$ = frazione di area occupata dalle N finestre, immaginate tutte aperte (riflettività = 1). È definito poi con Φ_{in} il flusso in ingresso e con Φ_{out} il flusso in uscita su una delle porte.

La caratteristica principale di una sfera integratrice è che, all'equilibrio, l'irraggiamento (in W/m^2) sulla parete interna è costante, se si eccettua la porzione di superficie più luminosa dove incide il fascio in ingresso, chiamata "zona di primo impatto", caratterizzata da una riflettività ρ_i che può o meno essere uguale a quella di parete ρ_w . Se allora si osserva da una finestra l'interno della sfera, si vedrà che essa è illuminata in maniera omogenea.

Questo comportamento, che è alla base delle sue proprietà integranti, è una diretta conseguenza del fatto che il flusso luminoso scambiato tra due elementi generici dS_1 e dS_2 della sua superficie è lo stesso qualunque sia la loro posizione all'interno della sfera (vedi **Figura 3**).

Abbiamo infatti che, allorquando si è stabilito l'equilibrio della radiazione all'interno della sfera, il flusso luminoso $d^2\Phi_{12}$ emesso da dS_1 e raccolto da dS_2 è pari al flusso $d^2\Phi_{21}$ emesso da dS_2 e raccolto da dS_1 :

$$d^2\Phi_{12} = d^2\Phi_{21} = \frac{L_w \cdot dS_1 \cdot dS_2 \cdot \cos^2\theta}{r^2} = \frac{L_w \cdot dS_1 \cdot dS_2 \cdot \cos^2\theta}{(2R \cdot \cos\theta)^2} = \frac{L_w \cdot dS_1 \cdot dS_2}{4R^2} = \text{cost} \quad [1]$$

avendo posto L_w come la radianza della parete interna della sfera. Integrando ora $d^2\Phi_{12}$ sull'area dS_2 otterremo $d\Phi_1$, il flusso totale incidente sull'area dS_1 :

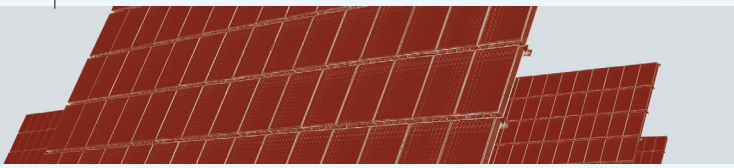
$$d\Phi_1 = \int d^2\Phi_{12} = \frac{L_w \cdot dS_1}{4R^2} \cdot \int dS_2 = \frac{L_w \cdot dS_1}{4R^2} \cdot 4\pi R^2 (1 - f) \quad [2]$$

essendo f la porzione di sfera occupata dalle N finestre. L'irradianza su parete E_w diventa:

$$E_w = \frac{d\Phi_1}{dS_1} = \pi \cdot L_w (1 - f) \quad [3]$$

Essendo che l'irradianza su parete E_w equivale all'emettanza di una sua finestra generica (basta immaginare di praticare un forellino sulla parete: il flusso incidente sulla parete prima del foro equivale al flusso uscente dal foro), che chiameremo quin-





di emettanza della sfera, M_{sph} , ed essendo inoltre che la sfera è una sorgente lambertiana (emettanza = $\pi \times$ radianza), avremo:

$$E_w = M_{sph} = \pi \cdot L_{sph} \quad [4]$$

con L_{sph} radianza di una generica finestra della sfera, che chiameremo quindi radianza della sfera. Conoscendo E_w è allora possibile ricavare la radianza L_{sph} della sfera. La grandezza E_w si può calcolare facilmente attraverso un processo iterativo che, a partire dal flusso in ingresso sulla sfera non ancora illuminata, tiene conto dei singoli contributi d'irradianza prodotti sulla parete in corrispondenza a ogni riflessione che avviene all'interno della sfera.

Se analizziamo il processo transitorio che porta la sfera nello stato stazionario quando è illuminata dal flusso in ingresso Φ_{in} , troviamo facilmente che la parete della sfera è irradiata, alla prima riflessione, con l'intensità E_1 :

$$E_1 = \frac{\Phi_{in} \cdot \rho_I}{A_{sph}} \quad [5]$$

alla seconda riflessione con l'intensità E_2 :

$$E_2 = \frac{E_1 \cdot \rho_w \cdot A_{sph} \cdot (1-f)}{A_{sph}} = E_1 \cdot (\rho_w \cdot (1-f)) \quad [6]$$

alla terza riflessione con l'intensità E_3 :

$$E_3 = \frac{E_2 \cdot \rho_w \cdot A_{sph} \cdot (1-f)}{A_{sph}} = E_1 \cdot (\rho_w \cdot (1-f))^2 \quad [7]$$

e così via fino all'infinito, per cui il valore d'irradianza allo stato stazionario E_w sarà dato dalla sommatoria dei singoli contributi E_k :

$$E_w = \sum_{k=1}^{\infty} E_k = E_1 \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (\rho_w \cdot (1-f))^k \quad [8]$$

Essendo il termine $(\rho_w \cdot (1-f)) < 1$, si trova facilmente che la sommatoria (8) converge al valore limite:

$$E_w = E_1 \cdot \frac{1}{1 - (\rho_w \cdot (1-f))} = \frac{\rho_I \cdot \Phi_{in}}{A_{sph}} \cdot \frac{1}{1 - (\rho_w \cdot (1-f))} \quad [9]$$

Dalle (4) e (9) ricaviamo allora per la radianza della sfera:

$$L_{sph} = \frac{\rho_I \cdot \Phi_{in}}{\pi \cdot A_{sph}} \cdot \frac{1}{1 - (\rho_w \cdot (1-f))} \quad [10]$$

La radianza della sfera è una costante in funzione dell'angolo di emissione della luce in quanto la sfera stessa è una sorgente lambertiana (vedi Figura 4).

La (10) è valida nel caso semplice in cui ci siano solo finestre w_i aperte ($\rho_i = 0$). Nel caso più generale avremo finestre accoppiate otticamente con i sensori degli strumenti che servono a caratterizzare la radiazione al suo interno o con altre →



Figura 4. Controllo della lambertianità della sfera integratrice: in (a), la sfera è posizionata sul banco ottico; in (b), la camera CCD è orientata a diversi angoli rispetto alla finestra di uscita della luce. Un comportamento lambertiano della sfera come sorgente di luce si ottiene se l'immagine della finestra ha la stessa intensità in funzione dell'angolo, seppur diversa nella forma.

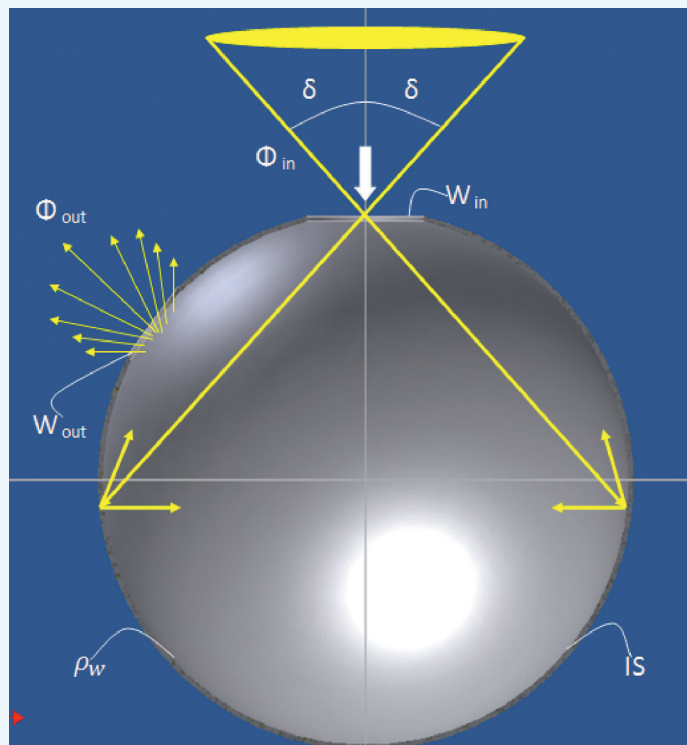
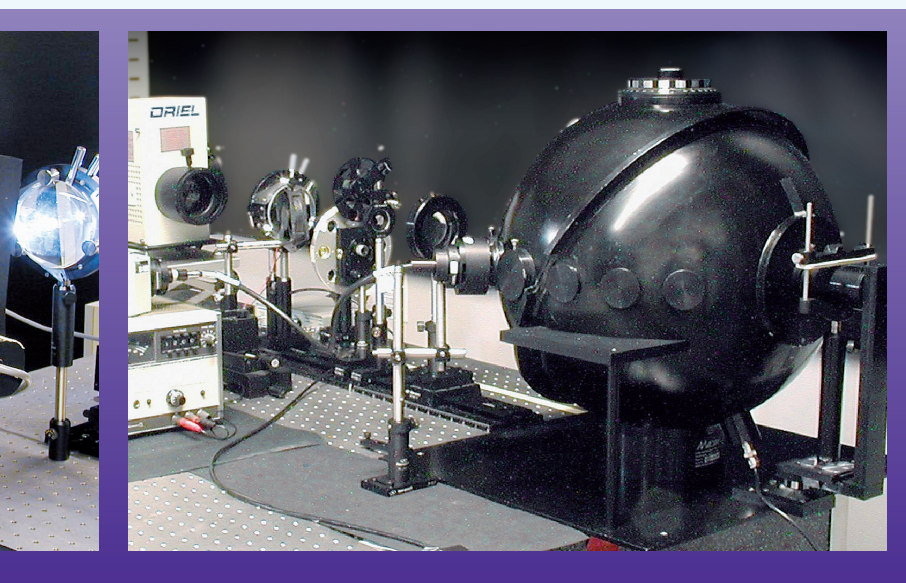


Figura 5. Misura del flusso totale del fascio in ingresso.



Concentrazione fv

sfere integratrici, e quindi in generale indicheremo con ρ_i la riflettività media della finestra i -ma w_i , e con f_i la corrispondente frazione di area di parete occupata. La (10) diventa allora:

$$L_{sph} = \frac{\rho_i \cdot \Phi_{in}}{\pi \cdot A_{sph} \cdot (1 - (\rho_w f_w + \sum_{i=1}^N \rho_i f_i))} \quad [11]$$

Avendo indicato con f_w la frazione di area della parete e con N il numero complessivo delle finestre. Dalla (11) si ricava immediatamente per il flusso in uscita Φ_{out} :

$$\begin{aligned} \Phi_{out} &= M_{sph} \cdot A_{out} = \pi \cdot L_{sph} \cdot f_{out} \cdot A_{sph} = \\ &= f_{out} \cdot \rho_i \cdot \Phi_{in} \cdot \frac{1}{1 - (\rho_w f_w + \sum_{i=1}^N \rho_i f_i)} \end{aligned} \quad [12]$$

dove f_{out} indica la frazione di area della finestra d'uscita. La (12) presuppone che il volume all'interno della sfera non sia occupato da accessori o da elementi ottici che protrudino al suo interno.

RADIOMETRO A SINGOLA SFERA

Valutiamo ora il funzionamento di un radiometro a singola sfera integratrice. Definiamo con f_A^Φ e con f_A^E rispettivamente il fattore di attenuazione del flusso e il fattore di attenuazione dell'irradianza:

$$f_A^\Phi = \Phi_{in} / \Phi_{out} \quad [13]$$

$$f_A^E = E_{in} / E_{out} = f_A^\Phi \cdot (f_{out} / f_{in}) \quad [14]$$

Dalla (12) otteniamo:

$$f_A^\Phi = \frac{1 - (\rho_w f_w + \sum_{i=1}^N \rho_i f_i)}{f_{out} \cdot \rho_w} \quad [15]$$

$$f_A^E = \frac{1 - (\rho_w f_w + \sum_{i=1}^N \rho_i f_i)}{f_{in} \cdot \rho_w} \quad [16]$$

avendo posto $\rho_i = \rho_w$. Dalla (15) e dalla (16) si vede chiaramente che, per attenuare la radiazione è necessario intervenire sull'area delle porte, d'ingresso o di uscita. Nelle misure di flusso totale incidente Φ_{in} , la finestra d'ingresso della sfera non può essere variata in quanto dovrà essere adattata alle dimensioni della regione focale del fascio, e quindi il fattore di attenuazione f_A^Φ può essere controllato soltanto variando f_{out} cioè l'area della finestra d'uscita (vedi **Figura 5** a pag. 37).

Il fattore di attenuazione f_A^Φ in questo caso è approssimativamente uguale al rapporto tra l'area totale delle finestre e l'area del-

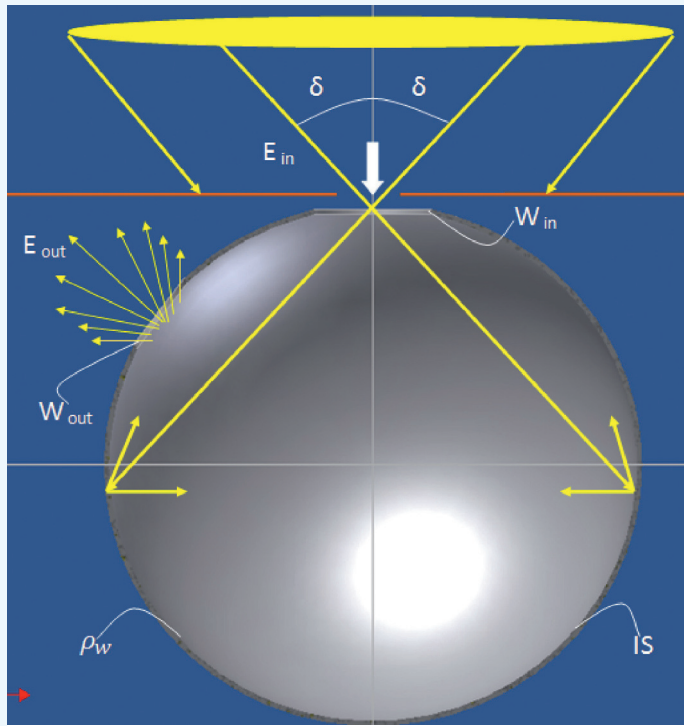


Figura 6. Misura dell'irradianza E_{in} del fascio in ingresso in corrispondenza dell'apertura w_{in} della sfera.

la finestra d'uscita (avendo posto $\rho_w \approx 1$, $\rho_i \approx 0$):

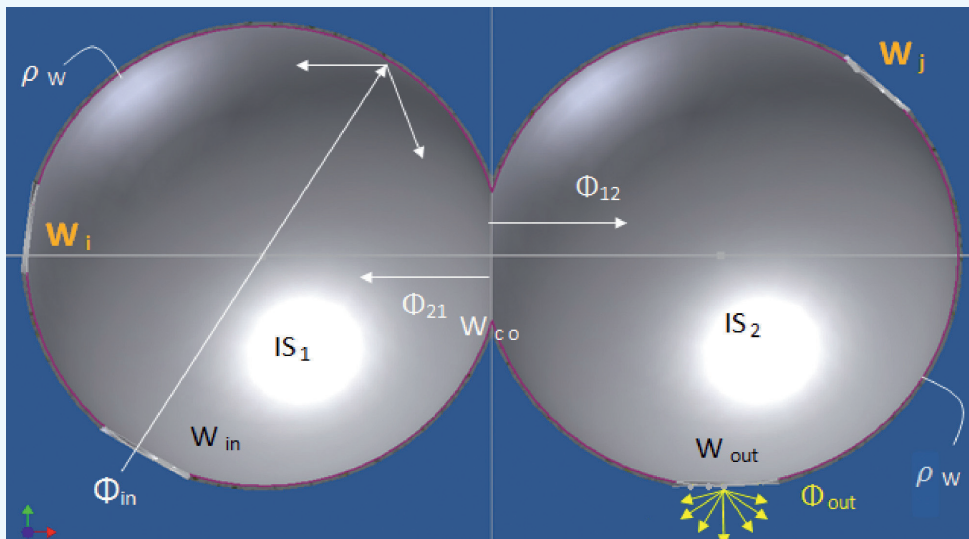
$$f_A^\Phi \approx \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{f_{out}} \quad [17]$$

che nel caso in cui siano presenti solo la finestra d'ingresso e quella d'uscita diventa:

$$f_A^\Phi \approx \frac{f_{in} + f_{out}}{f_{out}} \quad [18]$$

In questo caso il flusso in ingresso è attenuato riducendo sensibilmente l'area della finestra d'uscita rispetto a quella della finestra d'ingresso. Nelle misure d'irradianza E_{in} , dalla (16) si può notare che il fattore di attenuazione può essere controllato variando l'area dell'apertura d'ingresso. In realtà quest'area va calibrata in funzione della risoluzione con la quale si vuole misurare E_{in} (vedi **Figura 6**) e quindi anche il controllo del fattore di attenuazione f_A^E va fatto variando l'area della finestra d'uscita.

Il fattore di attenuazione f_A^E è approssimativamente uguale al rapporto tra l'area totale delle finestre e l'area della finestra d'in-



Il radiometro opera all'opposto del concentratore, ovvero riduce l'intensità dell'irraggiamento

Figura 7. Schema del principio di funzionamento del radiometro a doppia cavità.

gresso (avendo posto $\rho_w \approx 1$, $\rho_i \approx 0$):

$$f_A^E \approx \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{f_{in}} \quad [19]$$

che nel caso in cui siano presenti solo la finestra d'ingresso e quella d'uscita diventa:

$$f_A^E \approx \frac{f_{in} + f_{out}}{f_{in}} \quad [20]$$

In tal caso l'attenuazione dell'irradianza è ottenuta aumentando sensibilmente l'area della finestra d'uscita rispetto alla finestra d'ingresso.

IL RADIOMETRO A DOPPIA SFERA

Valutiamo ora il funzionamento di un radiometro a doppia sfera integratrice. Per modellare analiticamente il radiometro è sufficiente l'applicazione della (12) alle singole sfere di cui è composto, (is_1) e (is_2), immaginate per semplicità di uguali dimensioni e con la stessa riflettività di parete, dotate rispettivamente di N_1 e N_2 finestre e comunicanti attraverso una finestra di area $A_{co} = f_{co} \cdot A_{sph}$ (vedi **Figura 7**).

Applicando l'equazione (12) alla prima sfera abbiamo:

$$\Phi_{12} = f_{co} \cdot \rho_w \cdot (\Phi_{in} + \Phi_{21}) \cdot \frac{1}{1 - (\rho_w f_{w1} + \sum_{i=1}^{N_1} \rho_i f_i)} \quad [21]$$

Applicando l'equazione (12) alla seconda sfera e considerando il flusso in uscita dalla finestra (w_{out}), abbiamo:

$$\Phi_{out} = f_{out} \cdot \rho_w \cdot \Phi_{12} \cdot \frac{1}{1 - (\rho_w f_{w2} + \sum_{j=1}^{N_2} \rho_j f_j)} \quad [22]$$

Abbiamo inoltre, applicando l'equazione (12) alla seconda sfera e considerando il flusso in uscita dalla finestra (w_{co}):

$$\Phi_{21} = f_{co} \cdot \rho_w \cdot \Phi_{12} \cdot \frac{1}{1 - (\rho_w f_{w2} + \sum_{j=1}^{N_2} \rho_j f_j)} \quad [23]$$

Combinando le (21)-(23) si ottiene infine:

$$\Phi_{out} = \frac{f_{out} \cdot f_{co} \cdot \rho_w^2 \cdot \Phi_{in}}{[1 - (\rho_w f_{w1} + \sum_{i=1}^{N_1} \rho_i f_i)] \cdot [1 - (\rho_w f_{w2} + \sum_{j=1}^{N_2} \rho_j f_j)] - f_{co}^2 \cdot \rho_w^2} \quad [24]$$

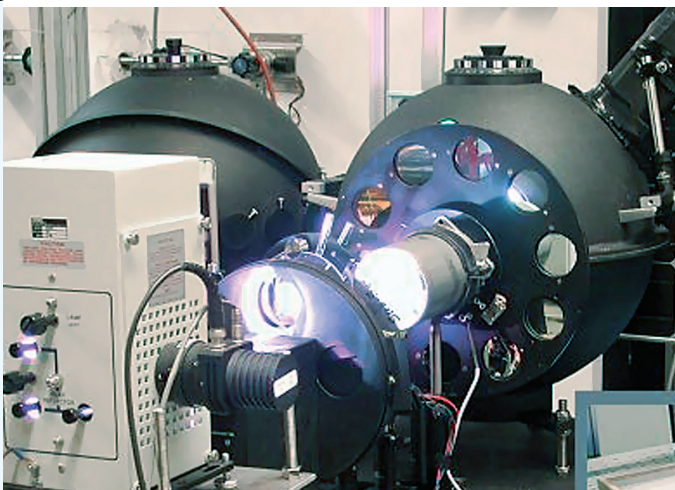
da cui si ricava per i fattori di attenuazione del flusso e dell'irradianza:

$$f_A^\Phi = \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}} = \frac{[1 - (\rho_w f_{w1} + \sum_{i=1}^{N_1} \rho_i f_i)] \cdot [1 - (\rho_w f_{w2} + \sum_{j=1}^{N_2} \rho_j f_j)] - f_{co}^2 \cdot \rho_w^2}{f_{out} \cdot f_{co} \cdot \rho_w^2} \quad [25]$$

$$f_A^E = \frac{E_{in}}{E_{out}} = \frac{[1 - (\rho_w f_{w1} + \sum_{i=1}^{N_1} \rho_i f_i)] \cdot [1 - (\rho_w f_{w2} + \sum_{j=1}^{N_2} \rho_j f_j)] - f_{co}^2 \cdot \rho_w^2}{f_{in} \cdot f_{co} \cdot \rho_w^2} \quad [26]$$

Il radiometro opera all'opposto di un concentratore solare, ovvero riduce l'intensità dell'irraggiamento presente all'ingresso e quindi il fattore f_A^E rappresenta una sorta di fattore di de-concentrazione della radiazione.

Le (25) e (26), che quantificano l'attenuazione operata dalle due sfere, sono le equazioni fondamentali per progettare il radiometro. Per un radiometro universale è richiesto che esso operi con flussi in ingresso molto variabili. Sarebbe però conveniente avere in uscita un flusso pressoché costante. Questo si può ottenere operando sul parametro f_{co} , ovvero sulla finestra di comunicazione tra le due sfere e variando l'area di questa finestra in modo da avere $\Phi_{out} \approx cost$. Questo ha il vantaggio di far operare il foto-



Doppia sfera integratrice utilizzata per la caratterizzazione di materiali ottici.

rivelatore, da accoppiare con la finestra d'uscita del flusso, a livelli bassi e pressoché costanti, facilitando così anche il controllo della sua temperatura. Dalla (26) vediamo ad esempio che possiamo modulare facilmente il fattore f_A^E variando f_{co} e mantenendo costanti gli altri parametri. Dalla (26) ci aspettiamo un andamento approssimativamente di tipo iperbolico per f_A^E in funzione di f_{co} e che quindi si abbia:

$$\log f_A^E \approx C - \log f_{co} \quad [27]$$

Come vedremo successivamente, applicando la (26) al caso reale dei radiometri Dcr e Disr, si troverà effettivamente una relazione molto simile alla (27). La (27) ci dice che l'intervallo di variabilità della f_{co} è lo stesso, in senso inverso, che si ha per il fattore di attenuazione. È possibile immaginare allora che per variazioni realistiche dell'area della finestra w_{co} da un massimo di ≈ 1 cm² a un minimo di ≈ 1 mm², il corrispondente valore di f_A^E possa essere incrementato di un centinaio di volte. Questo significa che è possibile misurare agevolmente radiazioni concentrate dell'ordine delle centinaia di soli (≈ 10 W/cm²) avendo in uscita irradiazioni dell'ordine di unità di soli (≈ 100 mW/cm²), e quindi operare con fotorivelatori comuni. Dalla (26) risulta inoltre che il fattore di attenuazione f_A^E è in prima approssimazione inversamente proporzionale al quadrato della riflettività di parete ρ_w . Questa però non può essere utilizzata come parametro per il controllo dell'attenuazione della radiazione, in quanto essa deve essere sufficientemente elevata per assicurare una buona integrazione della radiazione all'interno della sfera. Valori tipici di ρ_w vanno da $\approx 0,95$, riscontrabili in *coating* commerciali economici, a $\approx 0,99$ riscontrabili in *coating* di elevata qualità. Ragionamenti simili possono essere fatti per il fattore di attenuazione f_A^Φ .

Abbiamo visto quindi come lavorando con due sfere integratrici sia più agevole il controllo del fattore di attenuazione f_A^E o f_A^Φ , che avviene attraverso la regolazione dell'area della porta intermedia tra le due sfere. In tal modo non vengono alterate le aree d'ingresso e d'uscita, le quali potranno così essere regolate solo in funzione delle esigenze di adattamento della finestra d'ingresso al fascio d'ingresso e della finestra di uscita al fotorivelatore, o cella solare. Il meccanismo di integrazione della luce all'interno delle sfere non può essere studiato analiticamente e sarà mostrato solo quando saranno discussi singolarmente i radiometri Dcr e Disr. ■

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Parretta et al., *Double-Cavity Radiometer for High Flux Density Solar Radiation Measurements*, Applied Optics, 46 (2007) 2166-2179.
- [2] M. Armani, A. Parretta, E. Milan, *Dispositivo di attenuazione di un fascio di radiazione elettromagnetica*, Brevetto It., Application N. RM2007A000647, 14 Dicembre 2007.
- [3] A. Parretta et al., *Radiometro per ricevitori cilindrici*, Brevetto It., Application N. BO2006A000880, 27 Dicembre 2006.