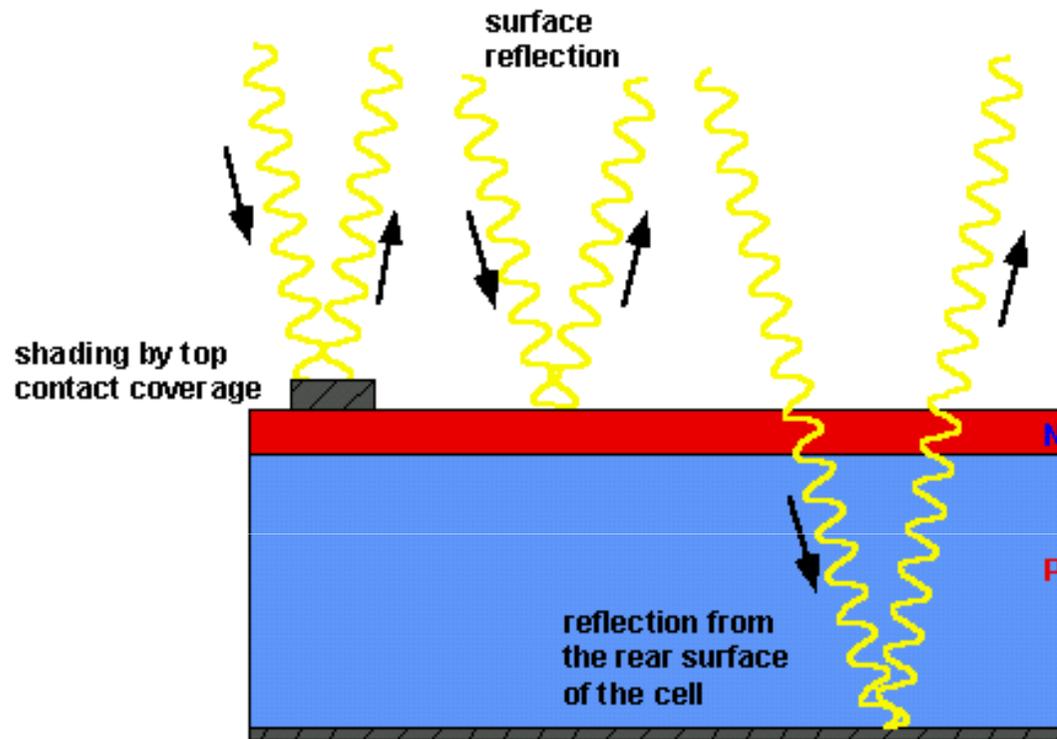


A. Parretta

CORSO DI OTTICA APPLICATA

TESTURIZZAZIONE DI CELLE SOLARI

# Perdite ottiche in una cella solare



Le perdite ottiche corrispondono alla luce riflessa dalla superficie frontale, o da quella posteriore che non viene assorbita dalla cella.

Le perdite ottiche influiscono sulla potenza erogata abbassando la corrente di corto circuito  $J_{sc}$ .

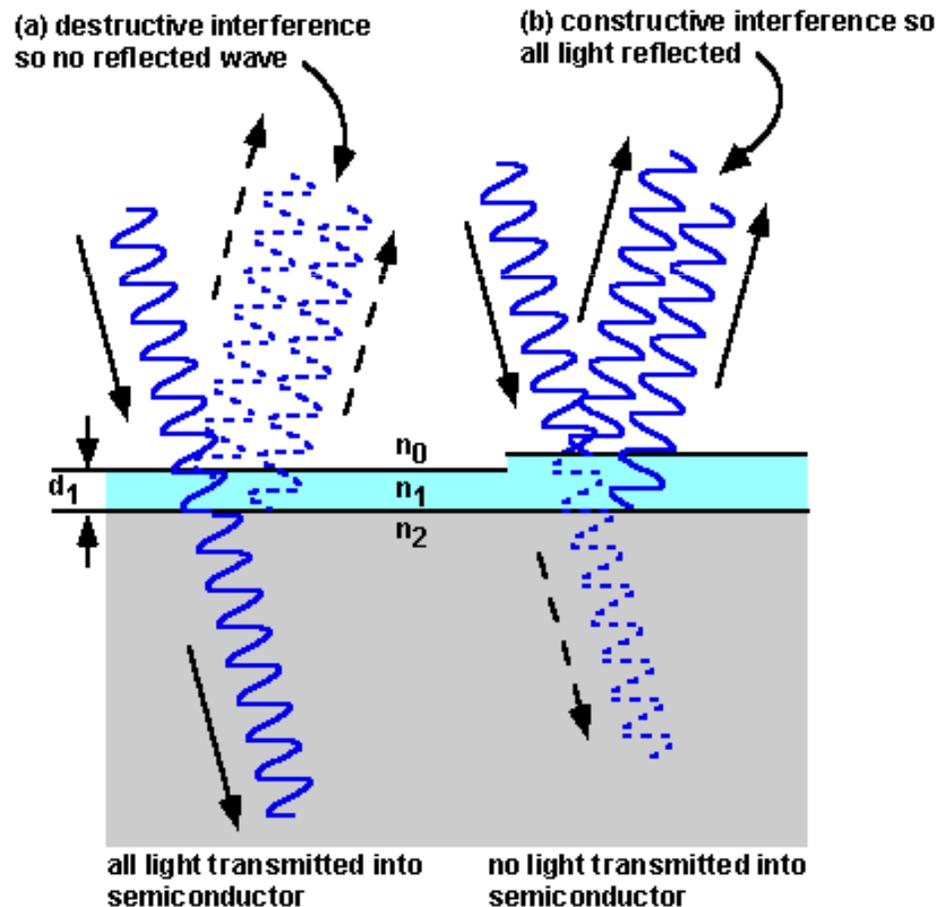
# Come ridurre le perdite ottiche

- Utilizzo di strati antiriflesso (ARC: Anti-Reflection Coatings)
- Testurizzazione delle superfici e confinamento ottico (light trapping)
- Minimizzare l'area coperta dal contatto frontale (shadowing).

# Strati antiriflesso

L'uso di strati antiriflesso si basa sull'effetto di interferenza

La luce riflessa dalla seconda interfaccia (ARC/SI,  $n_1/n_2$ ) torna alla prima interfaccia (Aria/ARC,  $n_0/n_1$ ) sfasata di  $180^\circ$  rispetto alla luce riflessa dalla prima interfaccia, annullandola.



# Strati antiriflesso

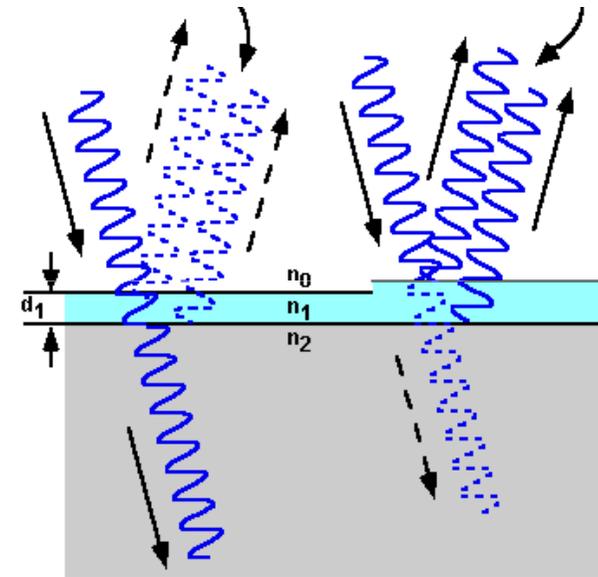
$$R = \left( \frac{n_2 - n_0}{n_2 + n_0} \right)^2 \quad \text{Senza antiriflesso}$$

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\delta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\delta}$$

$$r_1 = \left( \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right) \quad r_2 = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \quad \delta = \left( \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda_0} \right)$$

$$R = R_{\min} \implies n_1 d_1 = \left( \frac{\lambda_0}{4} \right) \quad \boxed{d_1 = \left( \frac{\lambda_0}{4n_1} \right)}$$

$$R_{\min} = \left( \frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \implies R_{\min} = 0 \quad \boxed{n_1 = \sqrt{n_0 n_2}}$$

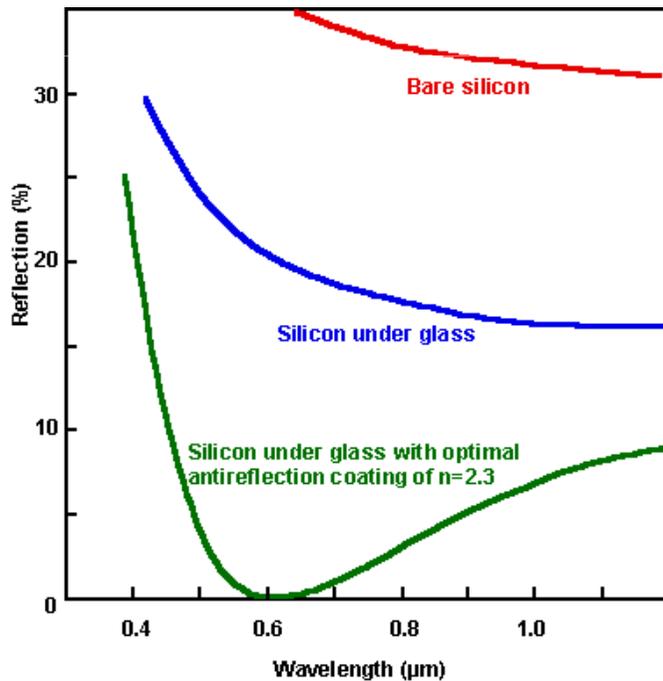


# Strati antiriflesso

- Per un singolo strato AR:

$$\lambda_0 = 600 \text{ nm}; n_1 = 2.0; d_1 = 750 \text{ \AA}$$

- Perdite per riflessione ridotte al 10% in media su superficie mirror-like

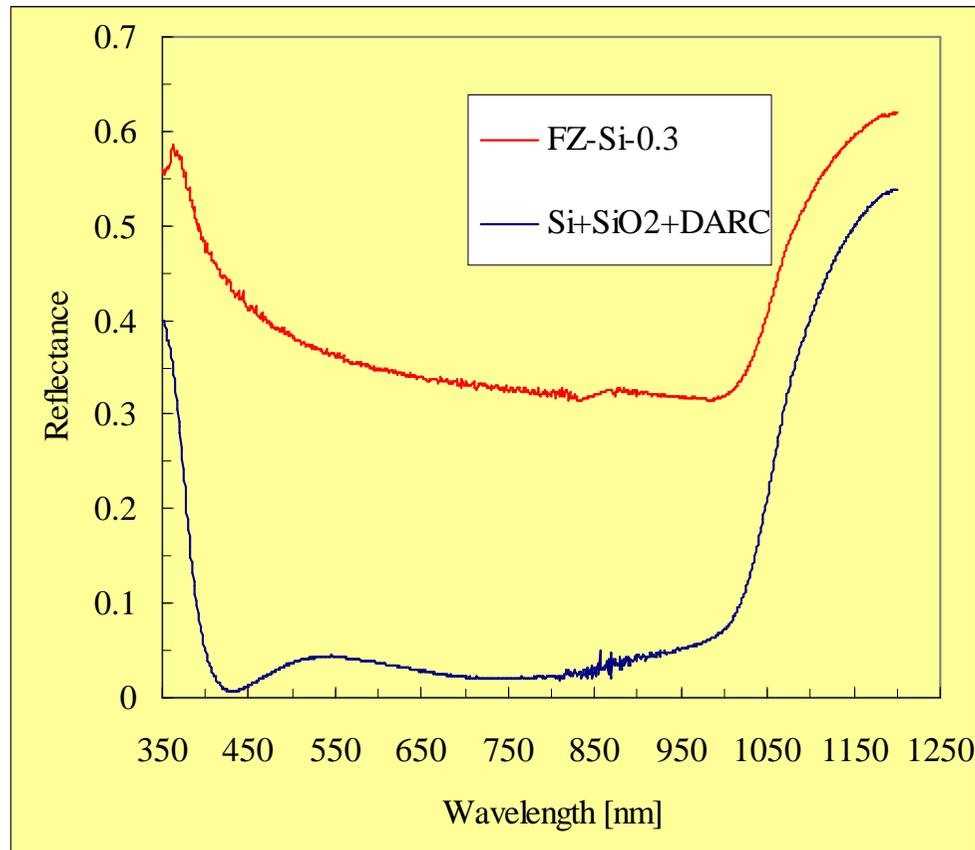


Materiale	n
Si	3,45
SiO	1,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2,0
TiO <sub>2</sub>	2,2
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,2

# Strati antiriflesso

L'uso di più strati ARC riduce ulteriormente la riflettanza su uno spettro più ampio. Tuttavia ciò è più costoso e non è utilizzato per le comuni celle commerciali.

Il DARC (Double ARC) trova invece applicazione nelle celle ad alta efficienza, ad esempio per applicazioni spaziali o in concentrazione.



Double Anti-Reflection Coatings

# Testurizzazione

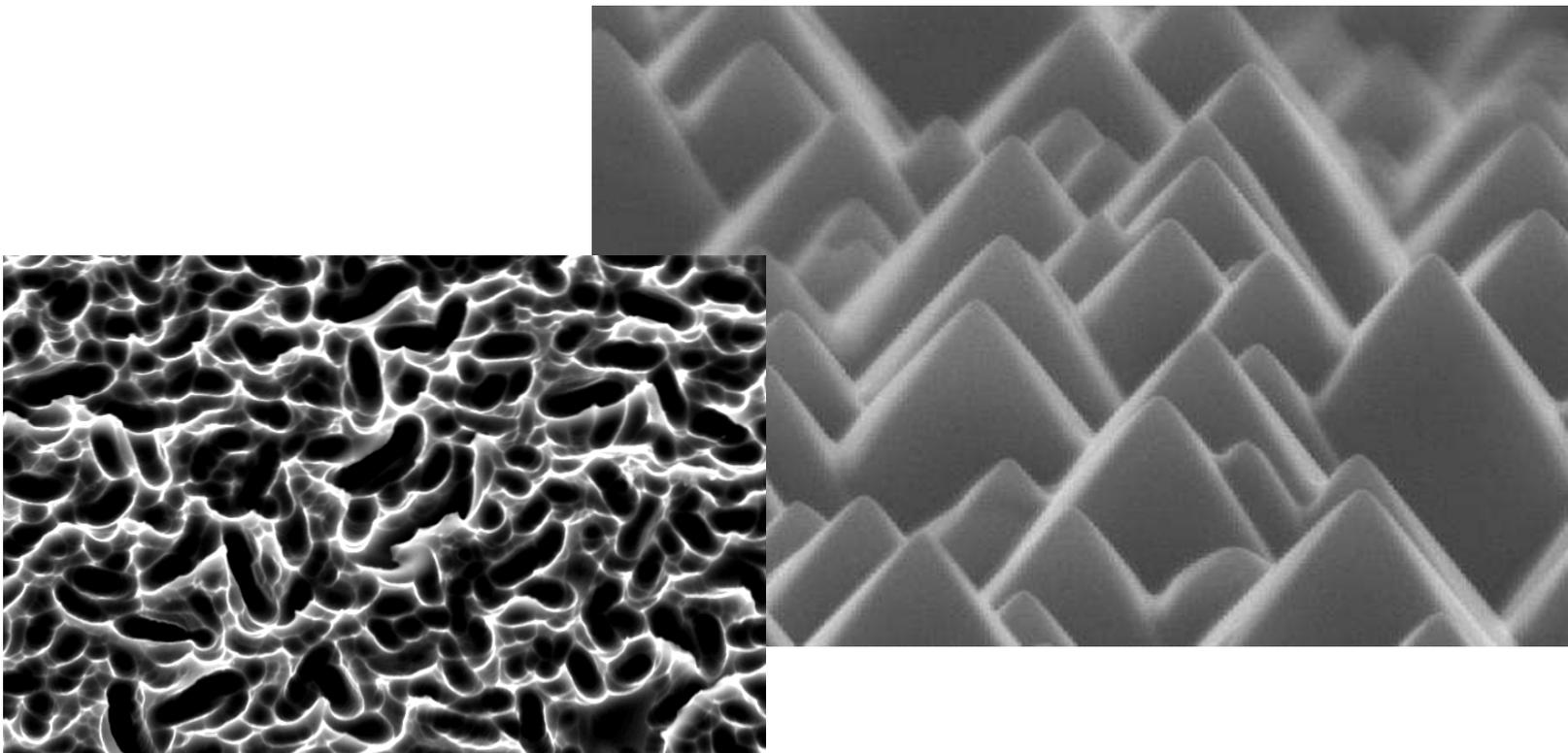
- \* Riduce la riflettanza superficiale rispetto alla luce incidente

- \* Migliora il “light trapping” (‡)

(‡) Le due condizioni sono equivalenti. Non lo sono sempre quando si considera, anziché la riflettanza superficiale, quella totale della cella.

# Testurizzazione

La testurizzazione consiste nella formazione di microstrutture sulla superficie del silicio, tali da ridurre la riflessione incrementando le probabilità della luce riflessa di essere rinviaata alla superficie del wafer invece che perdersi in aria.



# Light Trapping

Di tutta la luce incidente, solo la parte rifratta può essere assorbita dal materiale per la generazione di una coppia elettrone-lacuna.

Tuttavia se la luce non è assorbita entro una lunghezza di diffusione dalla giunzione, è possibile che le cariche lì generate si ricombinino.

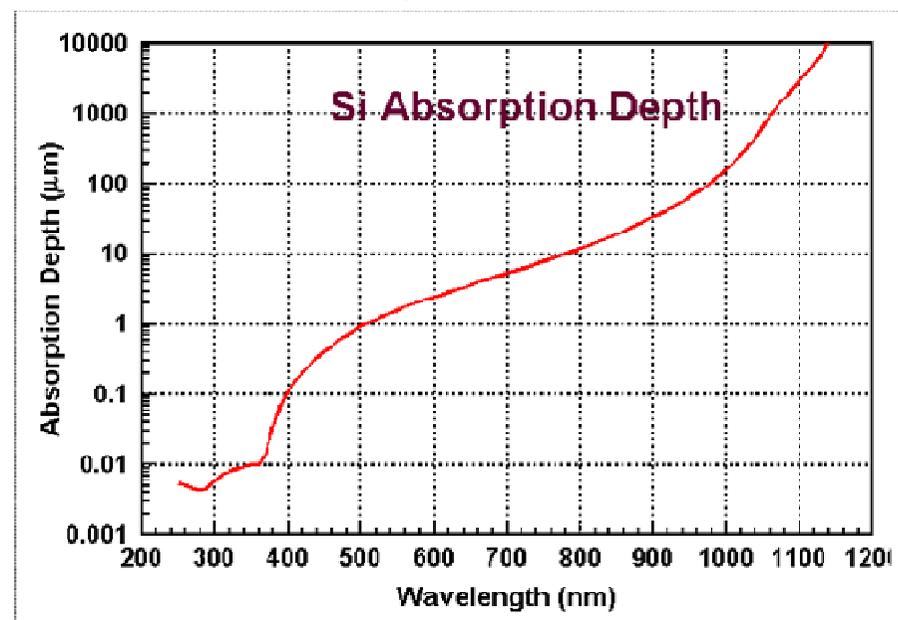
**Quindi è auspicabile l'uso di substrati più sottili, i quali, oltre che diminuire la probabilità di ricombinazione, diminuirebbero il consumo di silicio.**

**Inoltre, una cella sottile che abbia lo stesso assorbimento di una spessa mostra una Voc più alta.**

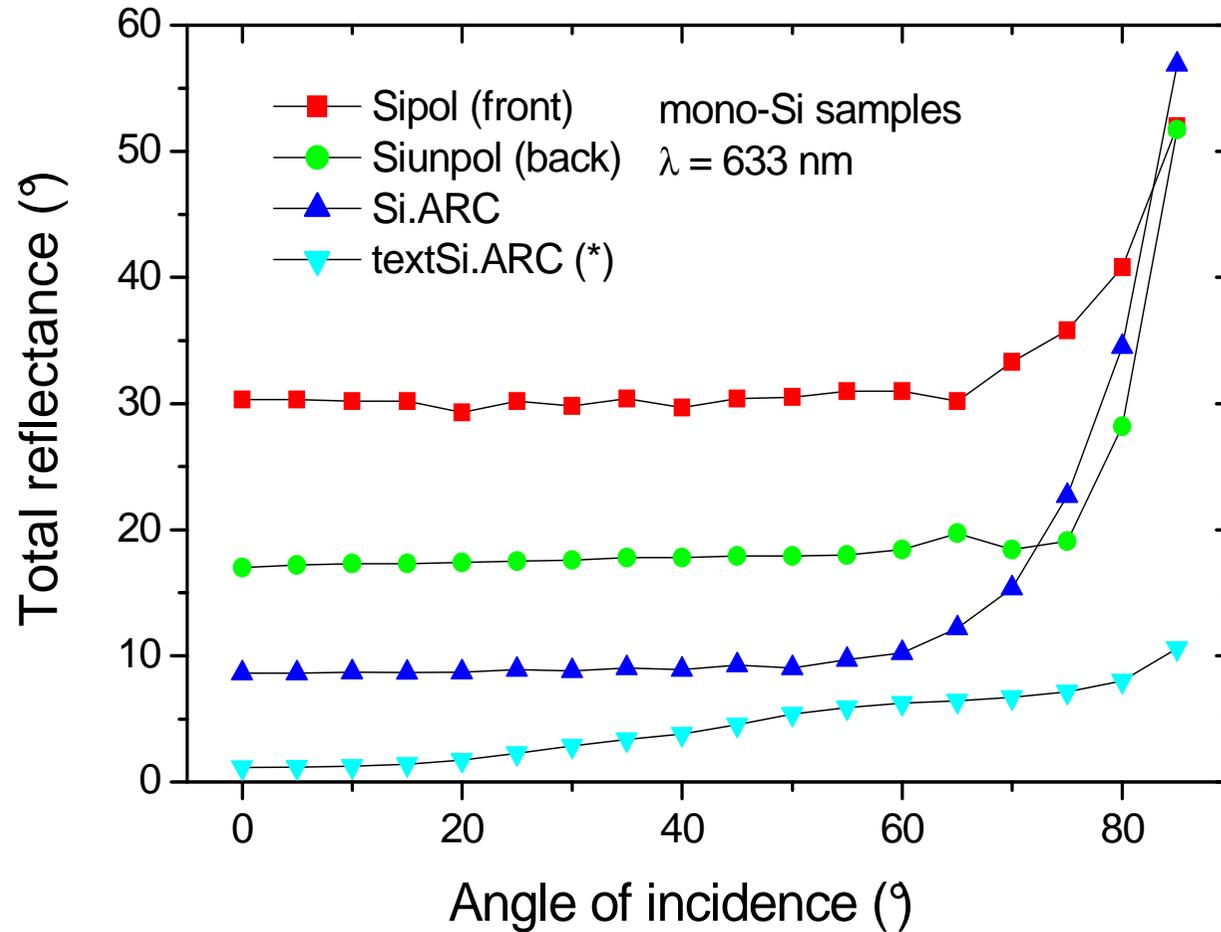
Tuttavia l'assorbimento della luce per le varie lunghezze d'onda è funzione della profondità entro la superficie del silicio (profondità di assorbimento), per cui per **lunghezze d'onda oltre i 1000 nm occorrerebbe un substrato di spessore maggiore di 250  $\mu\text{m}$ .**

Quindi per poter usare substrati sottili è necessario che la luce possa compiere un cammino ottico equivalente entro uno spessore minore.

**Con questo spirito si progetta il confinamento ottico della luce o Light Trapping.**



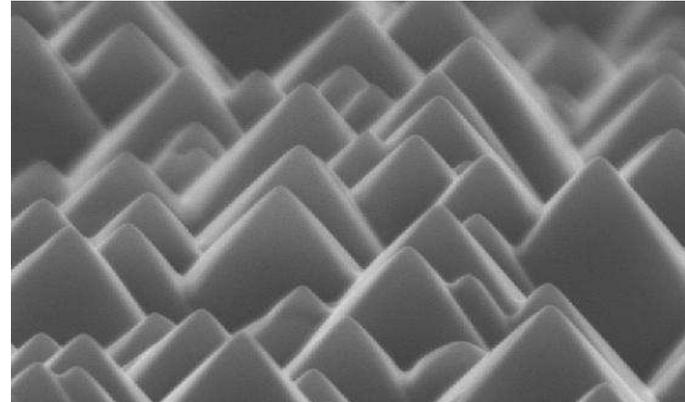
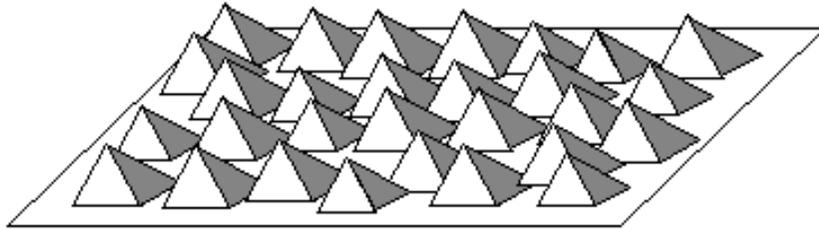
# Testurizzazione e riflettanza angolare



E' mostrato l'effetto estremamente efficace della testurizzazione ai fini della riduzione della riflettanza.

(\*) Random upright pyramids + ARC (Anti-Reflection Coating)

# Testurizzazione anisotropa



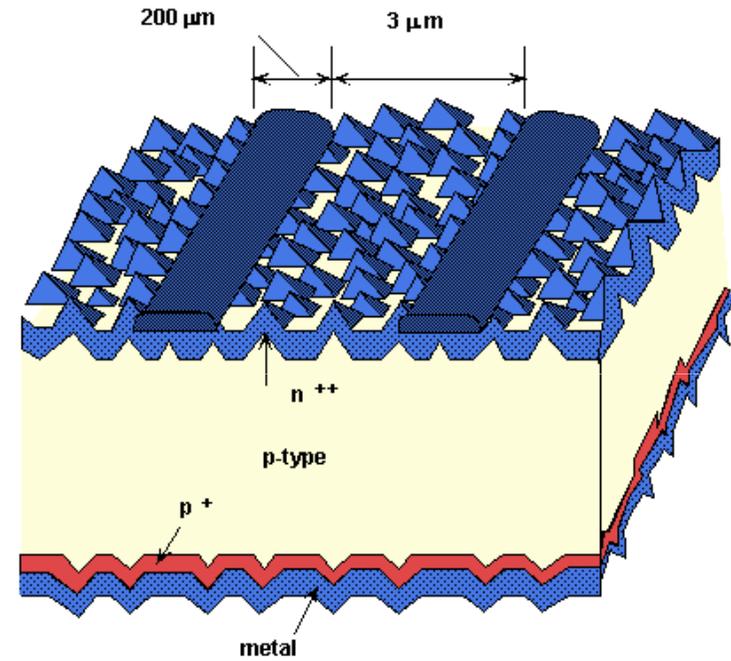
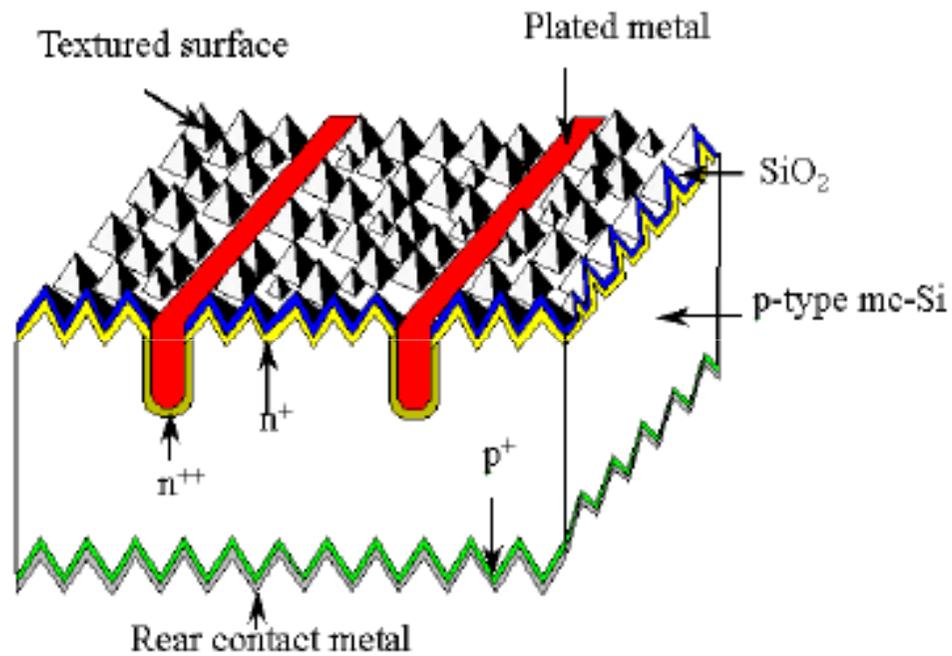
La superficie di Silicio mono-cristallino o poli-cristallino viene attaccata selettivamente. La soluzione di attacco è efficace sui piani orientati (100), molto meno sui piani orientati (111).

Si formano dei nuclei di attacco disposti randomicamente sulla superficie, i quali si sviluppano formando delle piramidi a base quadrata. I nuclei si formano in tempi diversi, e quindi si formano piramidi di dimensioni randomicamente diverse.

Le piramidi saranno dritte se cresciute sui piani (100) (Silicio mono), inclinate negli altri casi (Silicio poli).

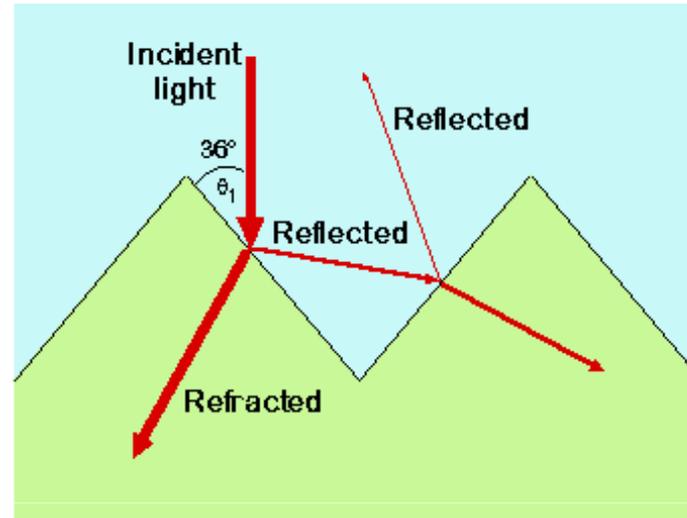
Una comune soluzione per l'etching anisotropo del silicio è: NaOH (2% peso/volume) in isopropanolo a  $T = 90^{\circ}\text{C}$ . Si può usare anche KOH.

# Testurizzazione anisotropica



Esempi di celle solari testurizzate

# Testurizzazione anisotropica



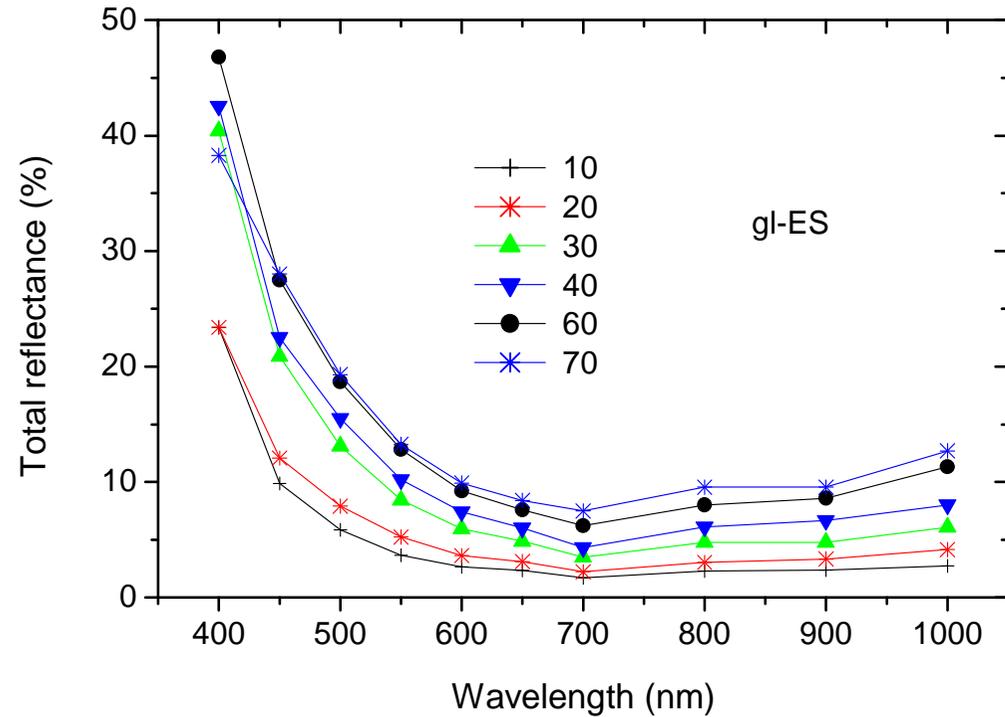
Strutture piramidali delle dimensioni di pochi micron sulla superficie del wafer.

La luce viene riflessa verso il basso e subisce almeno due riflessioni (double bounce effect) con maggiore probabilità di assorbimento.

Si ha una maggiore area esposta alla luce.

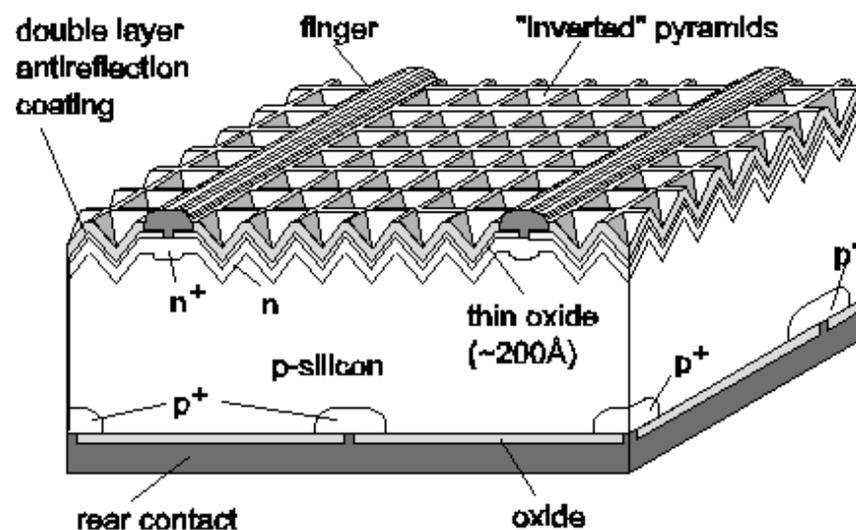
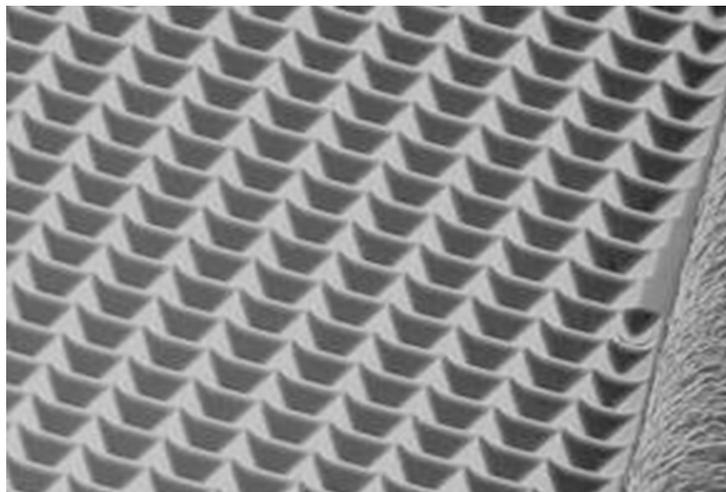
I raggi rifratti entrano nel “bulk” obliquamente e quindi hanno a disposizione un cammino ottico maggiore (maggiore efficienza di raccolta per alte  $\lambda$ ).

# Testurizzazione e riflettanza angolare



Screen-printed monocrystalline Silicon solar cell from Eurosolare (ES)

# Testurizzazione anisotropica



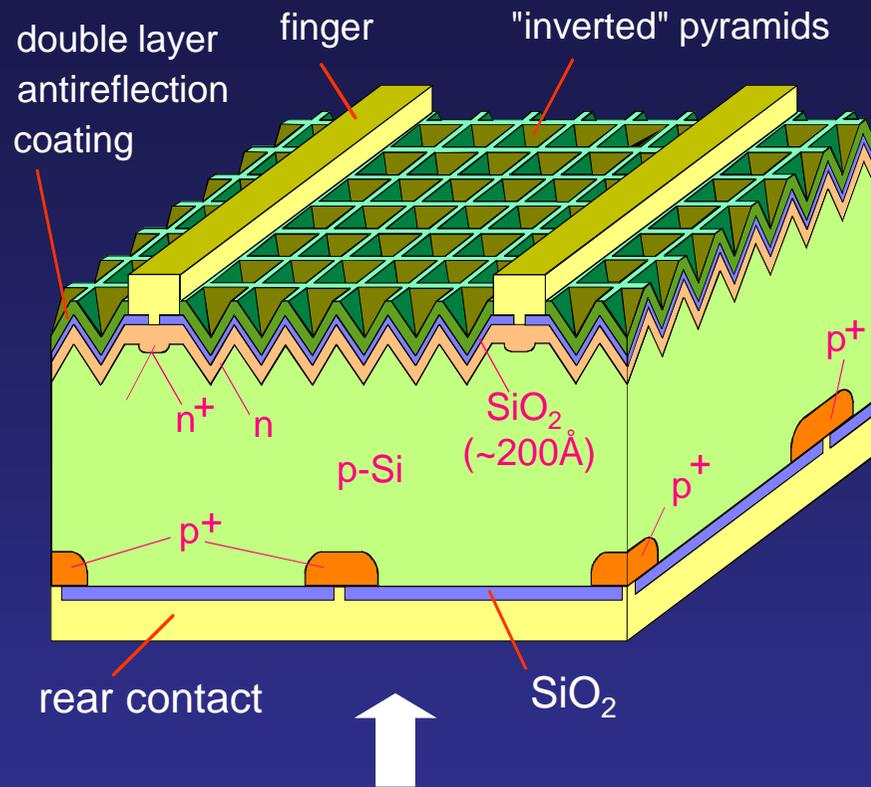
La superficie di Silicio cristallino orientata (100) viene dapprima ricoperta con una maschera nella quale sono praticati dei fori a distanze regolari formanti una matrice quadrata (photolithographic patterning).

Si procede poi all'attacco chimico selettivo (anisotropic etching) mediante il quale in corrispondenza di ogni foro inizia l'attacco chimico del silicio e la formazione di piramidi inverse a base quadrata.

Celle realizzate con questa testurizzazione hanno mostrato efficienze del 24.4%.

Una soluzione per l'etching anisotropo del silicio è: NaOH (2% peso/volume) in isopropanolo a  $T = 90^{\circ}\text{C}$ . Si può usare anche KOH (0.18-M), 1.3 % alcool isopropilico, 20 min. a  $90^{\circ}\text{C}$ .

# Testurizzazione anisotropica

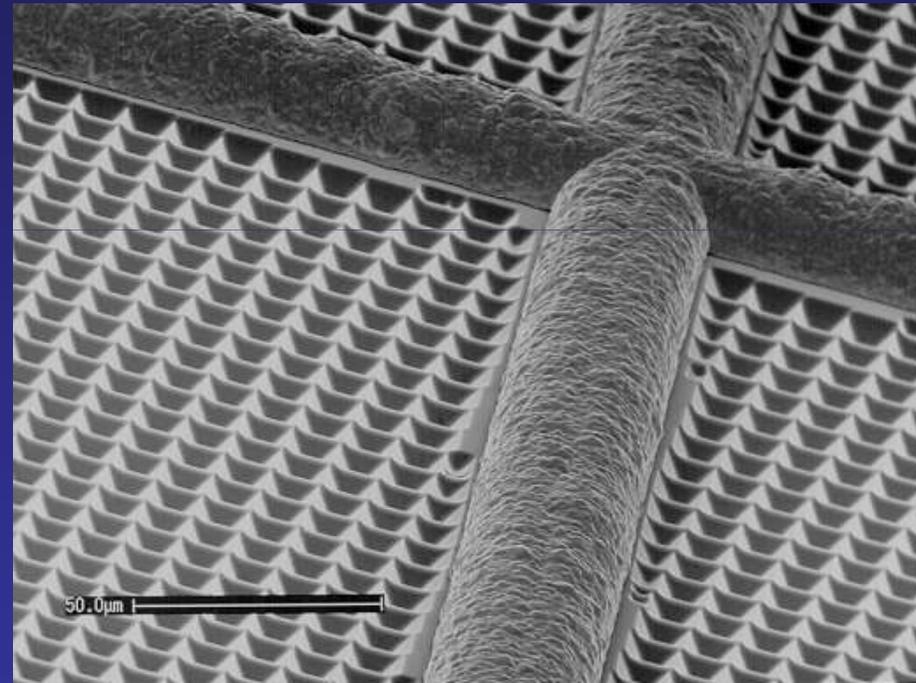


Inverted pyramids on single-Si  
"PERL" cell \* ( $\eta = 24.4\%$ )  
(UNSW)

*Anisotropic* etching of (100) Si surface.

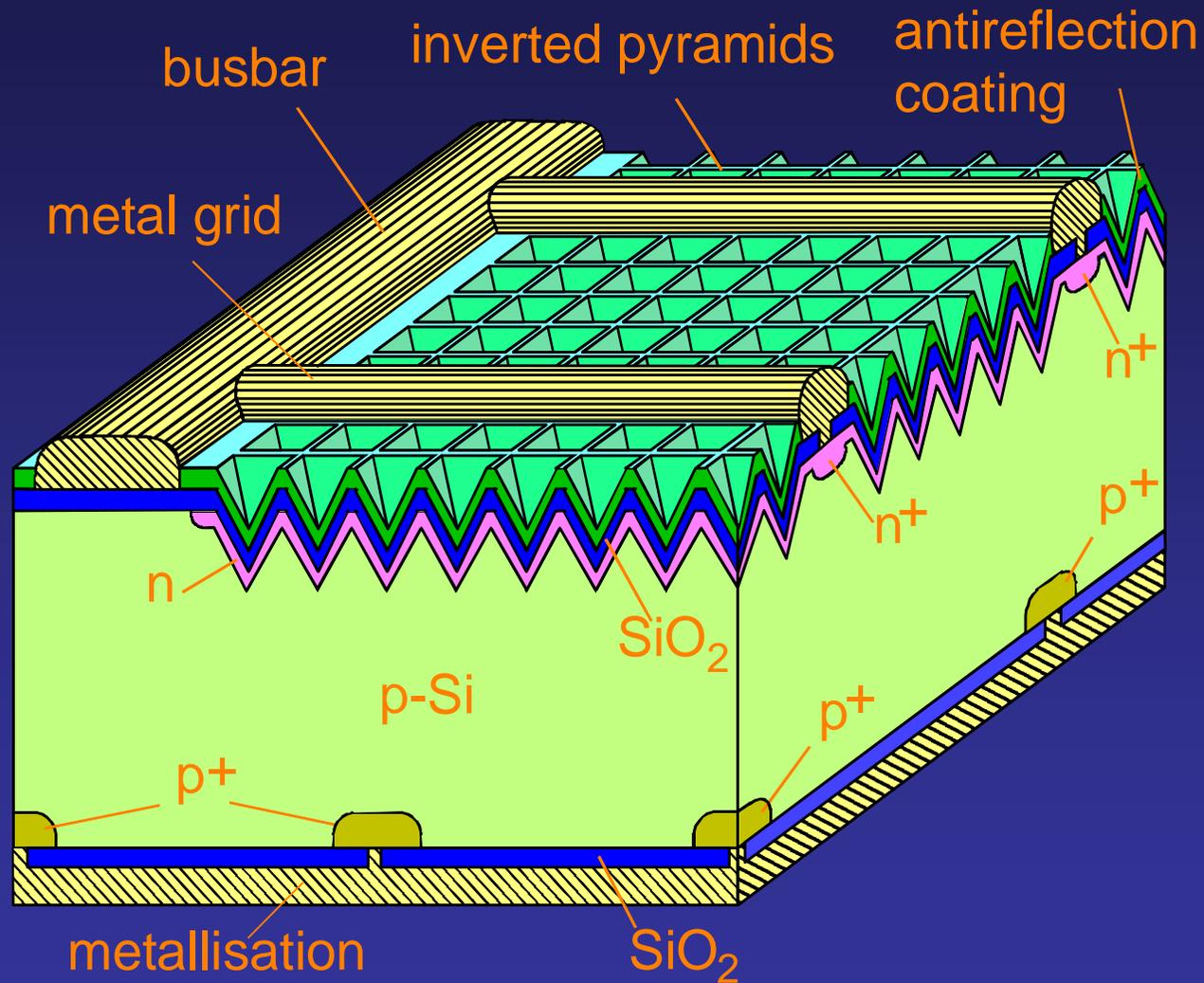
(\*) PERL: Passivated Emitter, Rear Locally-diffused

SEM photo of the  
"PERL" cell (UNSW\*\*)

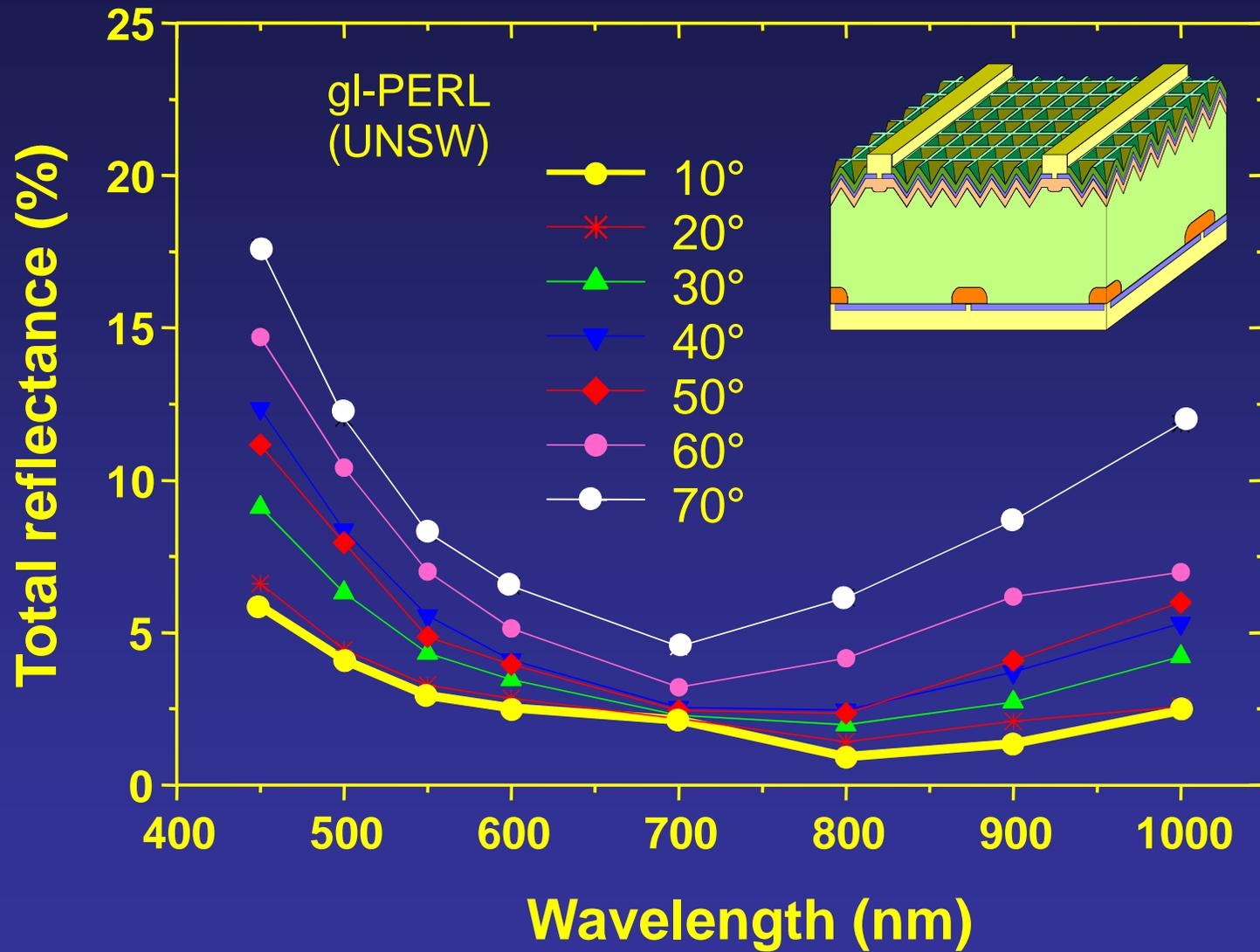


(\*\*) UNSW: University of New South Wales  
(Sydney, Australia)

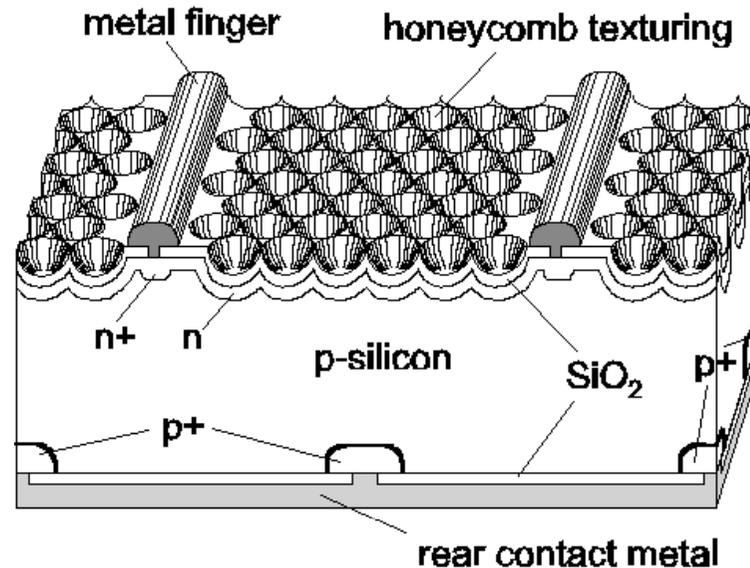
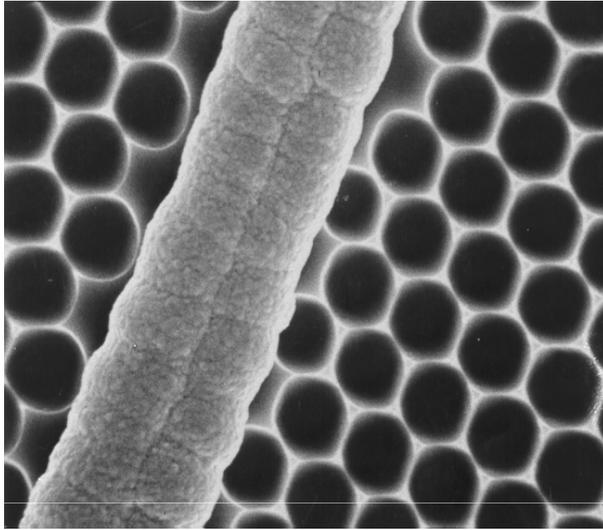
# Cella PERL-UNSW $\equiv$ Si-LED



# Angle-resolved spectral reflectance



# Testurizzazione isotropica



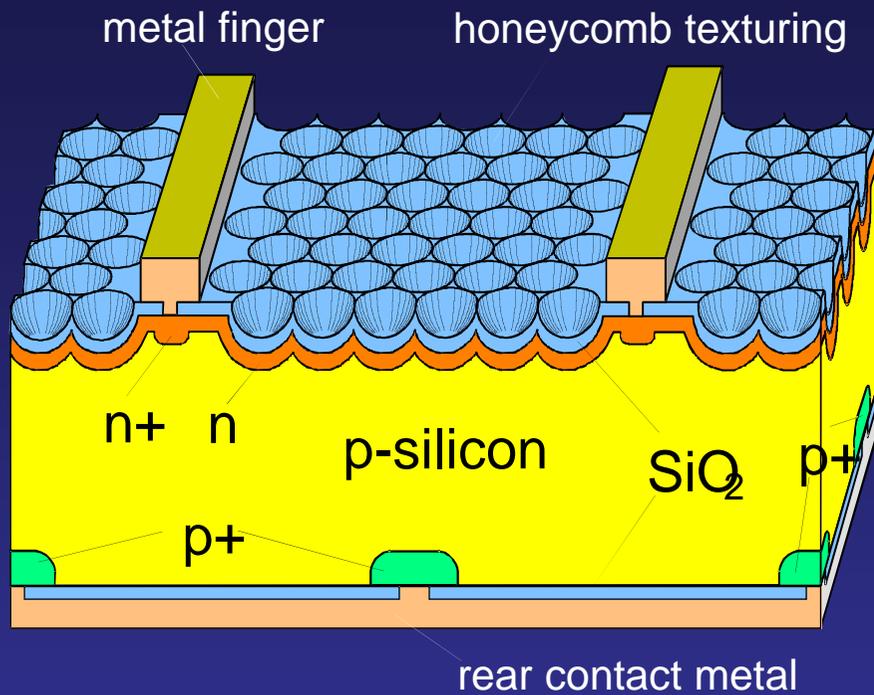
E' adottata per realizzare efficacemente la testurizzazione nel caso del Silicio multicristallino. La superficie di Silicio cristallino viene ricoperta con una maschera con i fori formanti una matrice esagonale (photolithographic patterning).

Si procede poi all'attacco chimico non selettivo (isotropic etching) mediante il quale in corrispondenza di ogni foro inizia l'attacco chimico isotropo del silicio e la formazione di buche di forma circolare (coppe).

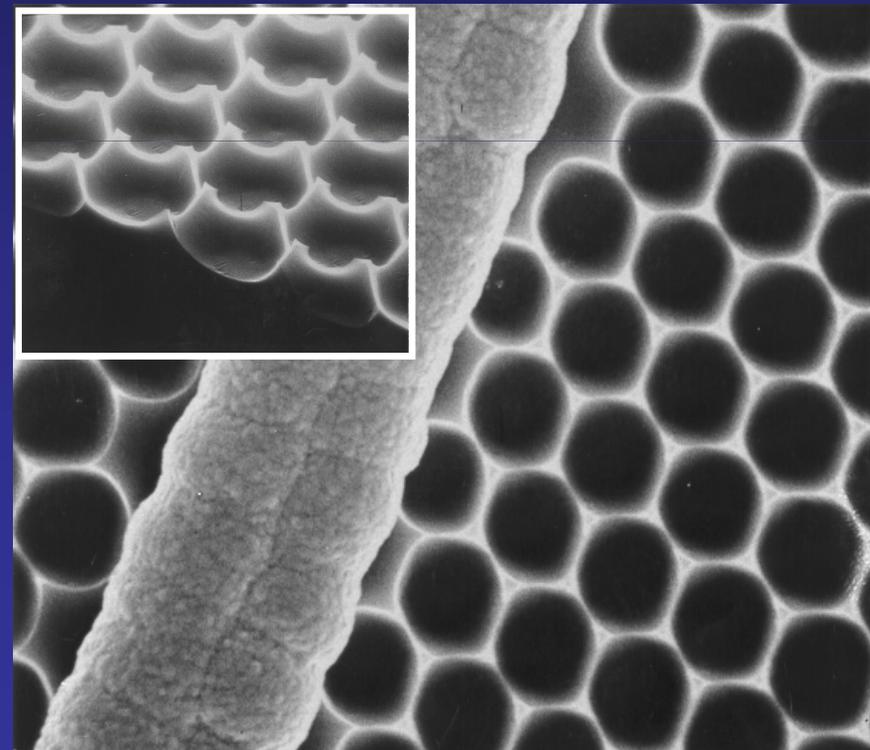
La matrice (patterning) esagonale è scelta allo scopo di impacchettare al meglio le buche. Celle realizzate con questa testurizzazione hanno mostrato efficienze del 19.8%.

La testurizzazione a nido d'ape su Silicio multicristallino è ottenuta convenzionalmente con soluzioni acide a base di HF e HNO<sub>3</sub>.

# Testurizzazione isotropica



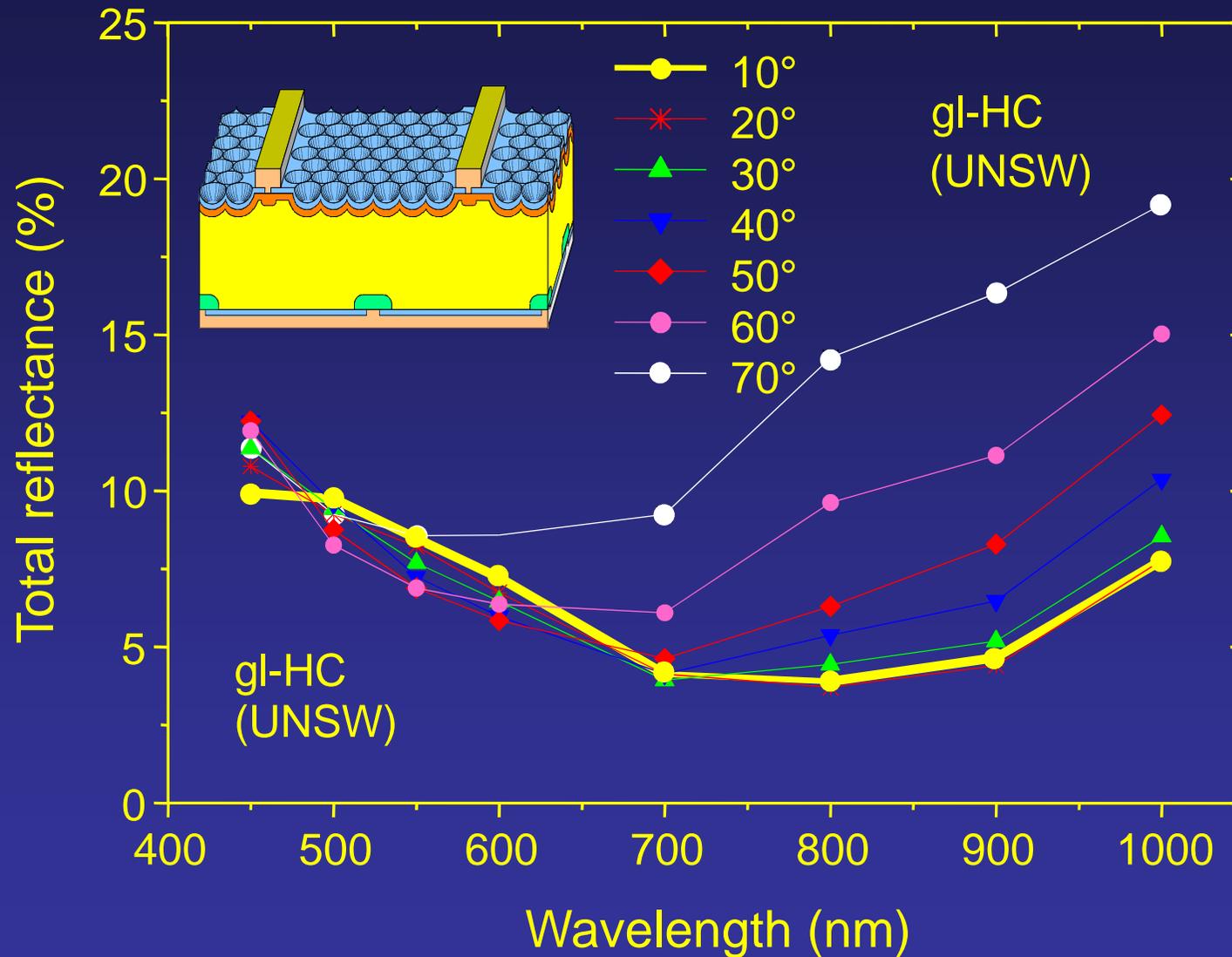
SEM photo of the  
“Honeycomb” cell (UNSW)



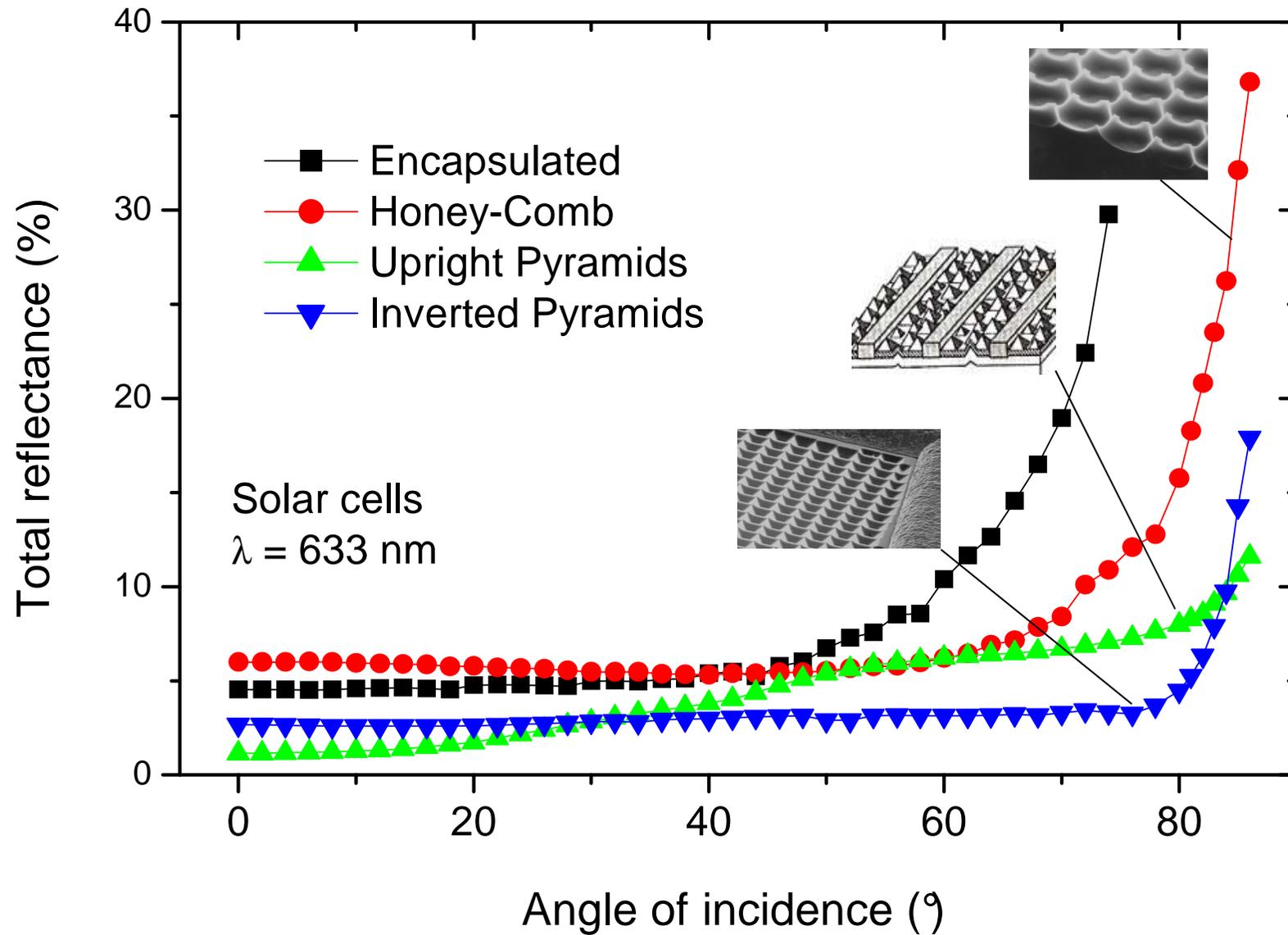
Hemispherical wells on multi-Si  
“Honeycomb” cell ( $\eta = 19.8\%$ )  
(UNSW)

*Isotropic* etching of multi-Si surface.

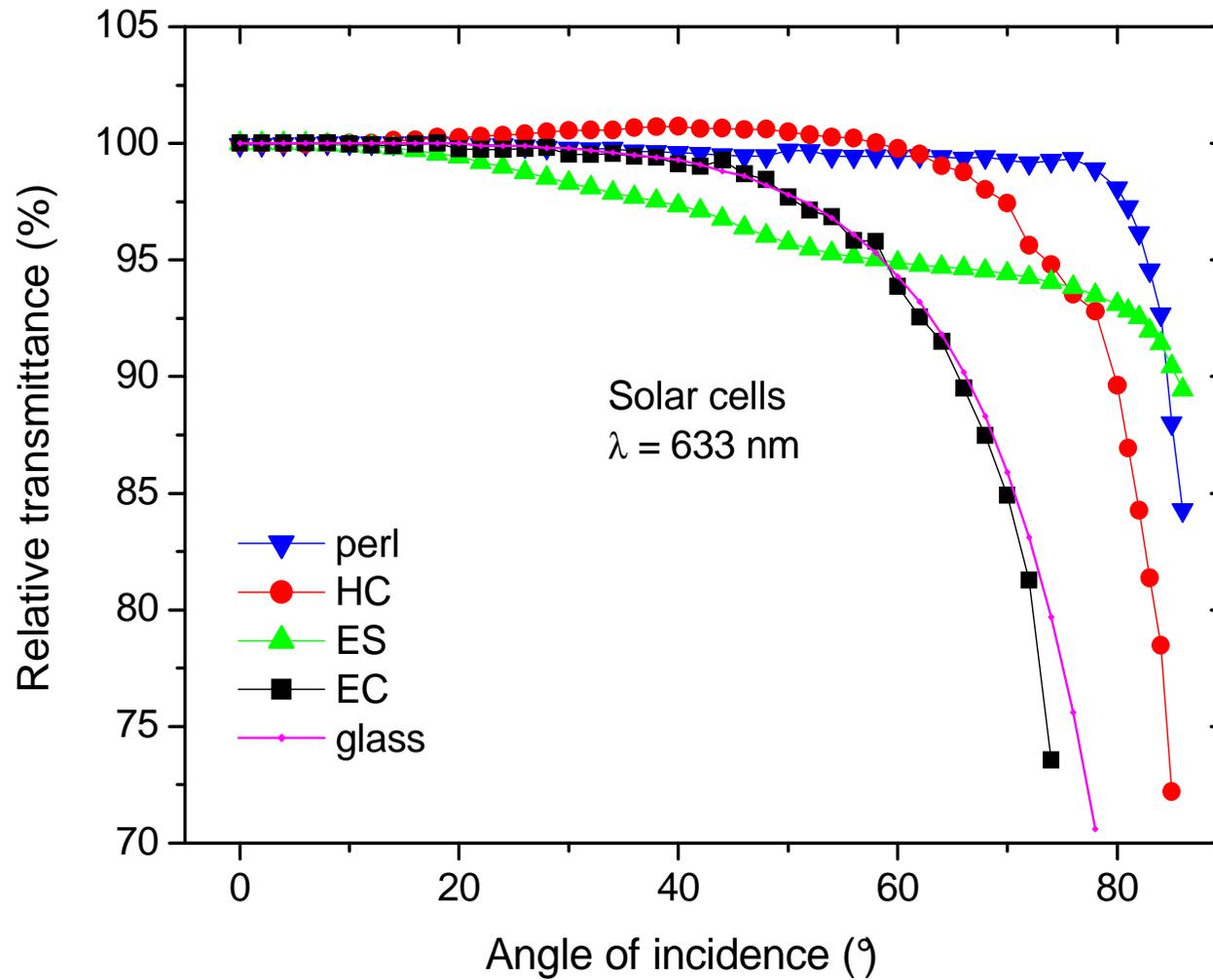
# Angle-resolved spectral reflectance



# Testurizzazione e riflettanza angolare

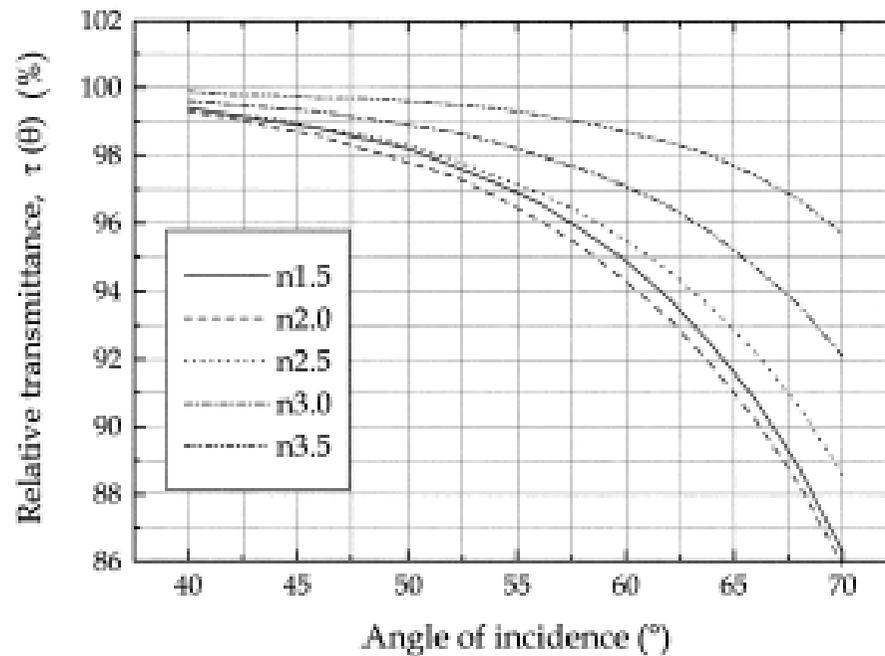


# Testurizzazione e trasmittanza angolare relativa



# Trasmittanza angolare relativa

Il concetto di trasmittanza relativa è stato già da noi introdotto nella Lezione 3 a proposito di un modulo fotovoltaico. Allora avevamo visto che un modulo FV al Silicio mono si poteva simulare molto bene con un dielettrico semi-infinito, non assorbente, avente un indice di rifrazione compreso tra 2.5 e 3.0 (vedi le curve teoriche qui sotto). Nella figura precedente, l'unica cella incapsulata è la EC, ed essa mostra una trasmittanza relativa molto particolare, la quale è modellata molto bene fino a  $\sim 80^\circ$  da una curva teorica con indice di rifrazione pari a 2, a dimostrazione che la teoria esposta è corretta ( $n=2$  anziché 2.5-3.0 è dato semplicemente dalla diversa struttura della cella EC rispetto a un modulo FV).



Curve teoriche di trasmittanza relativa:

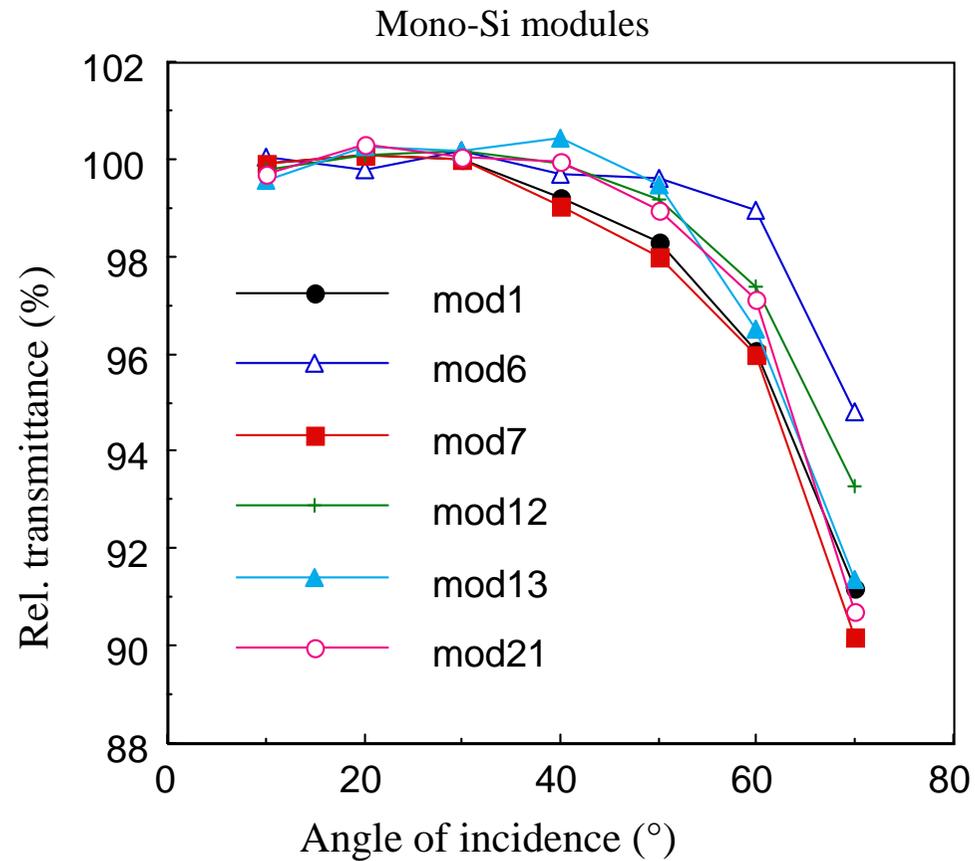
$$\tau(\theta) = (1 - R(\theta)) / (1 - R(0))$$

per un dielettrico semi-infinito non assorbente.

Perdite ottiche relative:

$$1 - \tau(\theta) = 1 - (1 - R(\theta)) / (1 - R(0))$$

# Trasmittanza angolare relativa



Trasmittanza relativa di alcuni moduli al Silicio monocristallino in funzione dell'angolo d'incidenza. La trasmittanza relativa è generalmente più alta nei moduli che mostrano una maggiore riflettanza ai bassi angoli.

# Testurizzazione di Silicio multicristallino

Il meccanismo generale dell'attacco isotropo con soluzioni acide funziona in questo modo:

L'acido nitrico, un agente ossidante, forma ossido di silicio sulla superficie del wafer; successivamente, l'ossido di silicio è rimosso dall'azione dell' HF che forma dei complessi solubili in acqua. Questa reazione è esotermica e quindi richiede un sistema per il raffreddamento del campione.

La soluzione di attacco può essere modificata aggiungendo  $H_2SO_4$ ,  $NaNO_2$  (nitrito di sodio) e altri additivi. Una piccola quantità di  $NaNO_2$ , come agente catalitico, riduce il tempo d'inizio del processo e controlla la velocità di reazione.

Gli altri additivi servono ad aumentare la bagnabilità della soluzione acida sulla superficie del Silicio, col risultato di una migliore uniformità della reazione di attacco. Infine, l' $H_2SO_4$  svolge il ruolo di stabilizzare l'intera soluzione di attacco.

L'attacco isotropo può essere applicato sia congiuntamente al patterning della superficie (fotolitografia), producendo così strutture testurizzate regolari in cui le features sono delle buche circolari, sia senza patterning della superficie, ovvero sulla superficie libera del Silicio, producendo in tal modo una testurizzazione irregolare, ma non per questo meno efficace (vedi prossime diapositive).

# Testurizzazione di Silicio multicristallino

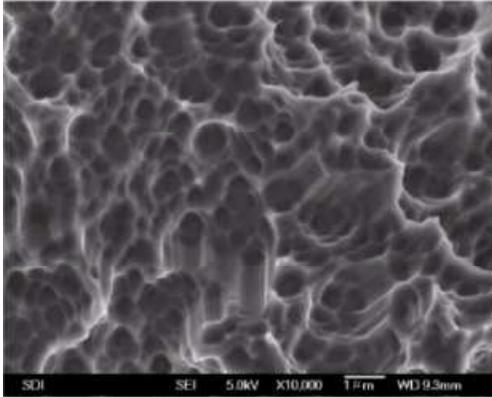
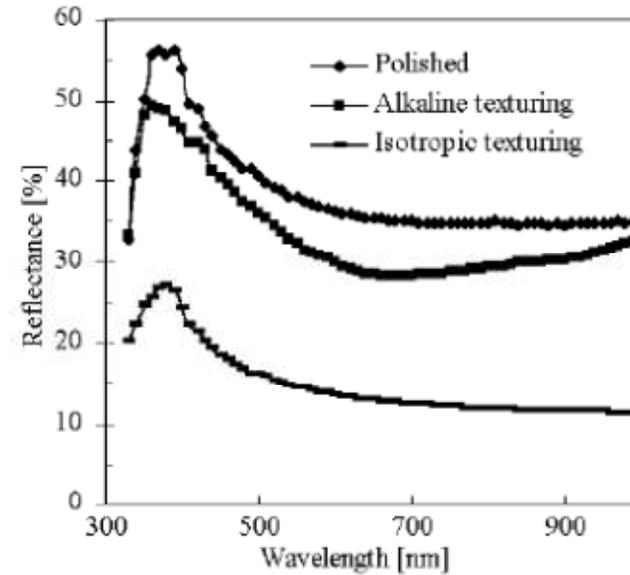
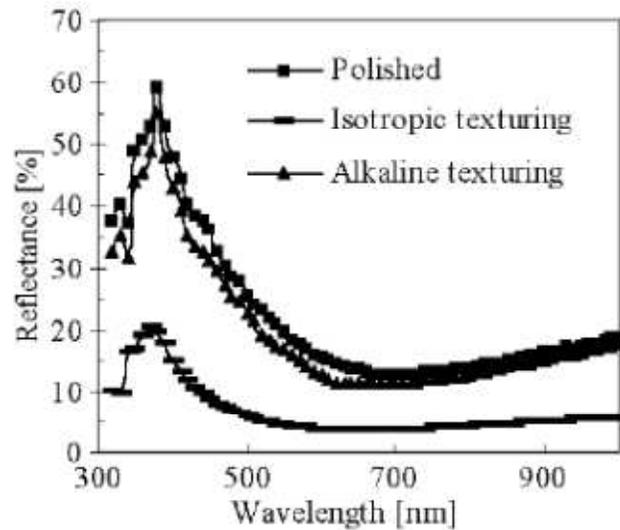


Immagine SEM di mc-Si testurizzato col metodo della soluzione acida modificata.



Riflettanza spettrale di mc-Si



La riflettanza superficiale è ulteriormente ridotta con la formazione sulla superficie del wafer di mc-Si di uno strato di ossido di Silicio.

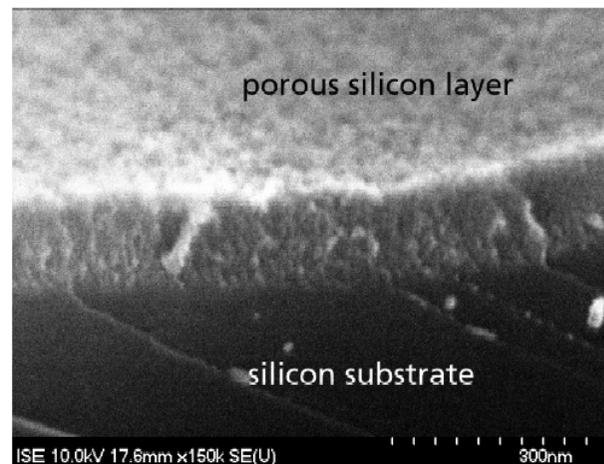
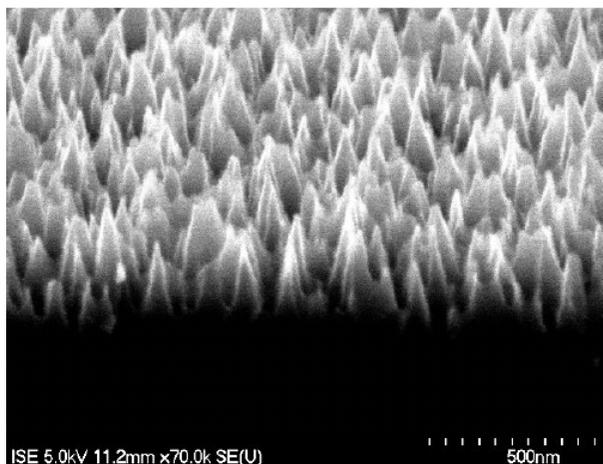
# Testurizzazione di Silicio multicristallino

Altri metodi per la testurizzazione della superficie di Silicio multicristallino sono: il “mechanical grooving”, il “laser grooving” e il “reactive ion etching” (RIE).

Il “mechanical grooving” richiede wafer spessi almeno 200  $\mu\text{m}$  perchè produce “grooves” profonde 50 $\mu\text{m}$ .

Il RIE si realizza con complicati processi e richiede sistemi dispendiosi in confronto ai processi di tipo “wet etching”.

# Testurizzazione di Silicio multicristallino



La testurizzazione isotropica del Silicio multicristallino può essere realizzata trattando la superficie del Silicio con un plasma, oppure formando uno strato di Silicio poroso sulla superficie del Silicio.

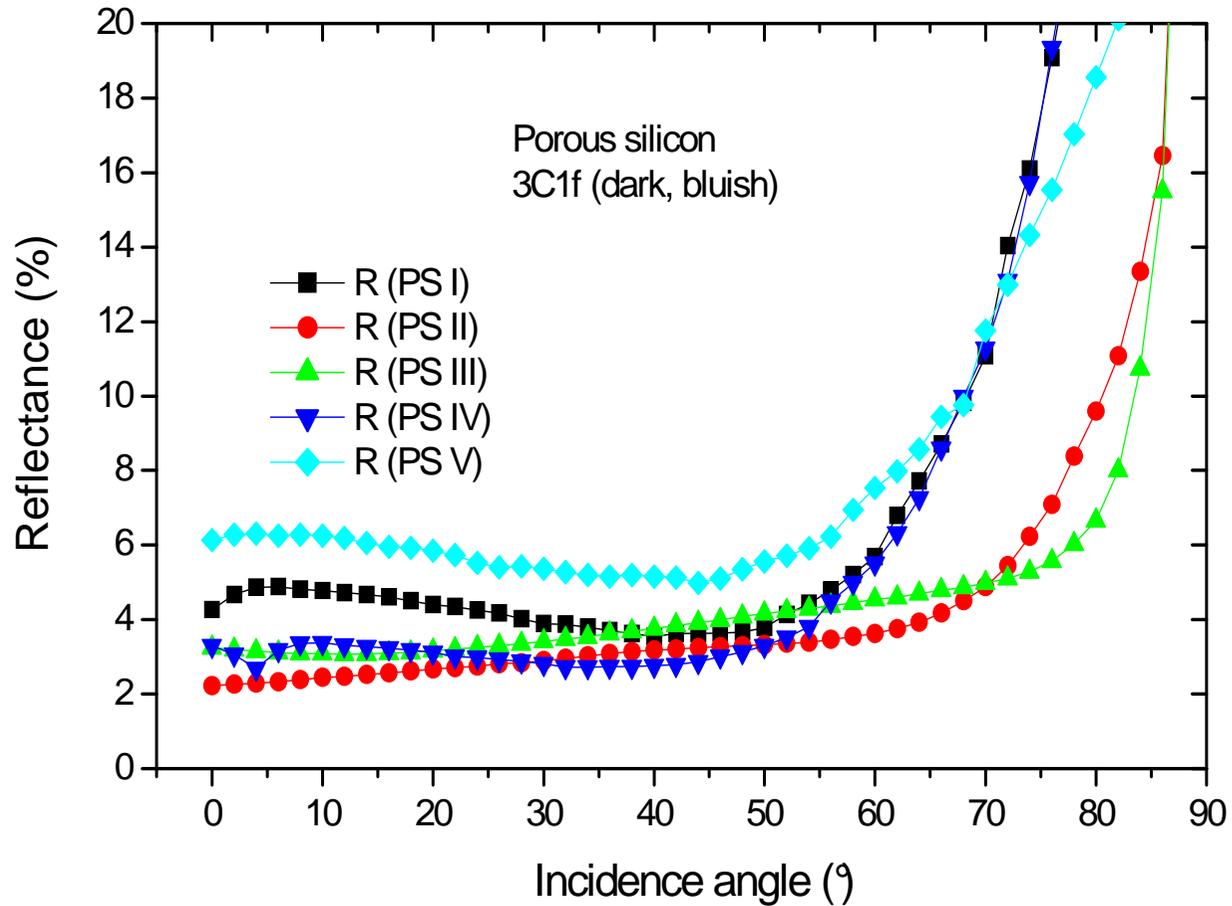
Sopra: foto SEM di mc-Si testurizzato.

A sinistra: "Black Silicon" (plasma etched nano-textured silicon. The BS samples were prepared by following a  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  reactive ion etch process, acting as a mask-less texturing of silicon).

A destra: Porous Silicon (stain etched silicon with a wet chemically formed porous silicon layer. To obtain the PS textured samples, ready made silicon solar cells with screen printed contacts on both sides were dipped into a diluted solution of  $\text{HF}:\text{HNO}_3$  for 20 to 40 seconds at room temperature. Immediately afterwards, the samples were thoroughly rinsed.

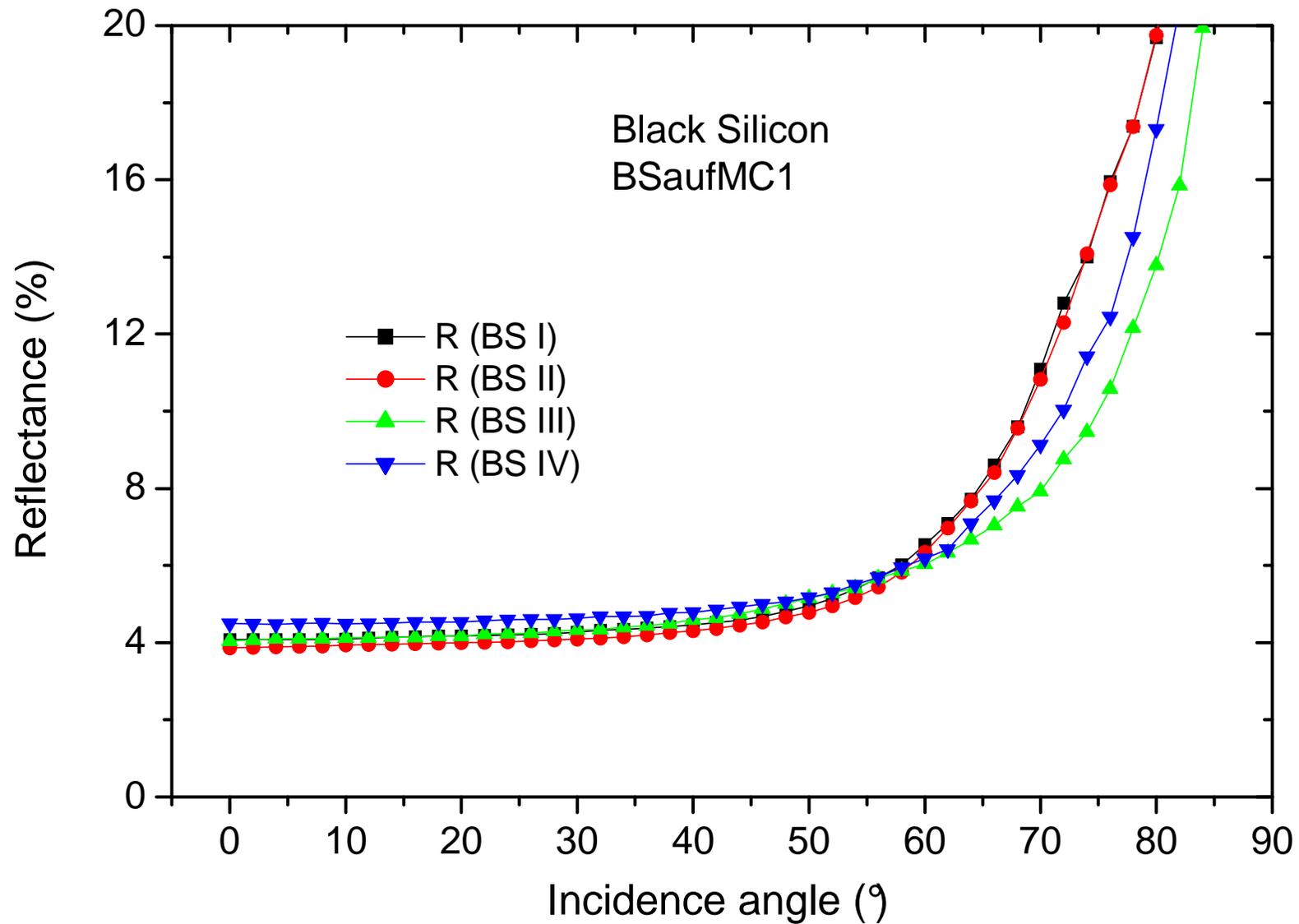
A. Parretta, P. Grillo, M. Pellegrino, A. Sarno, M. Schnell(\*) and R. Lüdemann (\*)  
*"Angle-Resolved Reflectance Measurements on Textured Silicon Materials and Devices"*  
17th EPSEC, Munich, 22-26 oct. 2001.

# Riflettanza angolare di Silicio Poroso

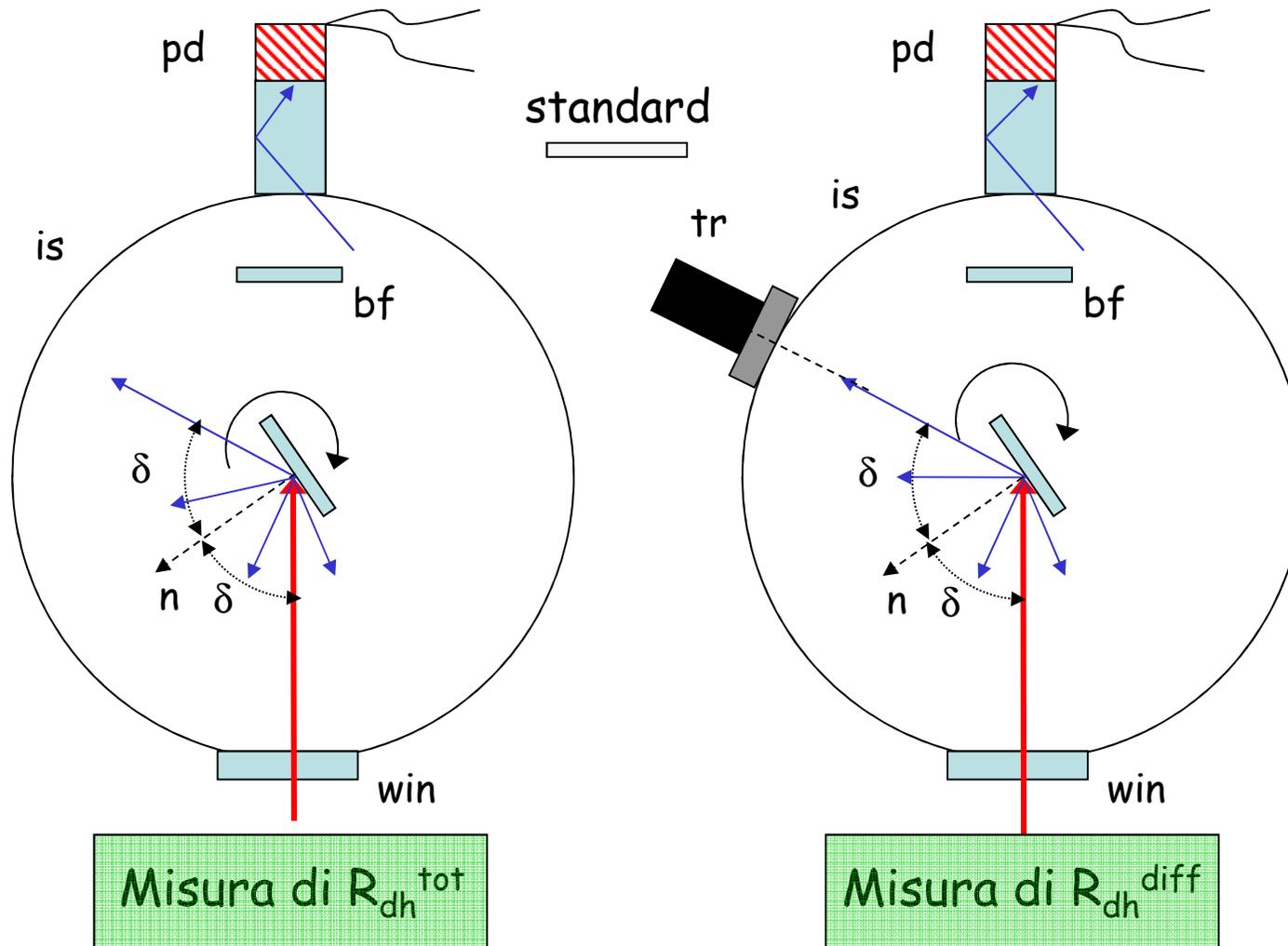


Riflettanza angolare,  $R_{ch}(\theta, 534)$  di un campione di Silicio Poroso, di colore nero-bluastro, ottenuta a 534 nm misurando cinque diverse regioni della superficie. Notare la forte disomogeneità ottica tra le diverse regioni.

# Riflettanza angolare di "Black Silicon"



# Come abbiamo misurato la riflettanza

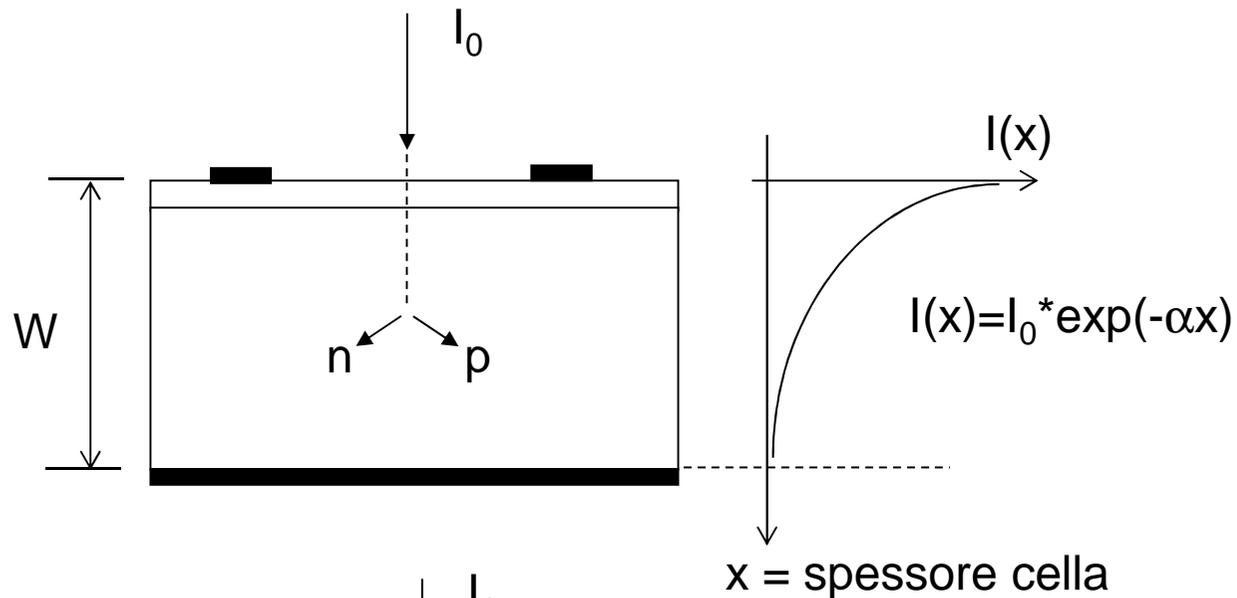


$$A_{dh} = 1 - R_{dh}^{tot}$$

$$R_{dd} = R_{dh}^{tot} - R_{dh}^{diff}$$

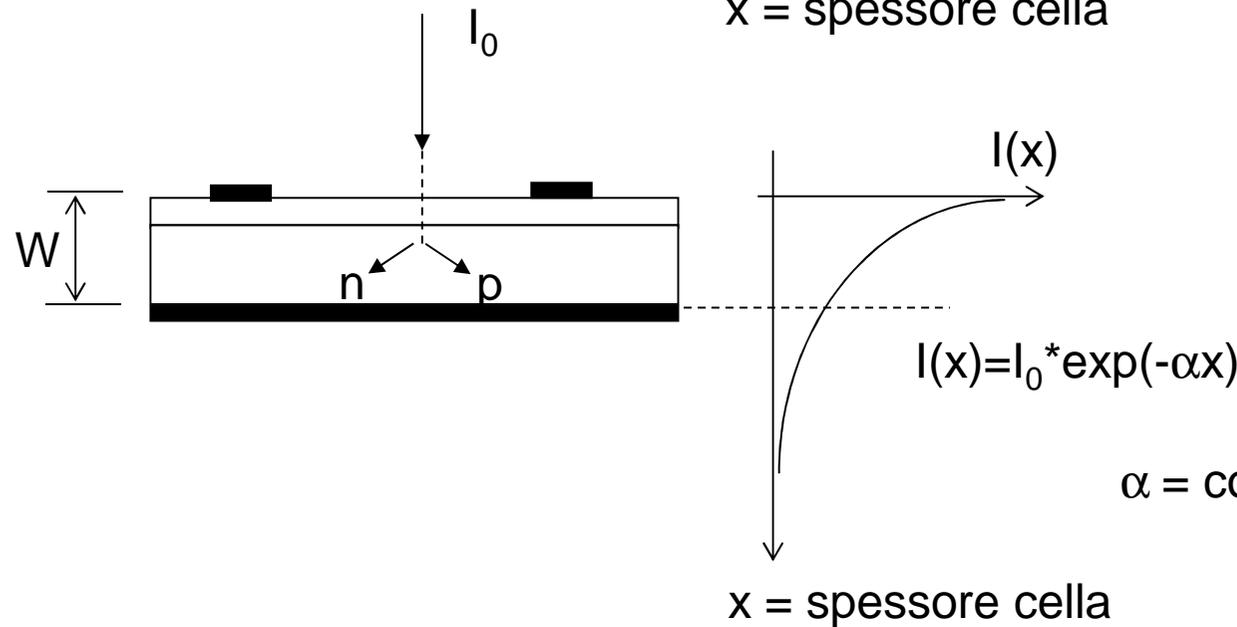
“Light Trapping”

# Celle Solari non Testurizzate



Cella solare spessa:

- \* Alto assorbimento della luce
- \* Alta ricombinazione nel bulk (bassa Voc)



Cella solare sottile:

- Basso assorbimento della luce (bassa Isc)
- \* Basso ricombinazione nel bulk (alta Voc)

$\alpha$  = coefficiente di assorbimento

# “Light Trapping”

Per assorbire al meglio la radiazione solare incidente, sarebbe conveniente avere delle celle solari spesse.

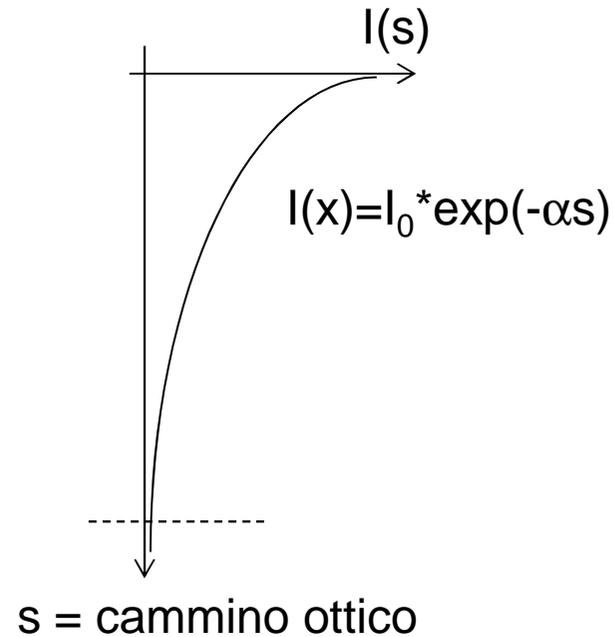
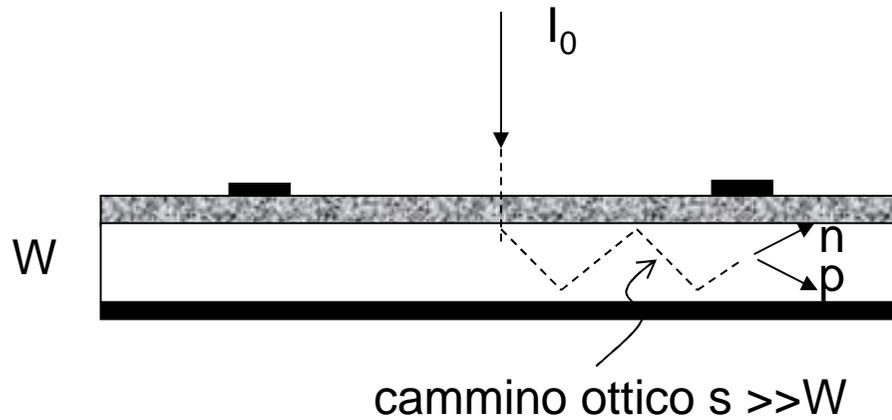
D'altra parte, maggiore è il volume complessivo della cella, maggiore è la ricombinazione dei portatori minoritari nel bulk, e quindi minore è la tensione a circuito aperto,  $V_{oc}$ .

E' necessario allora ridurre il volume complessivo della cella (ridurre lo spessore) cercando di trarre ogni possibile vantaggio dalle capacità di assorbimento della luce da parte di un volume assegnato della cella.

E' necessario cioè adottare degli schemi che consentano di intrappolare al meglio la luce all'interno della cella (“light trapping”).

In entrambi i casi si interviene modificando la geometria piana delle superfici o interfacce introducendo delle superfici o interfacce “testurizzate”.

# Celle Solari Testurizzate



Cella solare sottile e testurizzata:

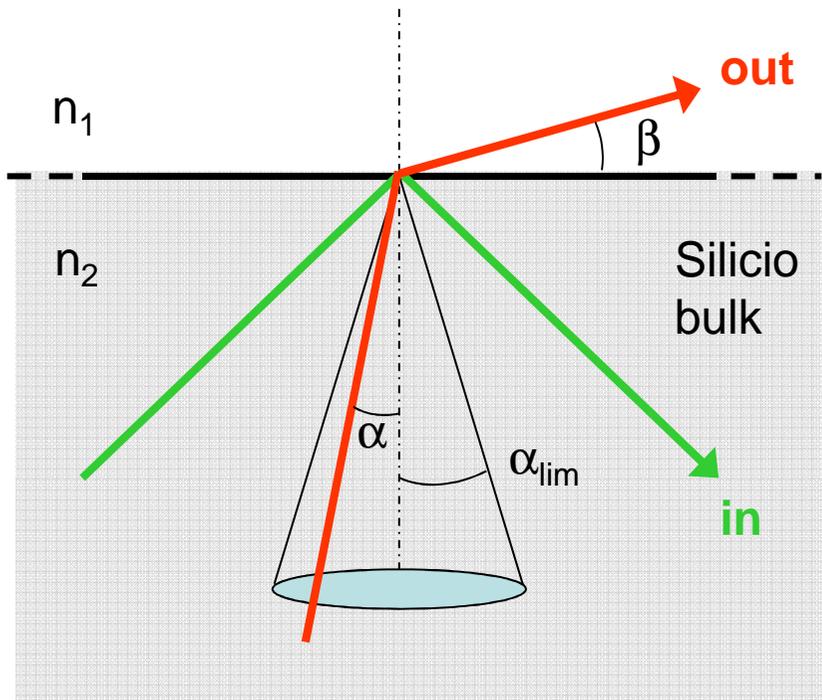
- \* Alto assorbimento della luce (alta  $I_{sc}$ )
- \* Bassa ricombinazione nel bulk (alta  $V_{oc}$ )

$$\alpha \cdot s = \alpha_{\text{eff}} \cdot W$$

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha \cdot (s / W) = \alpha \cdot B$$

B = fattore d'innalzamento  
del cammino ottico

# “Light Trapping”



Legge di Snell:

$$\sin\alpha / \sin\beta = n_1 / n_2$$

Riflessione interna totale:  $\beta = 90^\circ$

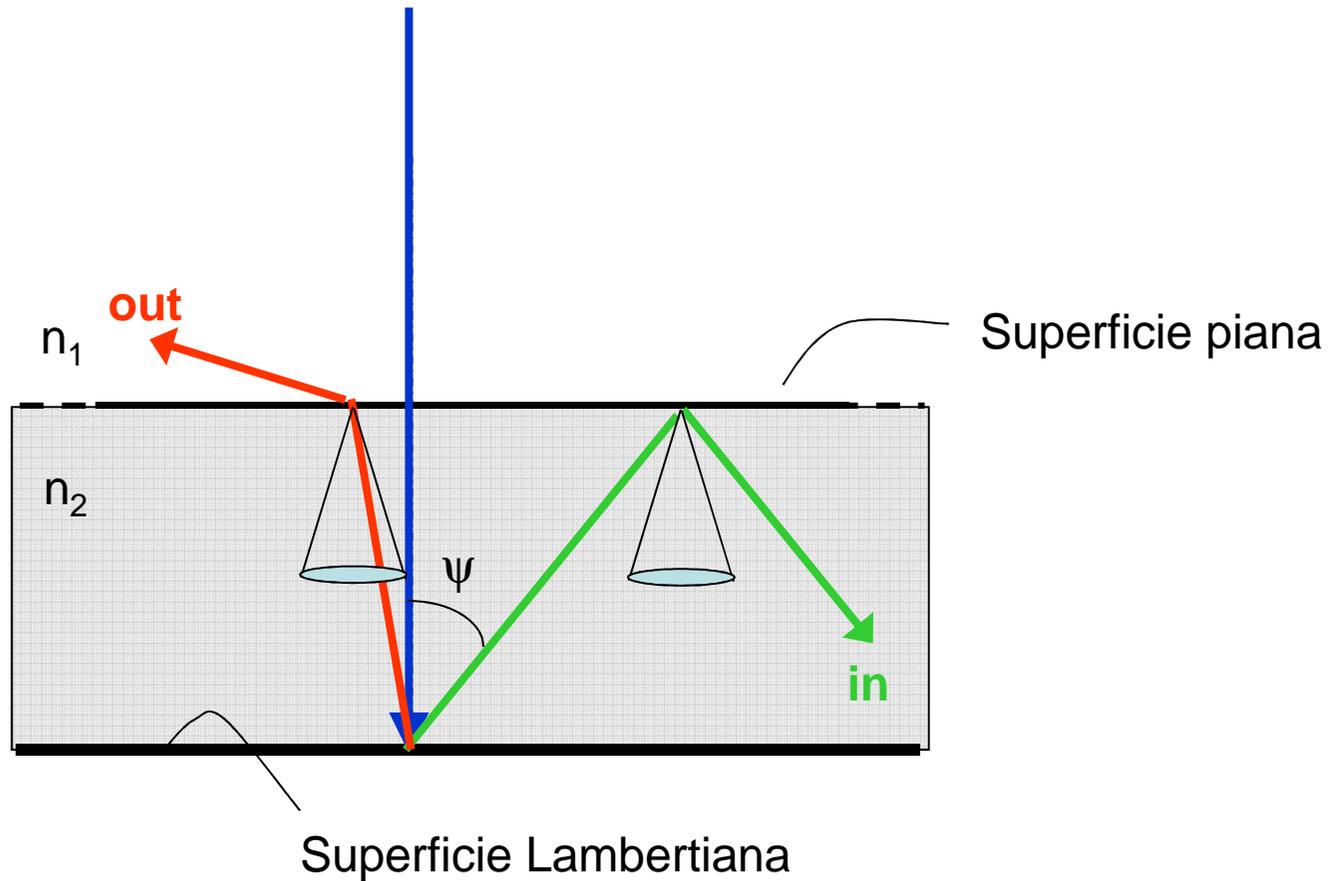
$$\alpha = \arcsin(n_1/n_2);$$

$$n_1 = 1.0 \text{ (aria)}; n_2 \sim 3.5 \rightarrow \alpha \sim 17^\circ$$

$$n_1 = 1.5 \text{ (vetro)}; n_2 \sim 3.5 \rightarrow \alpha \sim 25^\circ$$

Per essere disaccoppiato dal Silicio, un raggio di luce deve incontrare la superficie piana del Silicio ad un angolo  $\alpha$  minore di  $\arcsin(n_1/n_2)$ .  
Quindi, soltanto una frazione della luce proveniente dal bulk del Silicio verrà persa ad ogni passaggio.

# “LIGHT TRAPPING”



Il riflettore posteriore è una superficie Lambertiana che riflette la luce con una radianza costante in tutte le direzioni, ovvero con una intensità che varia come  $\cos\psi$ , dove  $\psi$  è l'angolo di diffusione (scattering).

# “LIGHT TRAPPING”

Nel caso di basso assorbimento, una frazione della luce pari a  $1 / n^2$  (caso aria / semiconduttore) sarà accoppiata esternamente dalla superficie superiore ad ogni riflessione, assumendo una trasmissività unitaria della superficie superiore.

La luce non accoppiata esternamente sarà riflessa verso il riflettore Lambertiano da dove sarà di nuovo randomizzata in tutte le direzioni.

Una figura di merito per questo schema di light trapping è l'innalzamento del cammino ottico, nel limite di basso assorbimento.

Esso è il rapporto tra il cammino ottico medio e il cammino ottico minimo, uguale allo spessore medio della cella,  $W$ .

Il cammino ottico medio è dato dalla serie:

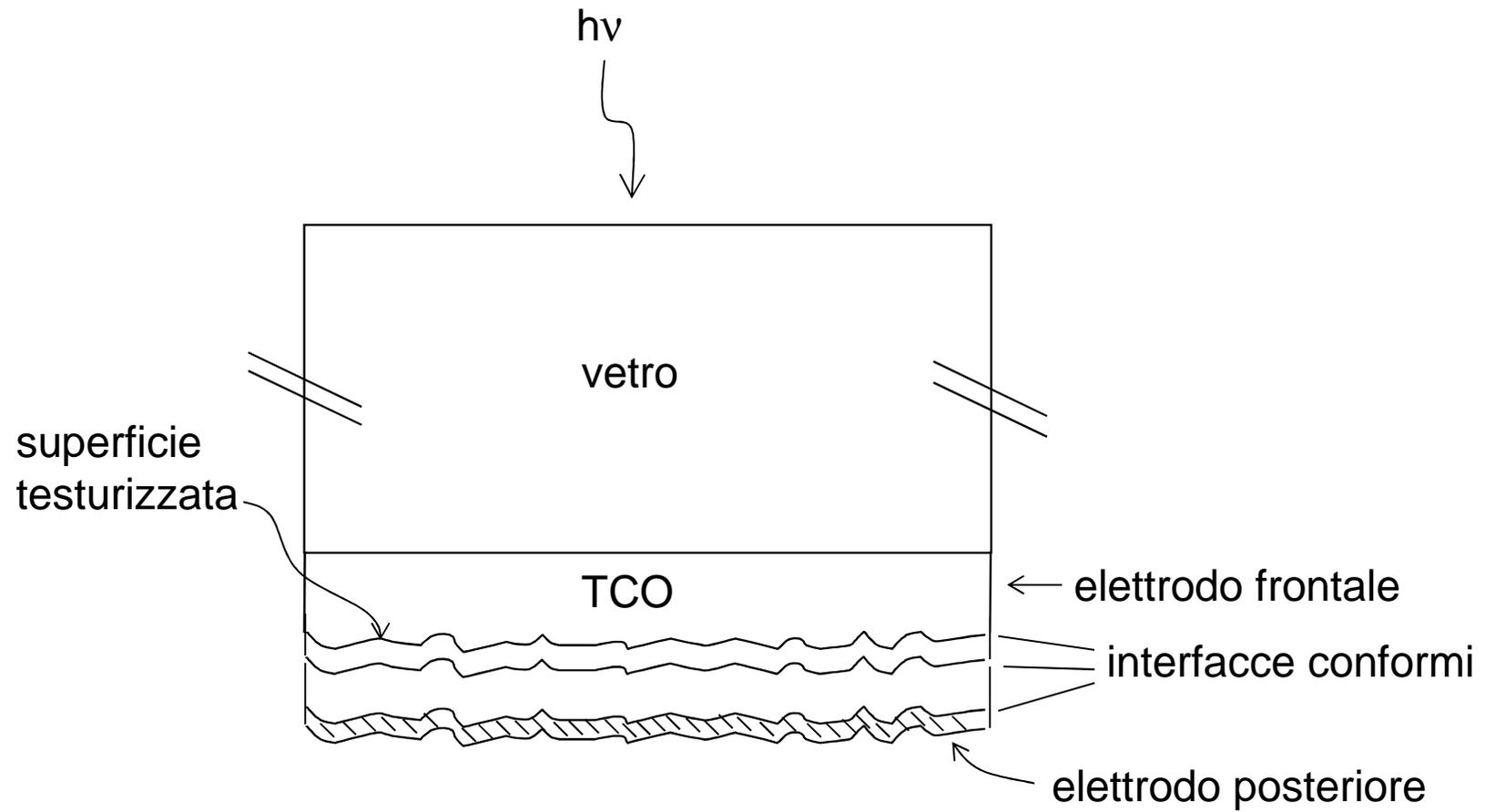
$$\bar{P} = 2W / n^2 + 6W(n^2 - 1) / n^4 + 10W(n^2 - 1)^2 / n^6 + \dots$$

Da cui si ricava il seguente fattore d'innalzamento del cammino ottico:

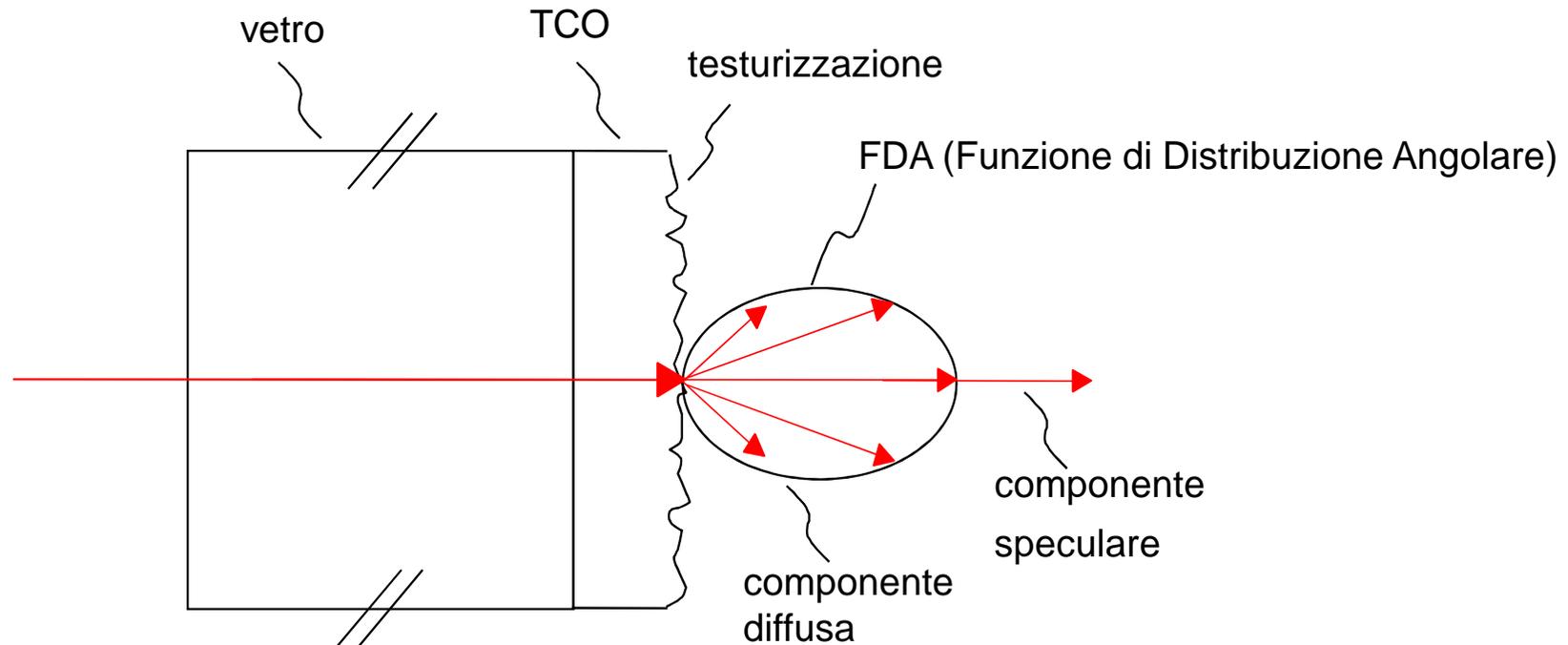
$$B = 4n^2 - 2$$

prossimo a 50 per il Silicio.

# Celle solari a struttura inversa

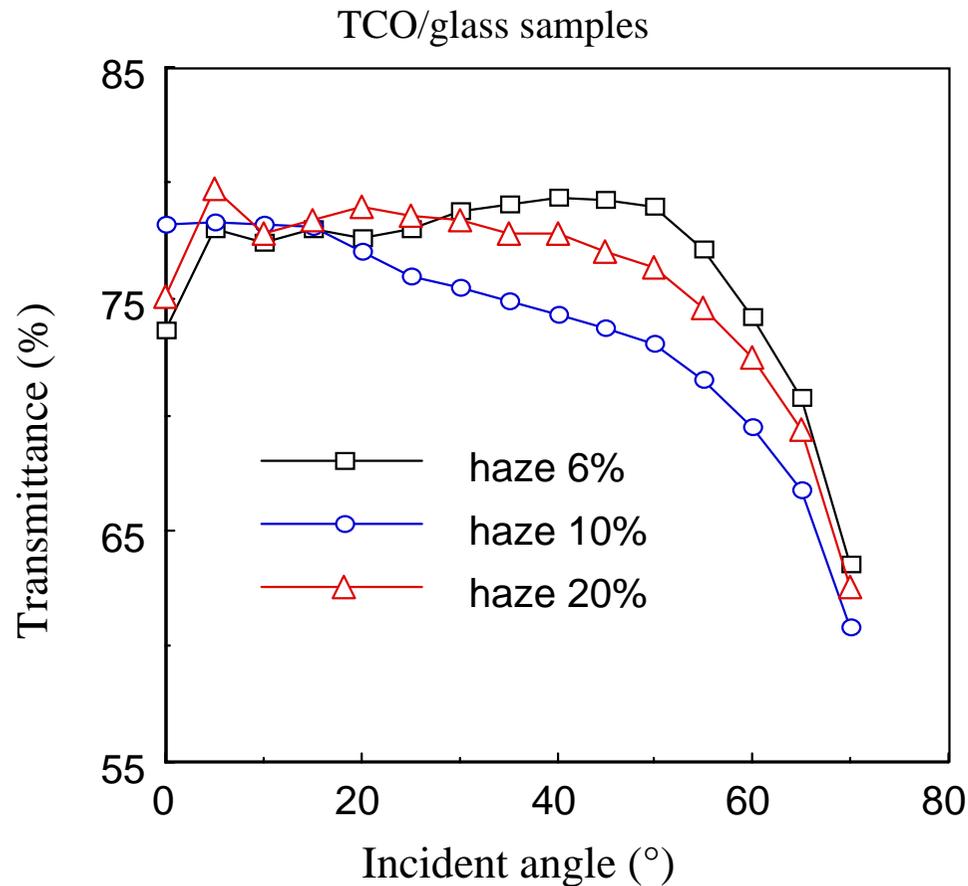


# Diffusione della luce



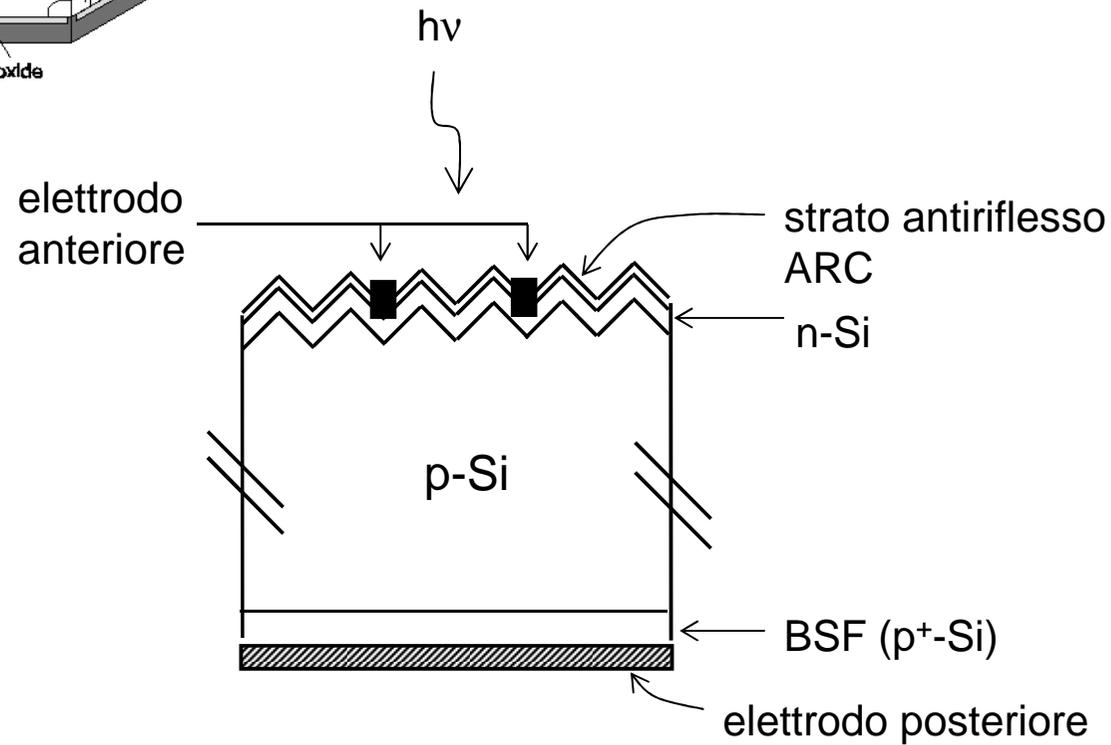
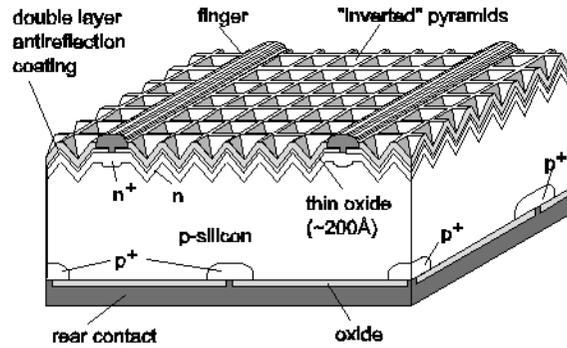
L'analisi della luce diffusa dallo strato finestra permette di valutare la qualità della testurizzazione superficiale del TCO (Transparent Conductive Oxide) e di prevedere la diffusione all'interno della cella solare.

# Trasmittanza angolare

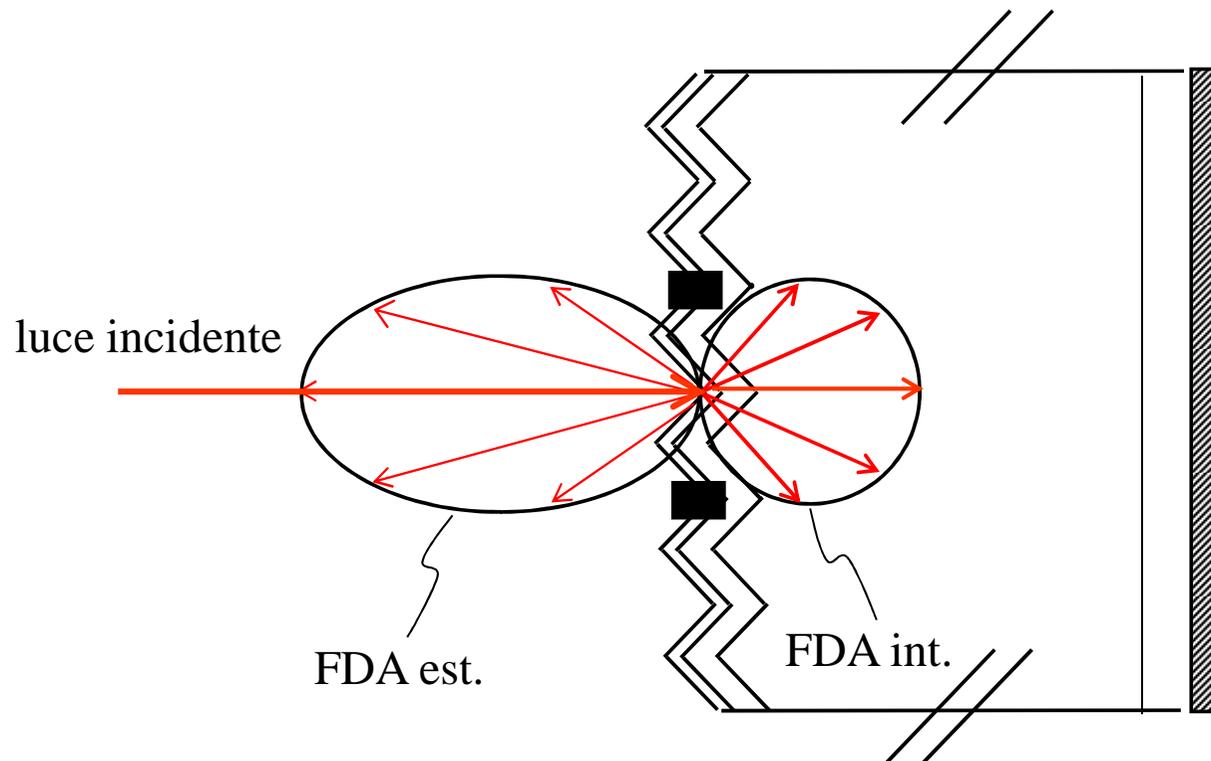


Trasmittanza in funzione dell'angolo d'incidenza per campioni di TCO/vetro aventi diversa percentuale di haze, impiegati come strati finestra nei moduli fotovoltaici al Silicio amorfo..TCO orientato verso la sorgente.

# Celle solari a struttura diretta



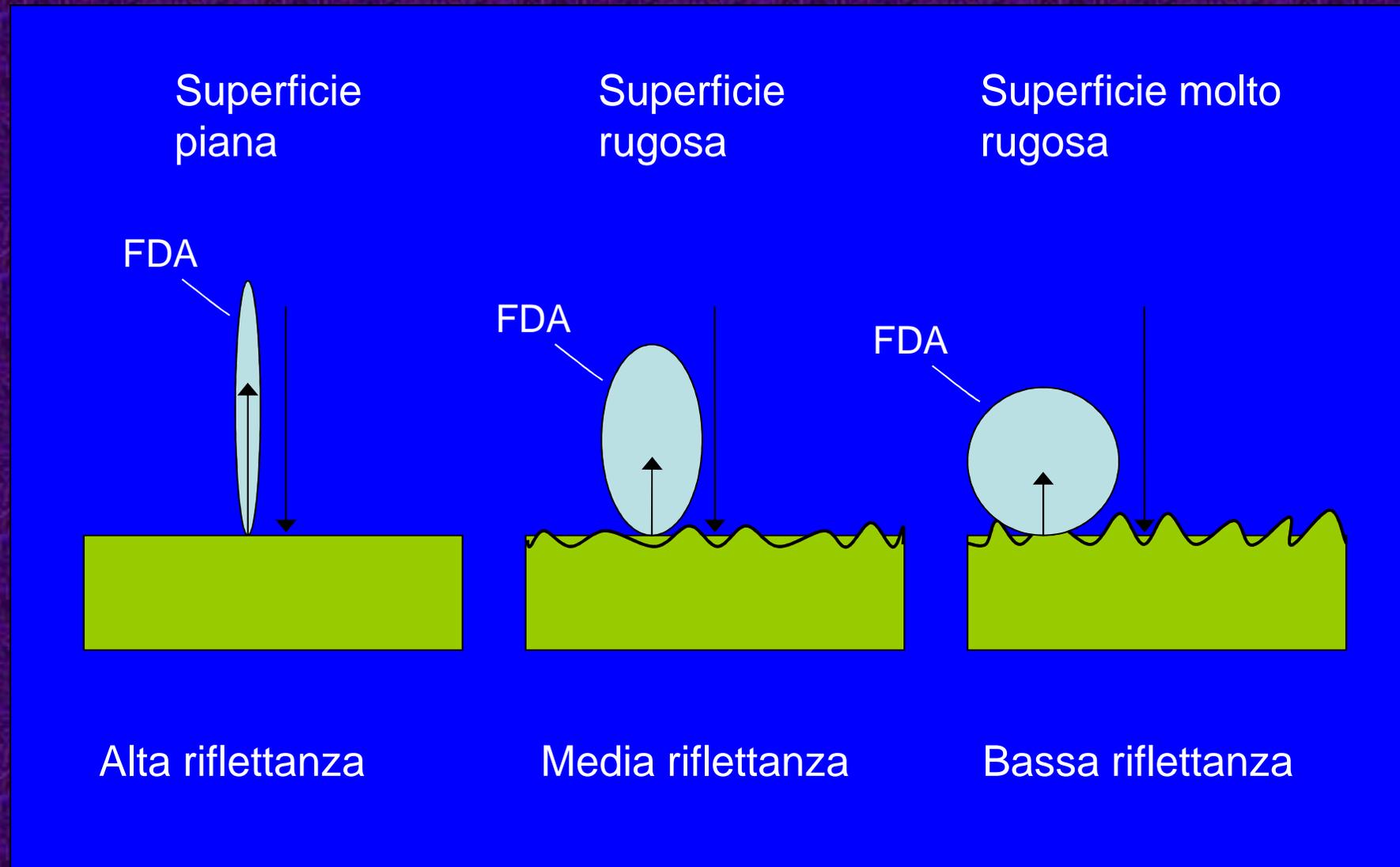
# Diffusione della luce



Nelle celle a struttura diretta la diffusione della luce all'interno della cella solare (FDA interna) è preclusa ad ogni osservazione. La fotocorrente ne riassume gli effetti. Esiste però una FDA esterna che si può analizzare.

Che informazione porta la  
Funzione di Distribuzione Angolare  
(FDA) di una cella testurizzata?

# Effetti Ottici della Testurizzazione



La rugosità della superficie influisce sia sulla riflettanza totale che sulla FDA

# Effetti Ottici della Testurizzazione

Se la rugosità della superficie (testurizzazione superficiale) riduce la riflettanza totale della cella aumentandone la capacità di assorbimento della luce e se, al contempo, aumenta la componente diffusa della riflettanza schiacciando la FDA sulla superficie testurizzata, allora ...

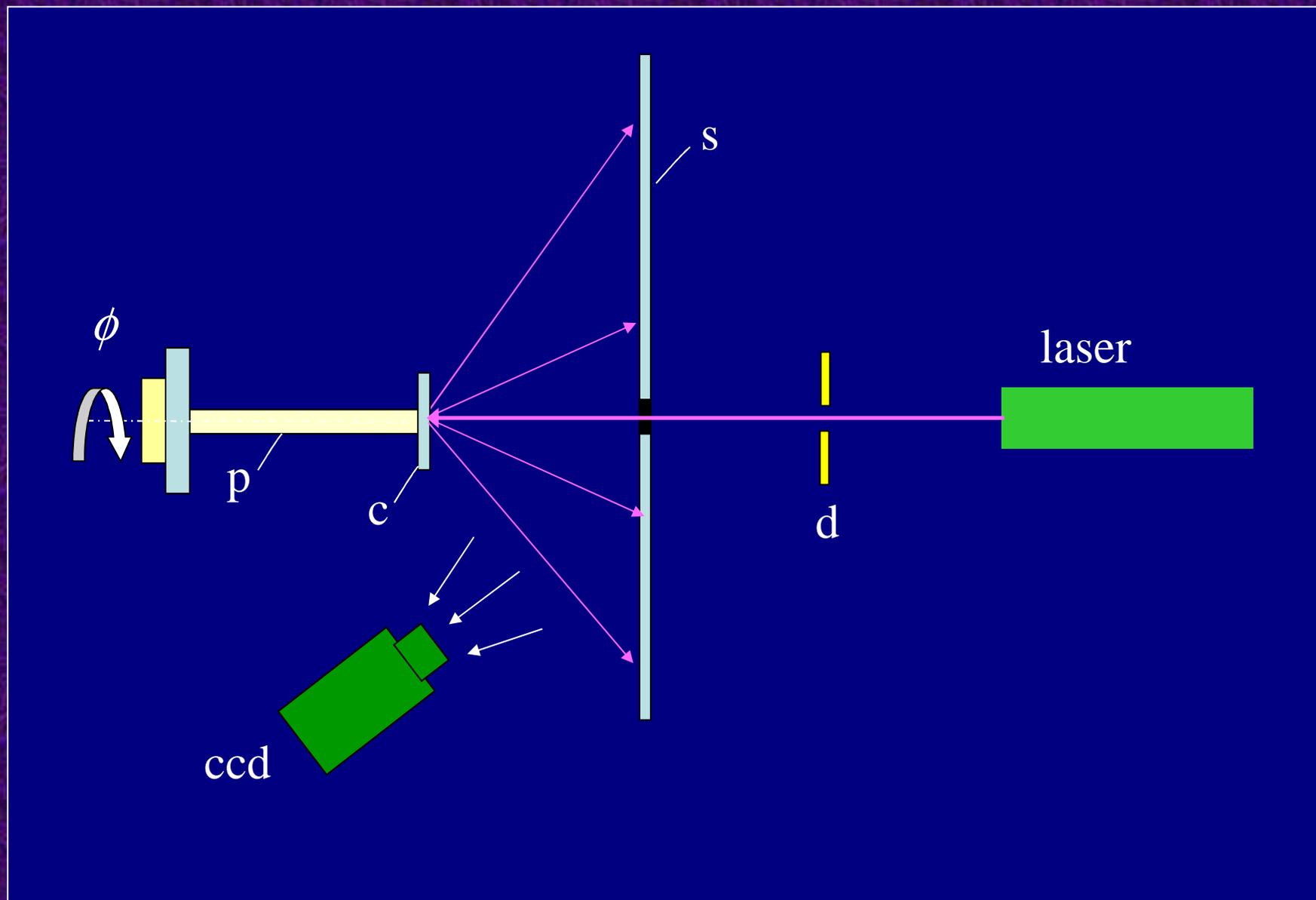
che relazione esiste, se esiste, tra:

- \* Assorbimento della luce
- \* Componente diffusa della riflettanza
- \* Forma della FDA

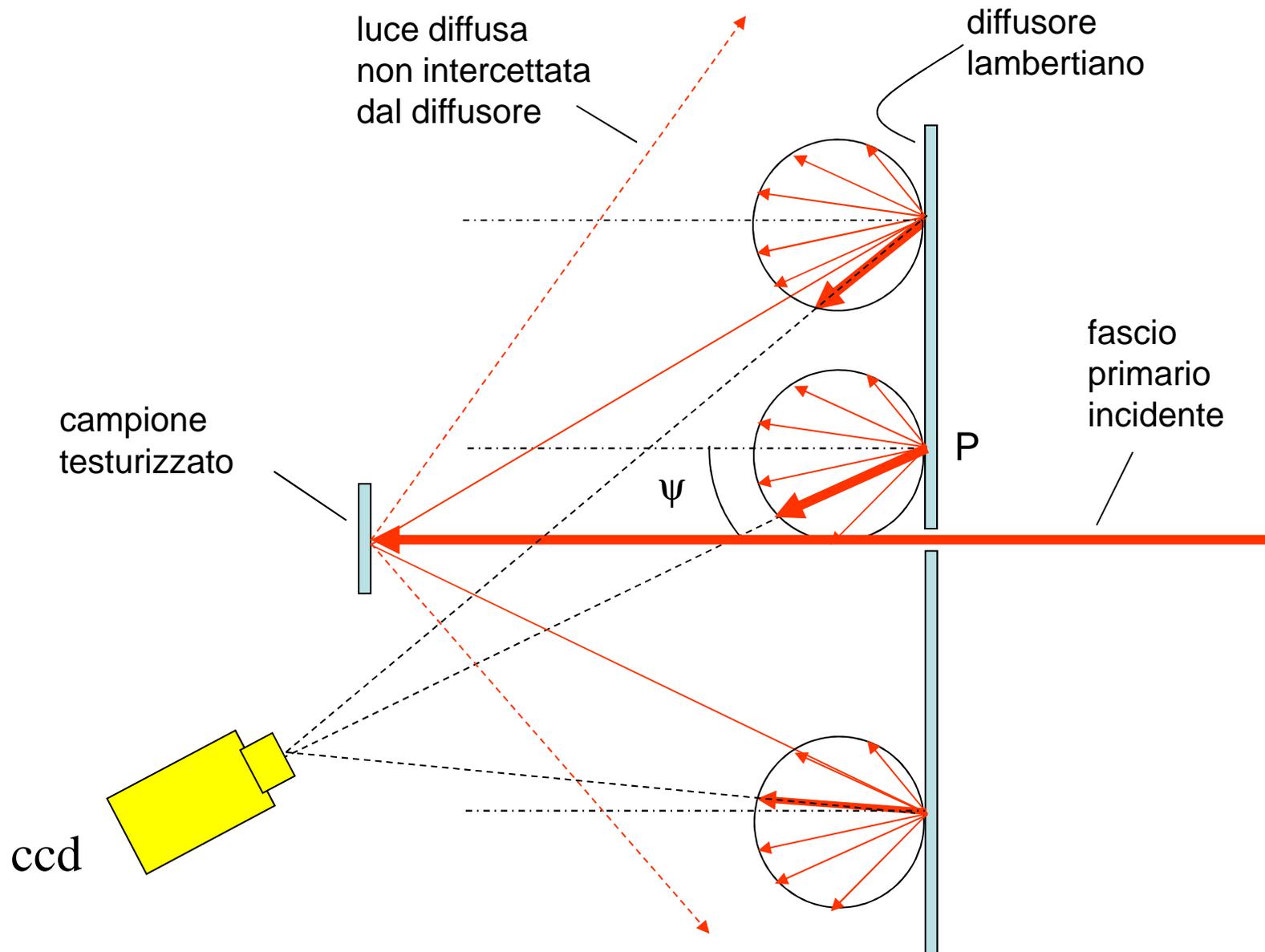
???

# Metodi per la misura della luce diffusa da celle solari testurizzate

# Scattering da Diffusore Lambertiano



# Scattering da Diffusore Lambertiano



# Scattering da Diffusore Lambertiano

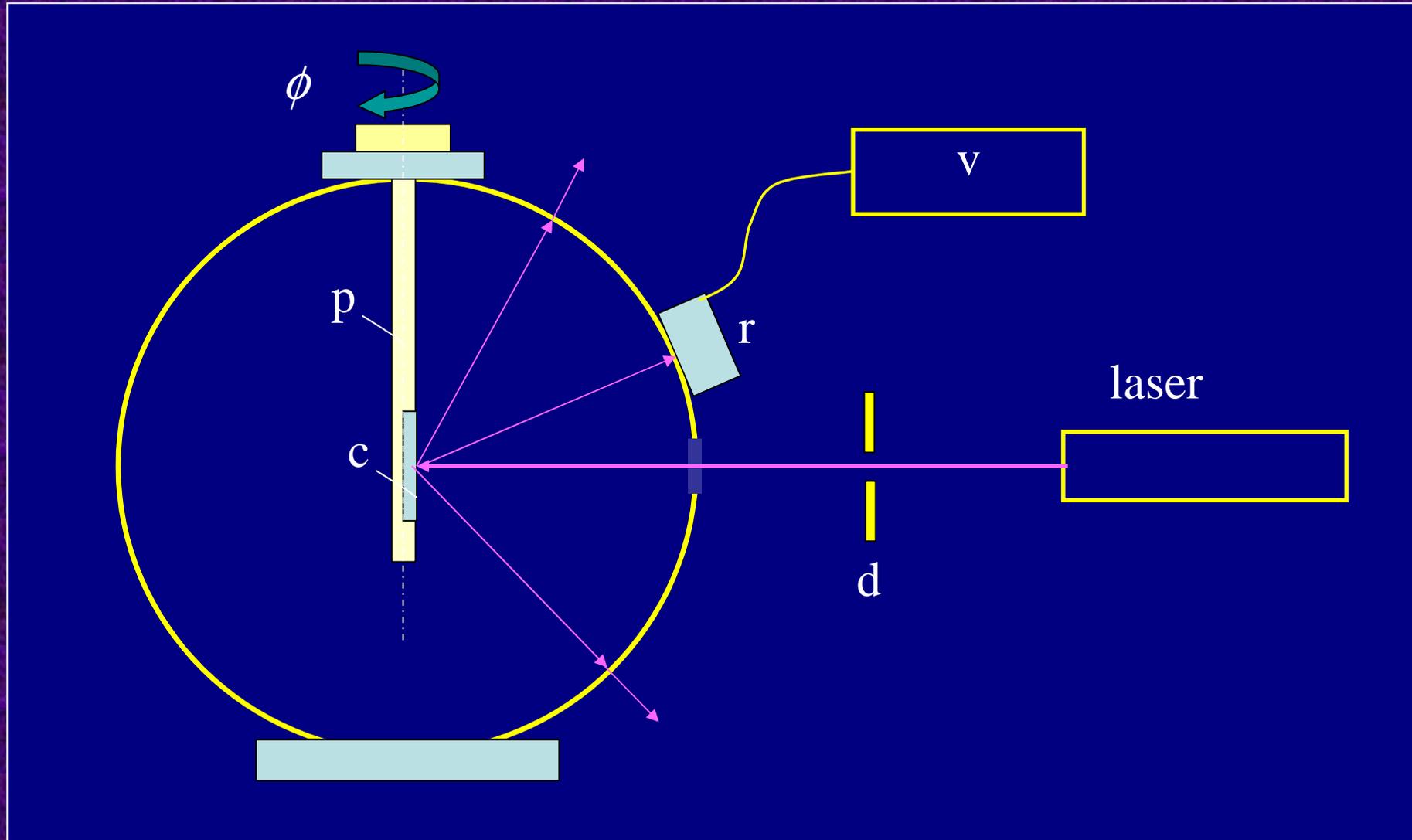
## Vantaggi:

Ogni punto  $P$  del diffusore riemette la luce incidente secondo una legge nota.  
Buona risoluzione di misura.

## Svantaggi:

Si può misurare bene la luce diffusa soltanto entro certi limiti dell'angolo di diffusione, perché il diffusore lambertiano non intercetta completamente il fascio diffuso.

# Sfera VISAGE (superficie trasparente)



Semplice apparato per la misura della luce diffusa da un campione testurizzato. Il fotorivelatore è mosso sulla superficie del globo.

# Sfera Visage (superficie trasparente)

## Vantaggi:

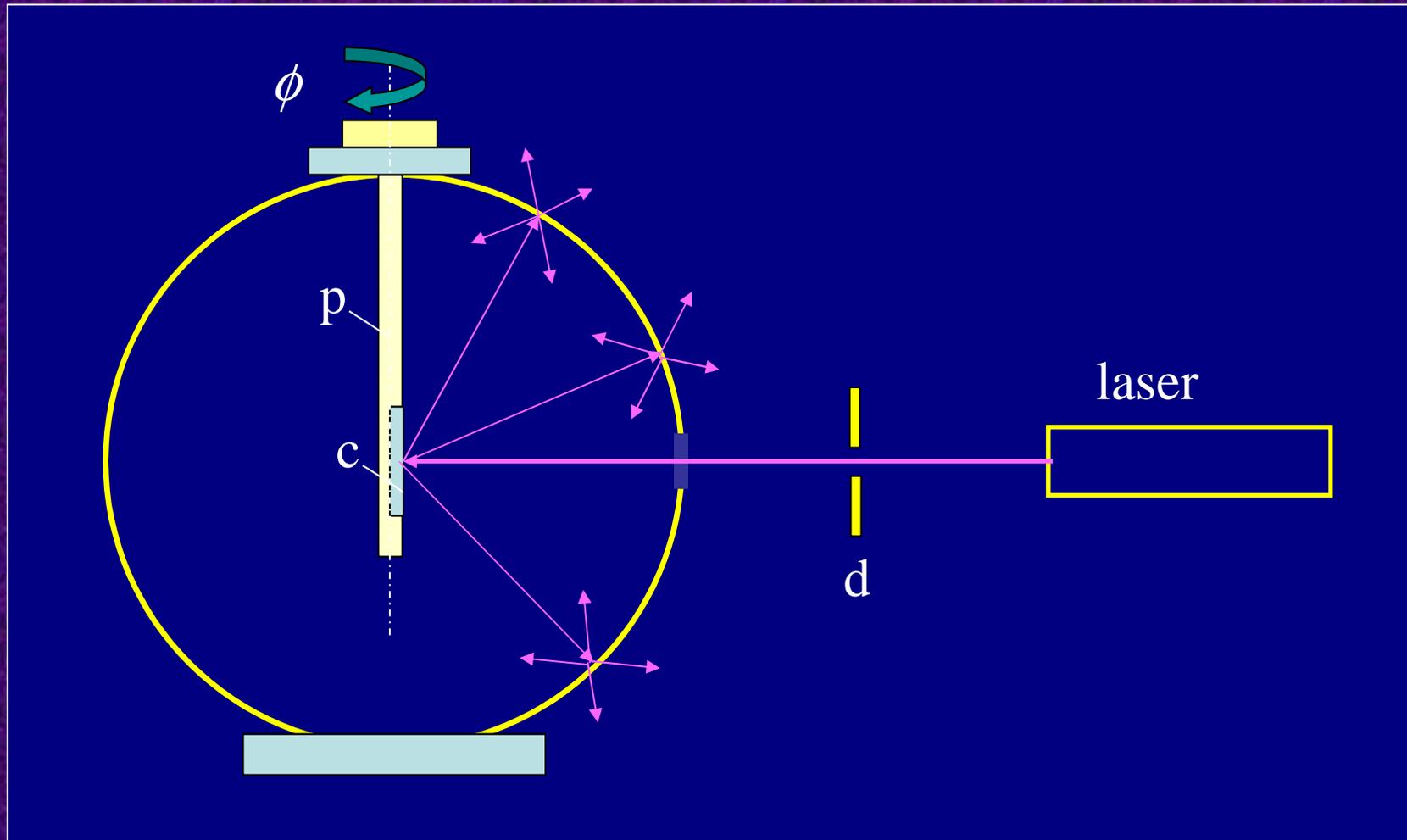
Si può misurare la luce diffusa a tutti gli angoli azimutali e zenitali.

## Svantaggi:

Bassa risoluzione di misura, a causa delle dimensioni del fotorivelatore.

La misura è molto lunga, soprattutto se si lavora con un fotorivelatore di piccole dimensioni per migliorare la risoluzione di misura.

# Sfera Visage (superficie opalescente)



Se il globo viene sabbiato internamente,  
è possibile visualizzare la luce diffusa dal campione.

# Sfera Visage (superficie opalescente)

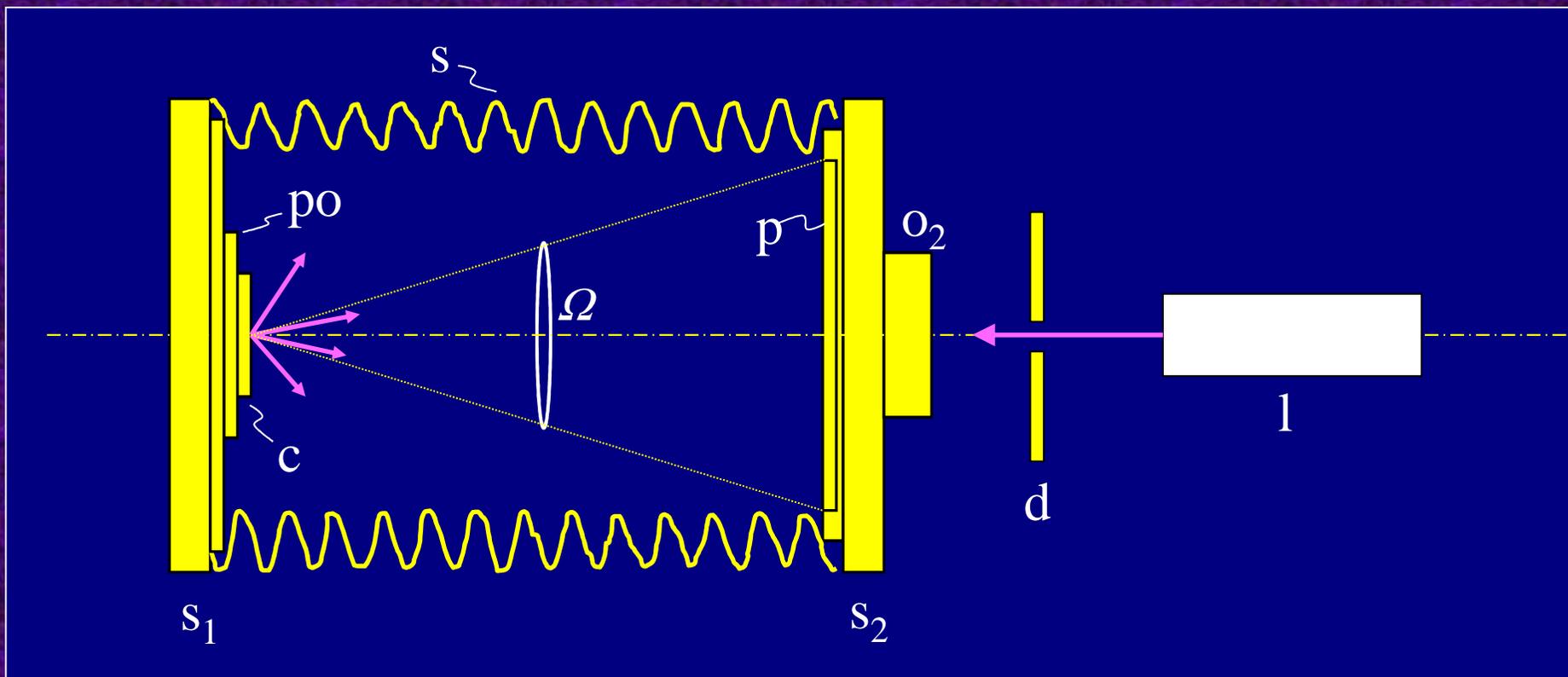
Vantaggi:

Si può osservare la luce diffusa a tutti gli angoli azimutali e zenitali.

Svantaggi:

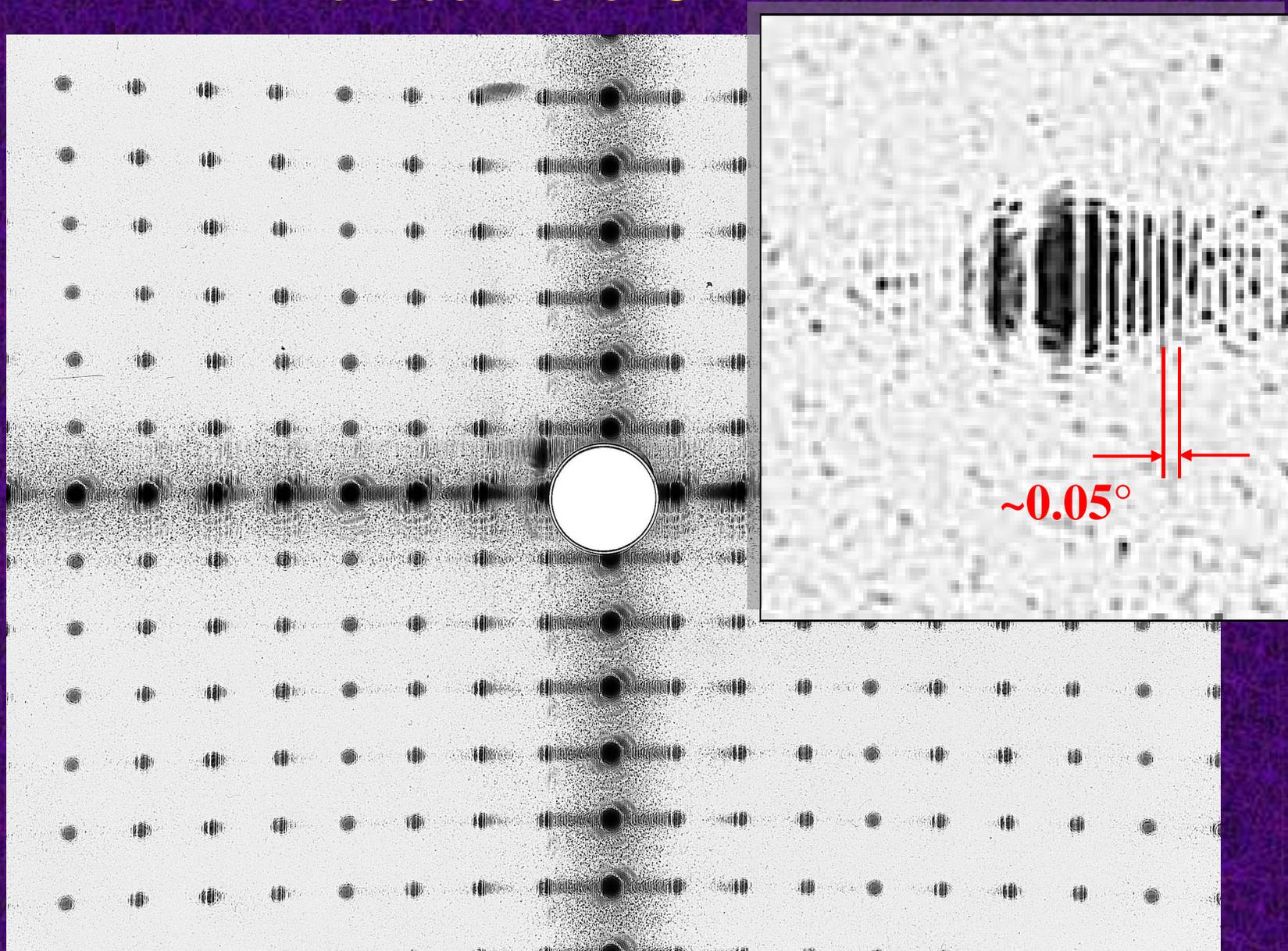
Si tratta solo di una visualizzazione; la FDA non viene registrata.

# Fotocamera CARDIFF



Schema della fotocamera CARDIFF a lastra piana, nella configurazione per misure in riflessione su piccoli campioni. La luce diffusa dal campione impressiona la lastra fotografica ( $p$ ).

# Fotocamera CARDIFF



Inverted pyramids texture

# Fotocamera CARDIFF

## Vantaggi:

Si può misurare la luce diffusa con grande risoluzione. Si possono mettere in evidenza i più minuti dettagli della FDA.

## Svantaggi:

La misura dell'intensità della luce diffusa si basa sulla misura del contrasto sulla pellicola. Il contrasto, particolarmente ad alti angoli, è affetto da parametri non noti (riflettanza angolare della pellicola).

Si può misurare la luce diffusa soltanto entro certi limiti dell'angolo zenitale di diffusione, perché la pellicola non intercetta completamente il fascio diffuso.

# Scatterometro BASALT

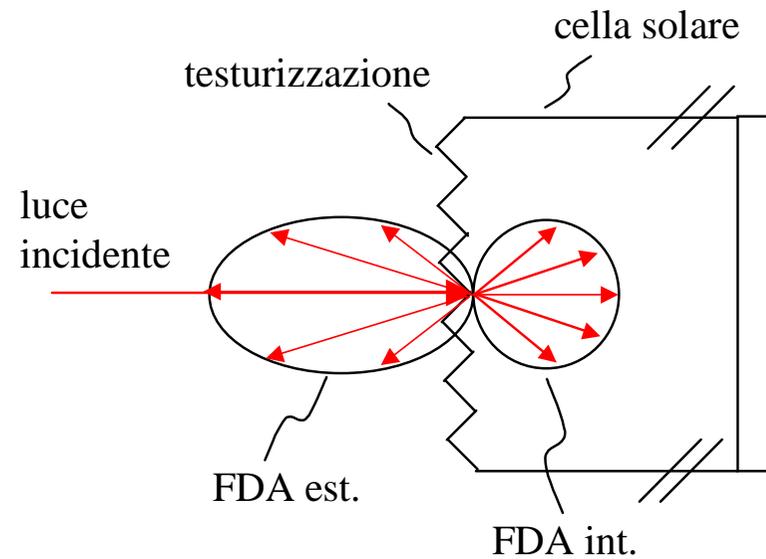
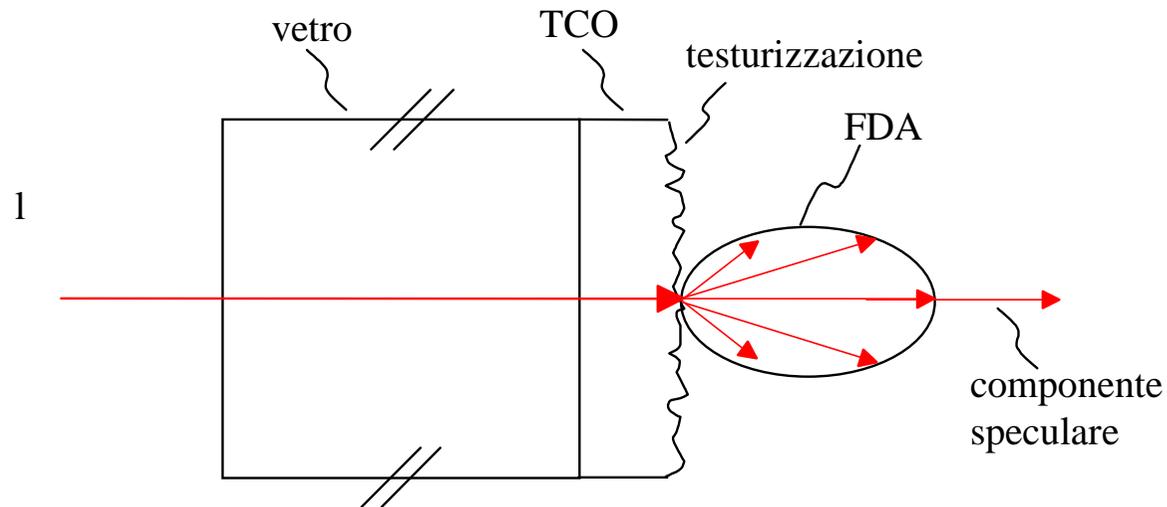
*(Backscattered Light Topographer)*

*A che cosa serve?*

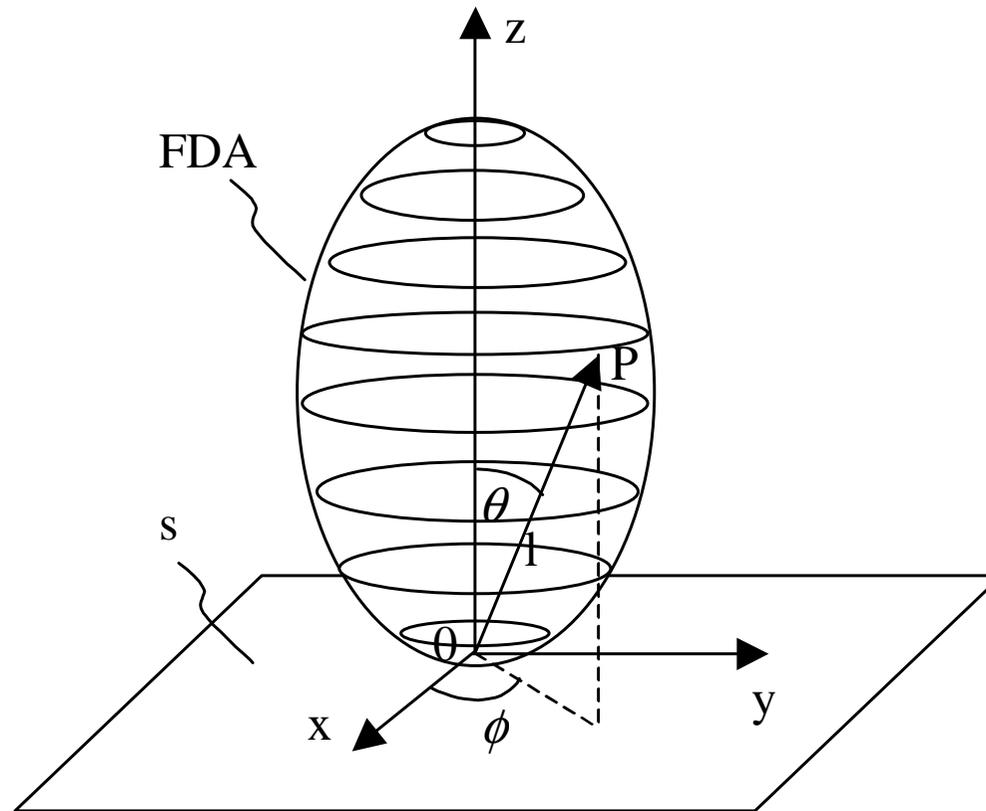
- \* Misura della luce retrodiffusa da un campione;
  - \* Misura su piccoli e grandi campioni.
- 
- \* Scopo delle misure BASALT è di trovare una correlazione tra le perdite ottiche totali di una superficie testurizzata e la Funzione di Distribuzione Angolare (FDA) della luce retrodiffusa.



# Funzione di Distribuzione Angolare (FDA)

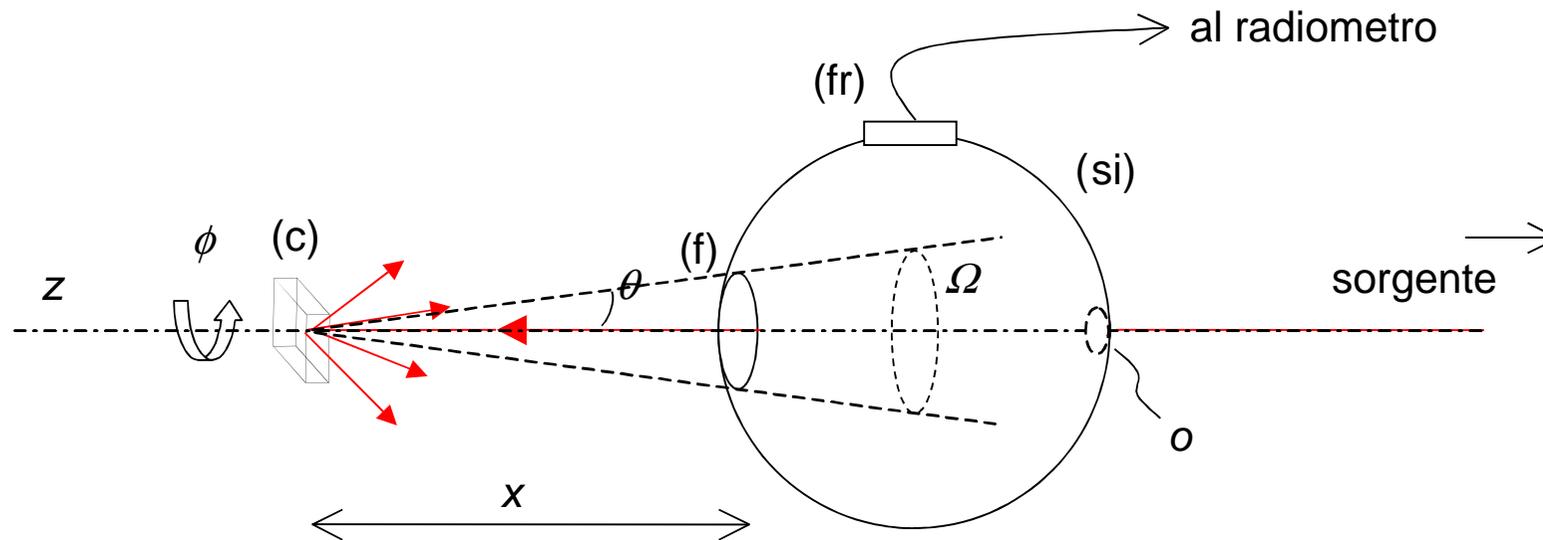


# Funzione di Distribuzione Angolare (FDA)



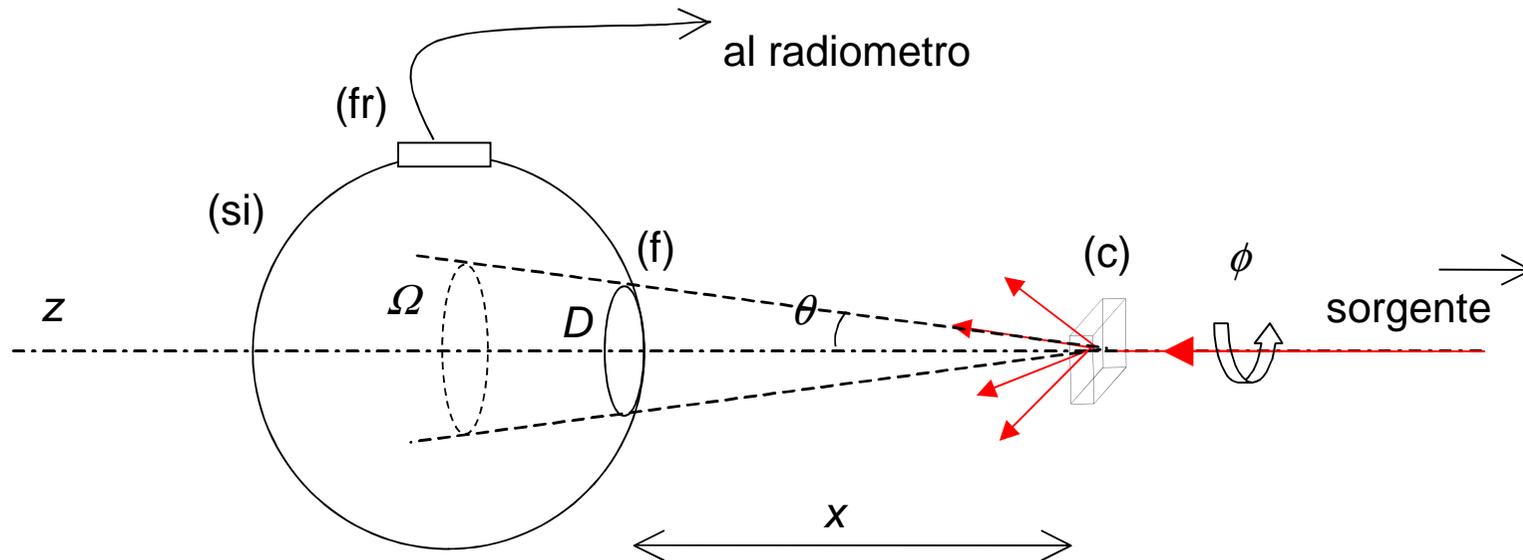
Esempio di funzione di distribuzione angolare (FDA), di una superficie (s) illuminata, isotropa rispetto all'asse z,

# Metodo BASALT (Riflessione)



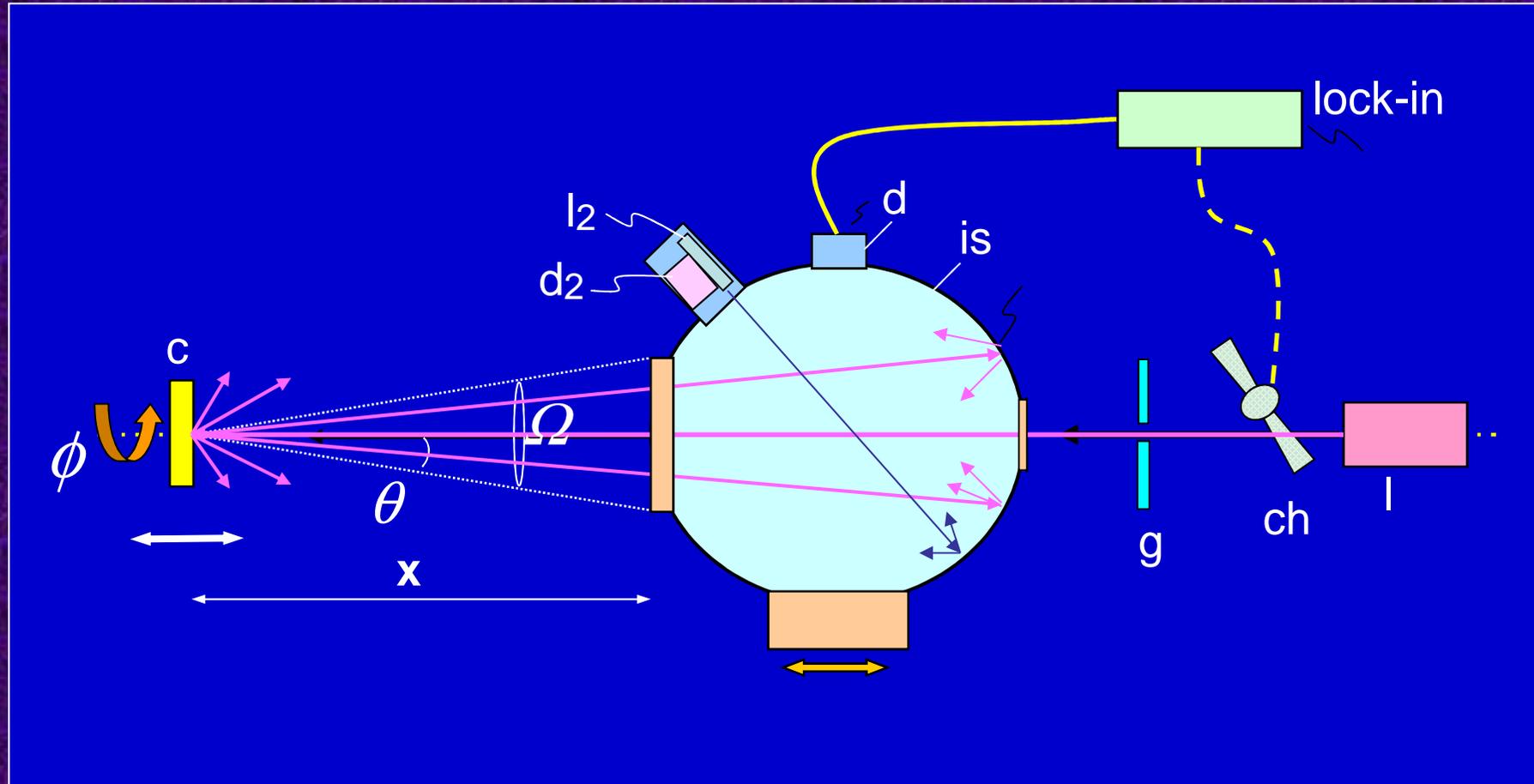
Schema della misura della luce diffusa da un campione illuminato, secondo il metodo basalt. Misura in riflessione.

# Metodo BASALT (Trasmissione)



Schema della misura della luce diffusa da un campione illuminato, secondo il metodo basalt. Misura in trasmissione.

# Scatterometro BASALT

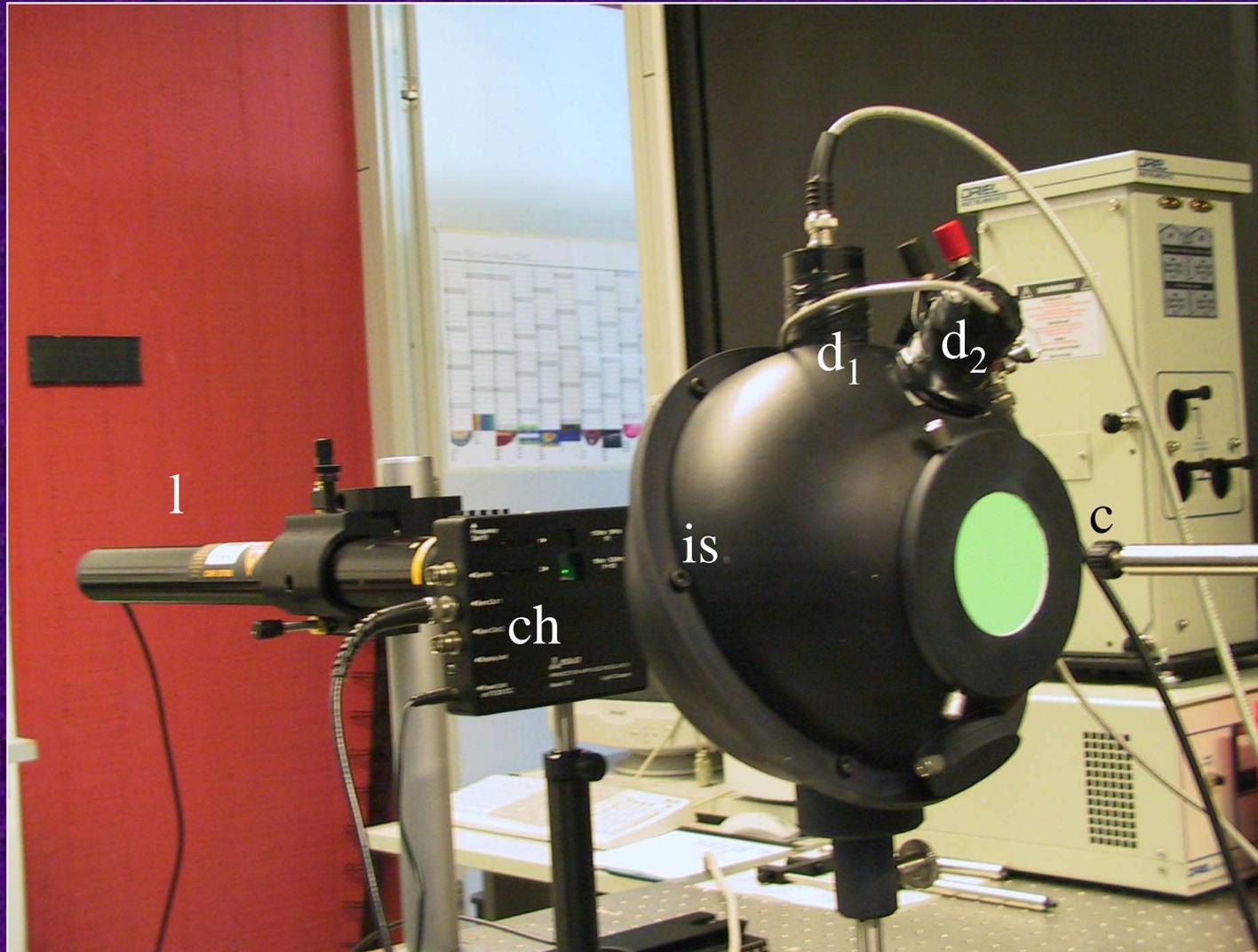


Misura della luce retrodiffusa dal campione e raccolta dalla sfera entro l'angolo solido  $\Omega$ , che varia con la distanza tra sfera e campione.

Differenziando, si ricava l'intensità della luce diffusa vs.  $\theta$ .

Studio del light trapping in campioni testurizzati (celle a concentrazione).

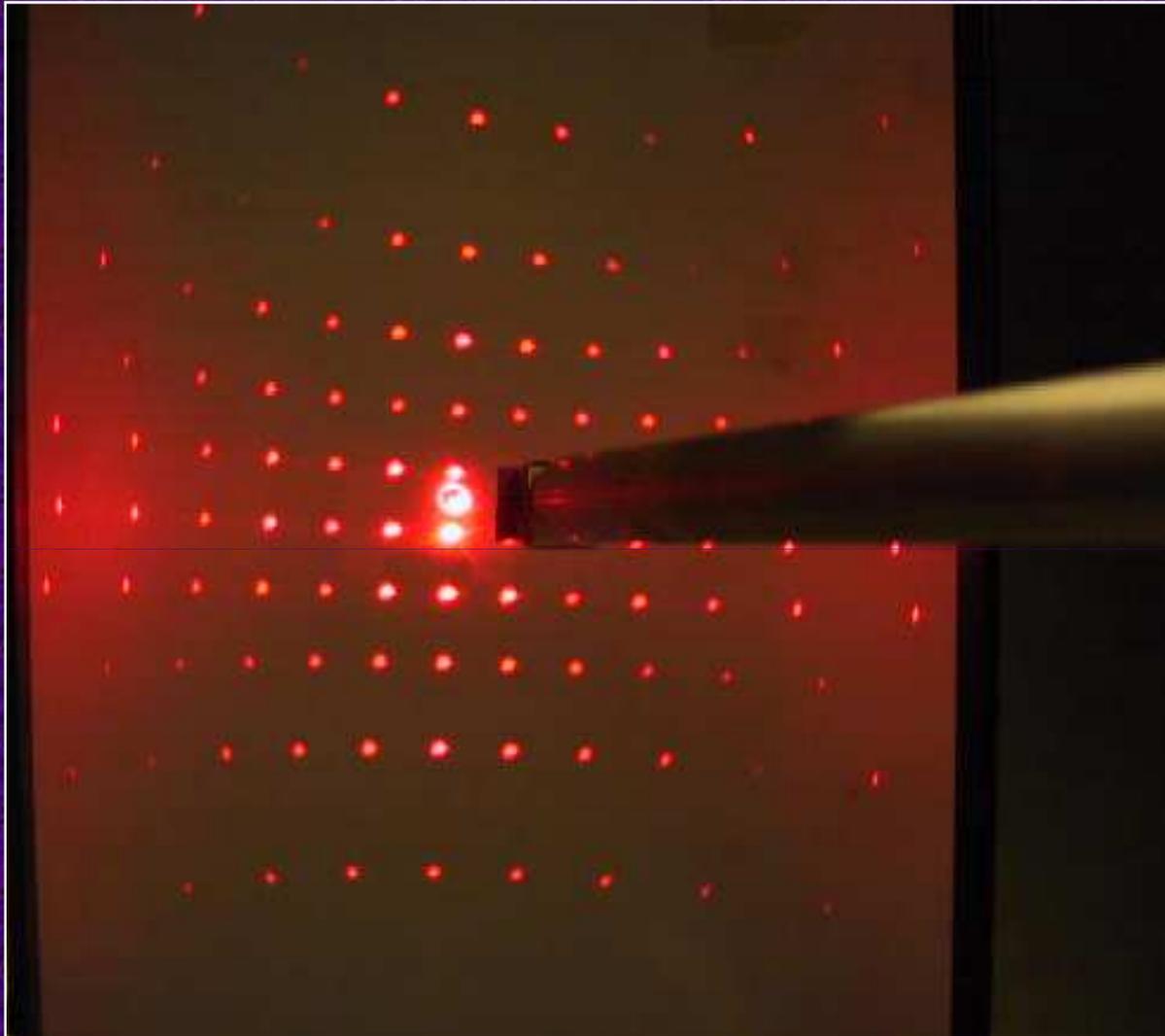
# Scatterometro BASALT



Elementi principali dell'apparato BASALT.

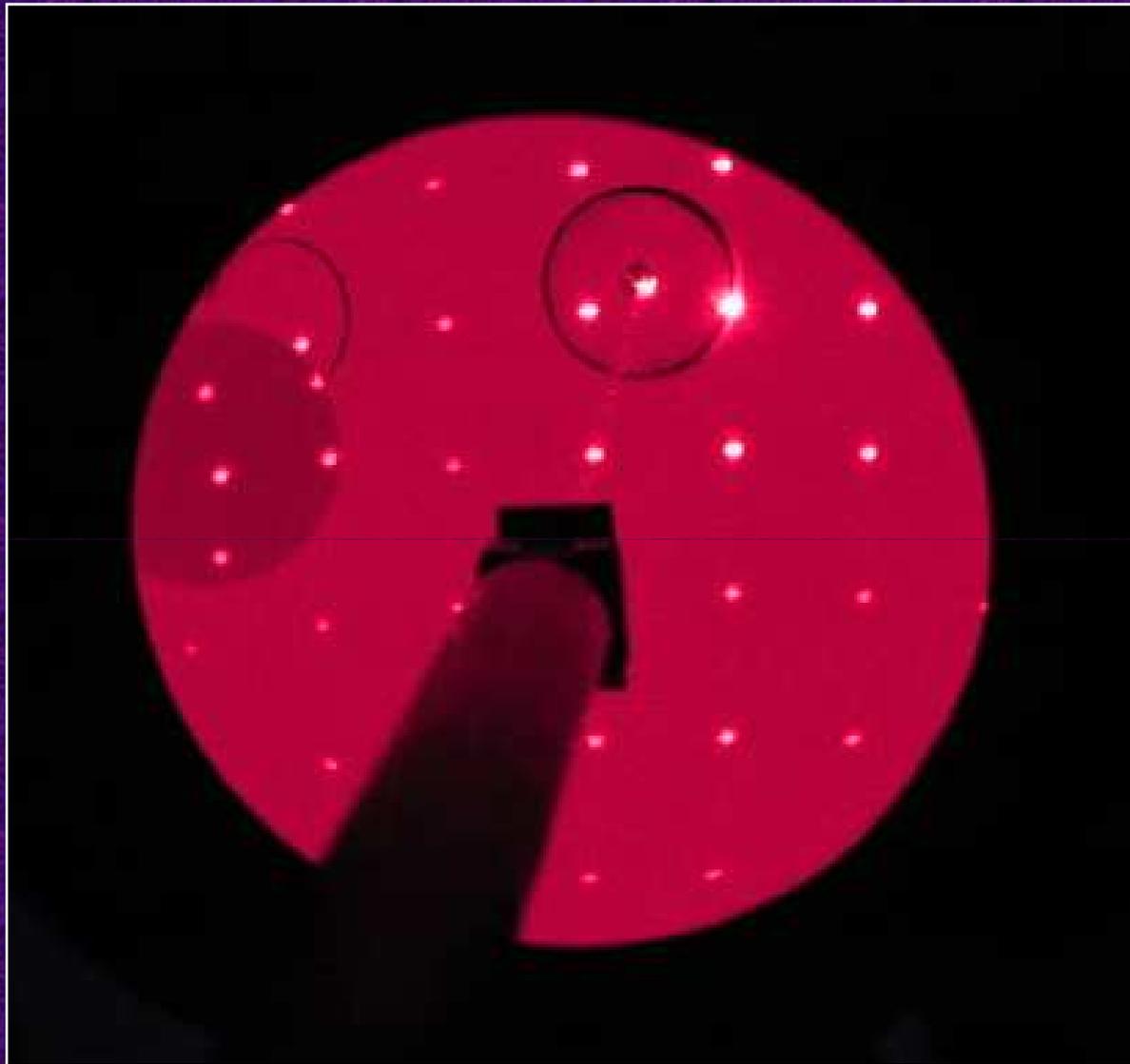


# Scatterometro BASALT



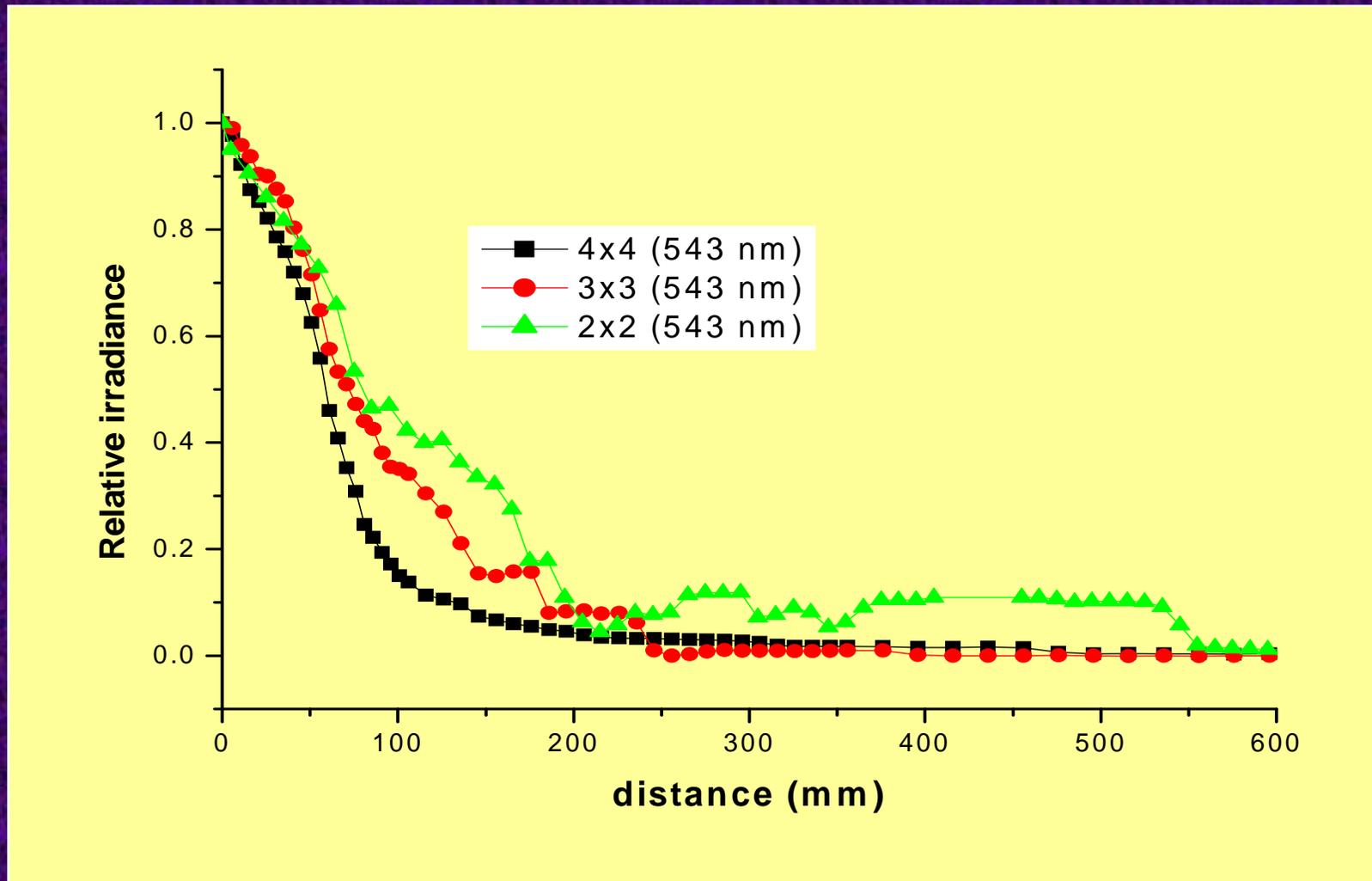
Light backscattered by the 2x2 textured silicon sample on a cylindrical screen. The intense light spots correspond to the maximum of diffraction produced by the regular square array of inverted pyramids, equivalent to a 2-D grating.

# Scatterometro BASALT

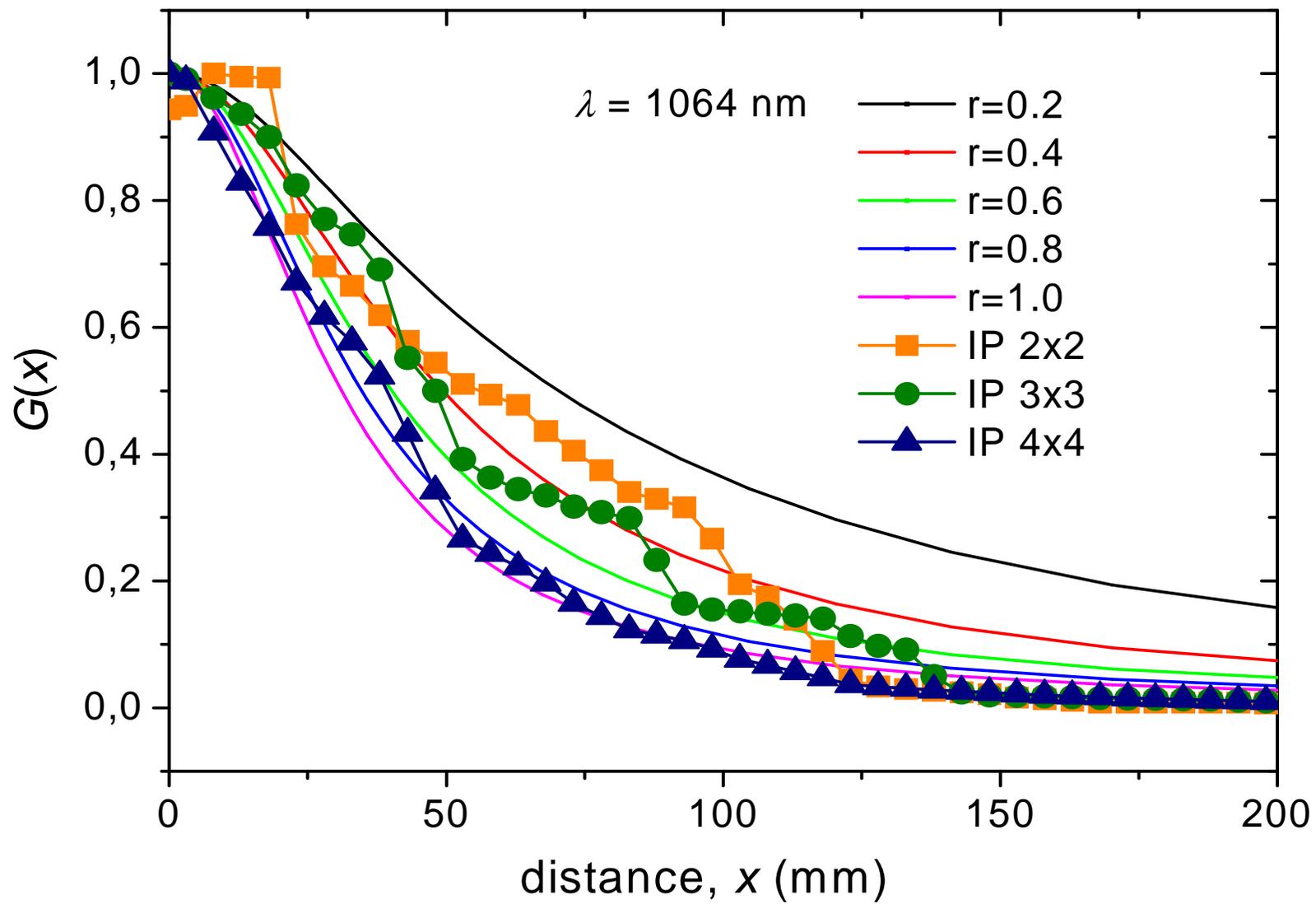


Photograph of the interior of integrating sphere under light backscattered by the 2x2 textured silicon sample

# Scatterometro BASALT



Light collected by the sphere at  $\lambda=543$  nm as function of sample-sphere distance. The curves resemble those modelled for the prolate ellipsoids. The descending steps in the curves correspond to the exit of light spot diffraction maxima from the sphere. Similar results are obtained at  $\lambda=633$  nm.



Descriviamo qui di seguito due metodi per il calcolo della FDA a partire dalle misure sperimentali del flusso radiante intercettato. Questi metodi si applicano indipendentemente dalle dimensioni del campione.

Il primo metodo descritto consente di ricavare la forma precisa della FDA, mediata rispetto all'angolo  $\phi$ , ma richiede una particolare attenzione nell'elaborazione dei dati sperimentali.

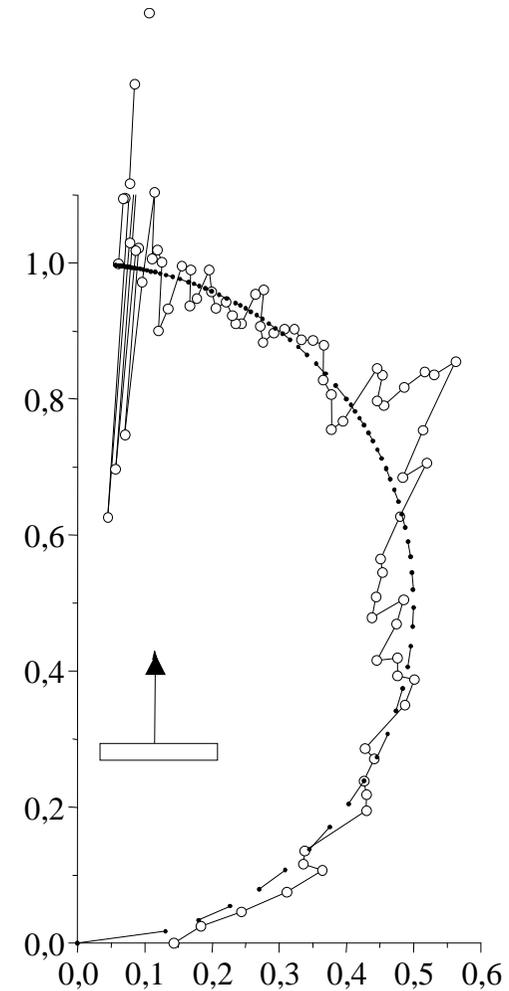
Chiamando con  $\Phi_{in}(\theta)$  il flusso integrale della luce raccolta dalla sfera entro l'angolo solido  $\Omega(\theta)$  e  $I(\theta, \phi)$  l'intensità della luce diffusa verso la direzione di osservazione  $(\theta, \phi)$ , allora  $\Phi_{in}(\theta)$  si può esprimere come:

$$\Phi_{in}(\theta) = \int_{\phi=0}^{2\pi} d\phi \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha, \phi) \quad (1)$$

L'intensità media della luce diffusa ad angolo  $\theta$ , si ottiene differenziando  $\Phi_{in}(\theta)$ :

$$\bar{I}(\theta) = \frac{1}{2\pi \sin \theta} \cdot \frac{d}{d\theta} \Phi_{in}(\theta) \quad (2)$$

L'intensità ricavata dall'Eq. (2) è di solito accompagnata da molto rumore a causa della natura discreta dei dati. Un esempio è riportato in figura per un diffusore di tipo lambertiano.



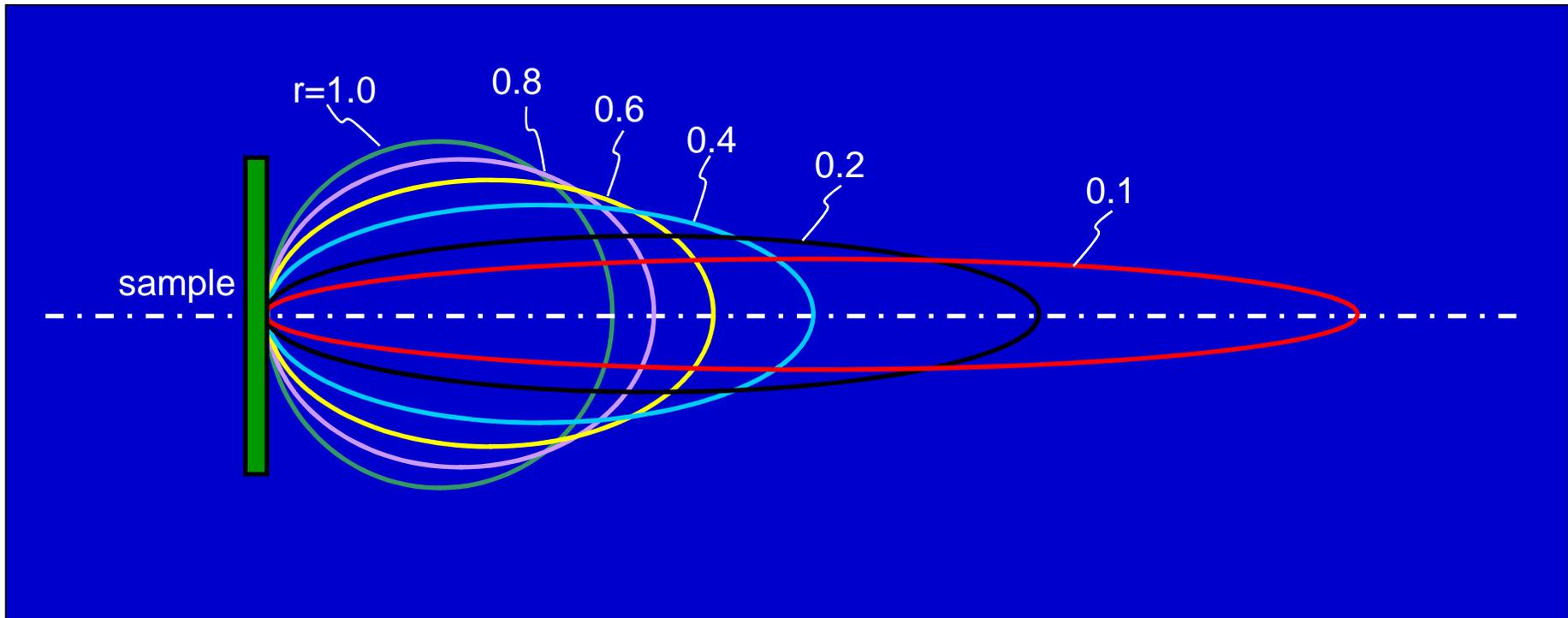
Questo problema può essere superato adottando una tra le tante modalità di interpolazione dei dati o di filtraggio della funzione , prima di procedere al calcolo del differenziale, facendo attenzione a non alterare significativamente l'andamento dei dati sperimentali.

Il secondo metodo è più semplice, ma comporta un certo grado di approssimazione dei risultati. L'approssimazione consiste nell'assegnare alla FDA del campione la forma di un ellissoide di rivoluzione, caratterizzato da un semiasse trasversale  $a$ , e da un semiasse longitudinale  $c$ , orientati rispetto all'asse ottico  $z$ . Il rapporto  $ff = a/c$  sarà chiamato fattore di forma (aspect ratio) e sarà  $ff < 1$  per ellipsoidi prolati,  $ff > 1$  per ellipsoidi oblatti e  $ff = 1$  per una sfera, caratteristica di un diffusore ideale (lambertiano).

Il metodo dell'ellissoide si adatta bene a campioni nei quali la luce sia distribuita più o meno omogeneamente nell'emisfero frontale, anche se sotto forma di spot, nel senso che permette di riprodurre con buona approssimazione la FDA media del campione.

Nel caso invece di campioni nei quali siano presenti forti riflessioni verso particolari direzioni, il metodo o modello ellissoidale proposto diventa indispensabile per ottenere in tempi ragionevoli un'informazione sulla FDA, e quindi l'unica alternativa pratica a laboriosissime misure di tipo angolare.

La figura mostra alcune FDA calcolate, espresse dalla funzione  $I(\theta, \phi)$ , di forma ellissoidale prolata, proiettate su un piano ortogonale all'asse z.



L'equazione dell'ellissoide di rivoluzione in coordinate cartesiane diventa:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{(z - c)^2}{c^2} = 1 \quad (3)$$

L'intensità della luce diffusa  $I(\theta, \phi)$  è espressa dalla lunghezza del vettore  $r=OP$ :

$$I(\theta, \phi) = I(\theta) = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \frac{2a^2 c \cdot \cos \theta}{a^2 \cdot \cos^2 \theta + c^2 \cdot \sin^2 \theta} \quad (4)$$

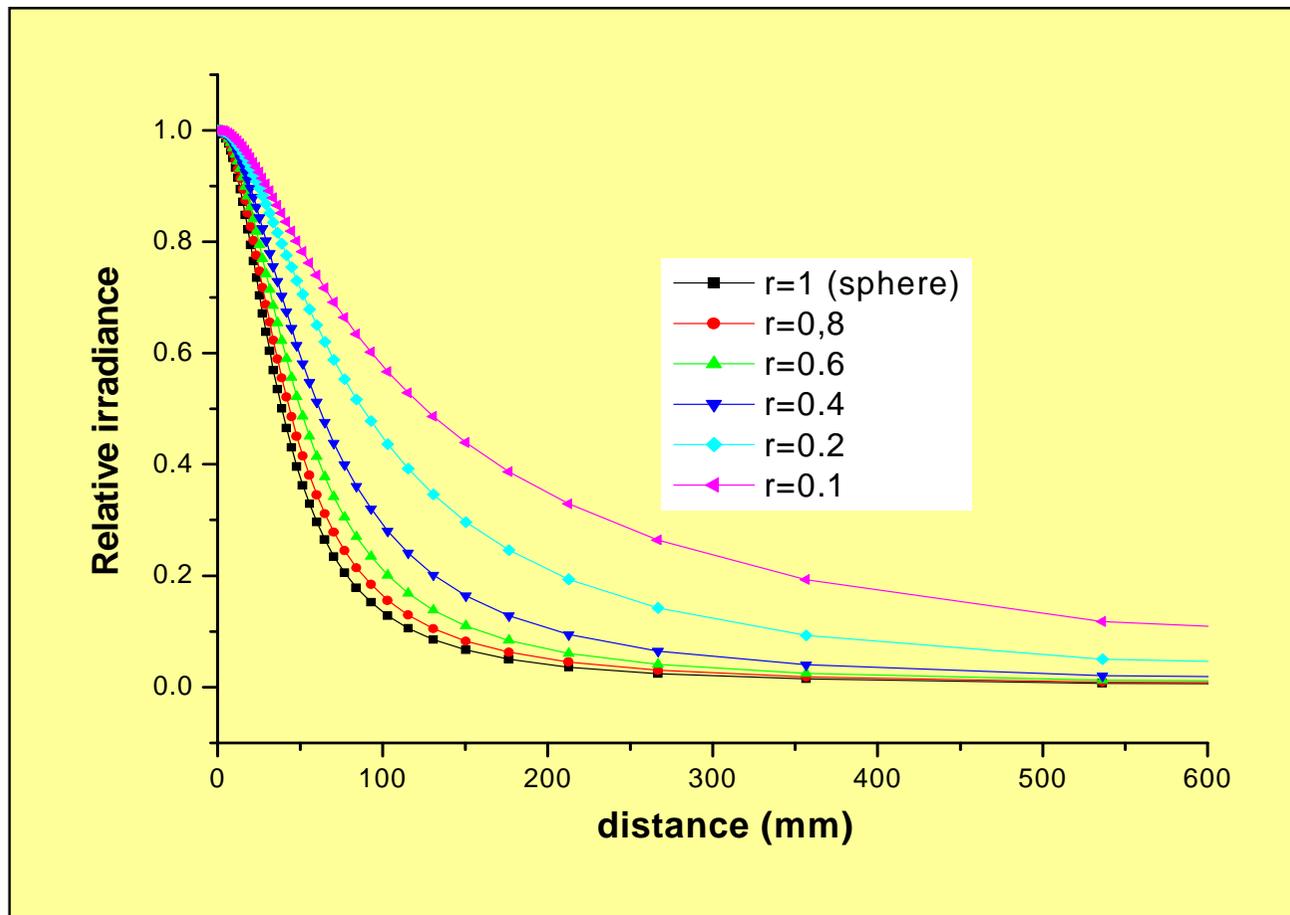
L'integrale della (4) fornisce il flusso luminoso raccolto dalla sfera entro l'angolo  $\theta$ ,  $G(\theta)$ :

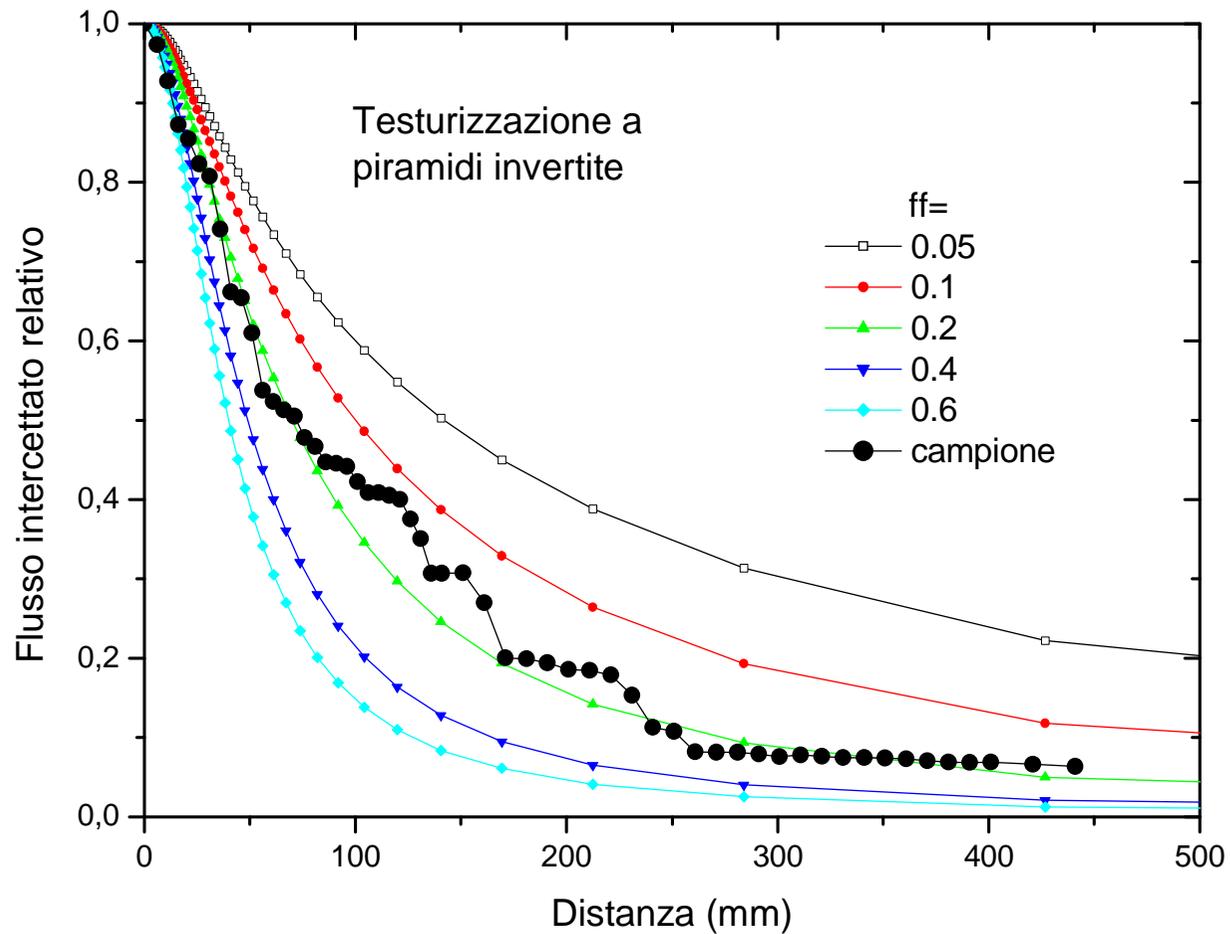
$$\Phi_{in}(\theta) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} d\varphi \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha) = 2\pi \cdot \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot \frac{2a^2 c \cdot \cos \alpha}{a^2 \cdot \cos^2 \alpha + c^2 \cdot \sin^2 \alpha} \quad (5a)$$

che deve essere normalizzata in corrispondenza di  $\theta=\pi/2$  per avere lo stesso valore unitario indipendentemente dal valore del fattore di forma  $ff$ , ponendo:

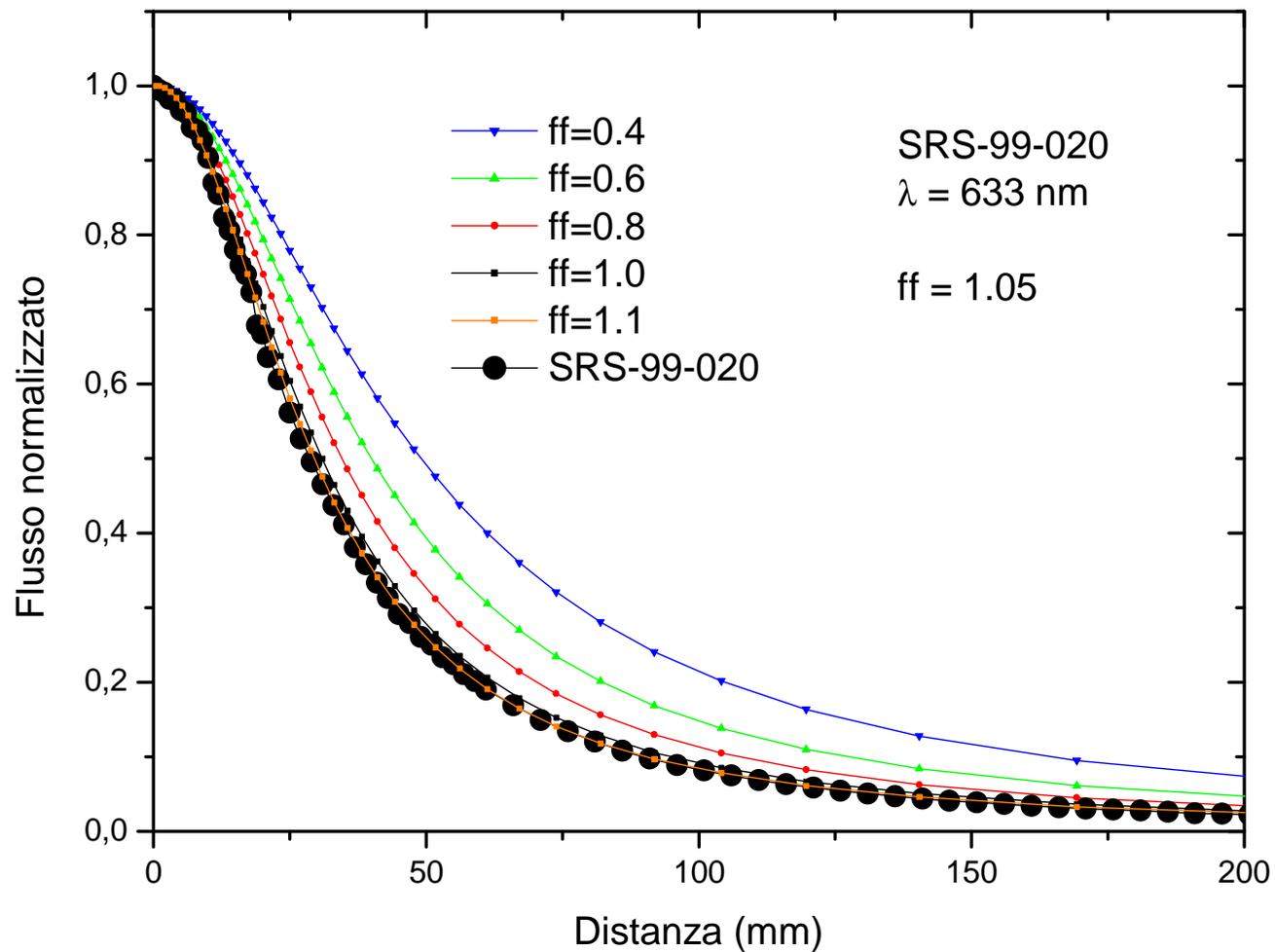
$$\Phi_{in}(\theta) = \frac{2\pi \cdot \int_{\alpha=0}^{\theta} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha)}{2\pi \cdot \int_{\alpha=0}^{\pi/2} d\alpha \cdot \sin \alpha \cdot I(\alpha)} \quad (5b)$$

L'intensità integrale può essere più semplicemente espressa in funzione della distanza  $x$  tra finestra della sfera e campione, ponendo  $x = D / 2 \operatorname{tg}\theta$ . Le intensità integrate  $\Phi_{in}(x)$  calcolate per alcuni ellissoidi prolati in funzione della distanza  $x$ , per un diametro  $D = 60$  mm, sono riportate in figura.





Flusso relativo  $\Phi_{in}(x)$  intercettato dalla sfera, espresso in funzione della distanza campione-sfera, per un campione testurizzato con piramidi inverse, confrontato con le curve teoriche di  $\Phi_{in}(x)$  calcolate per alcuni valori del fattore di forma di ellissoidi prolatti.

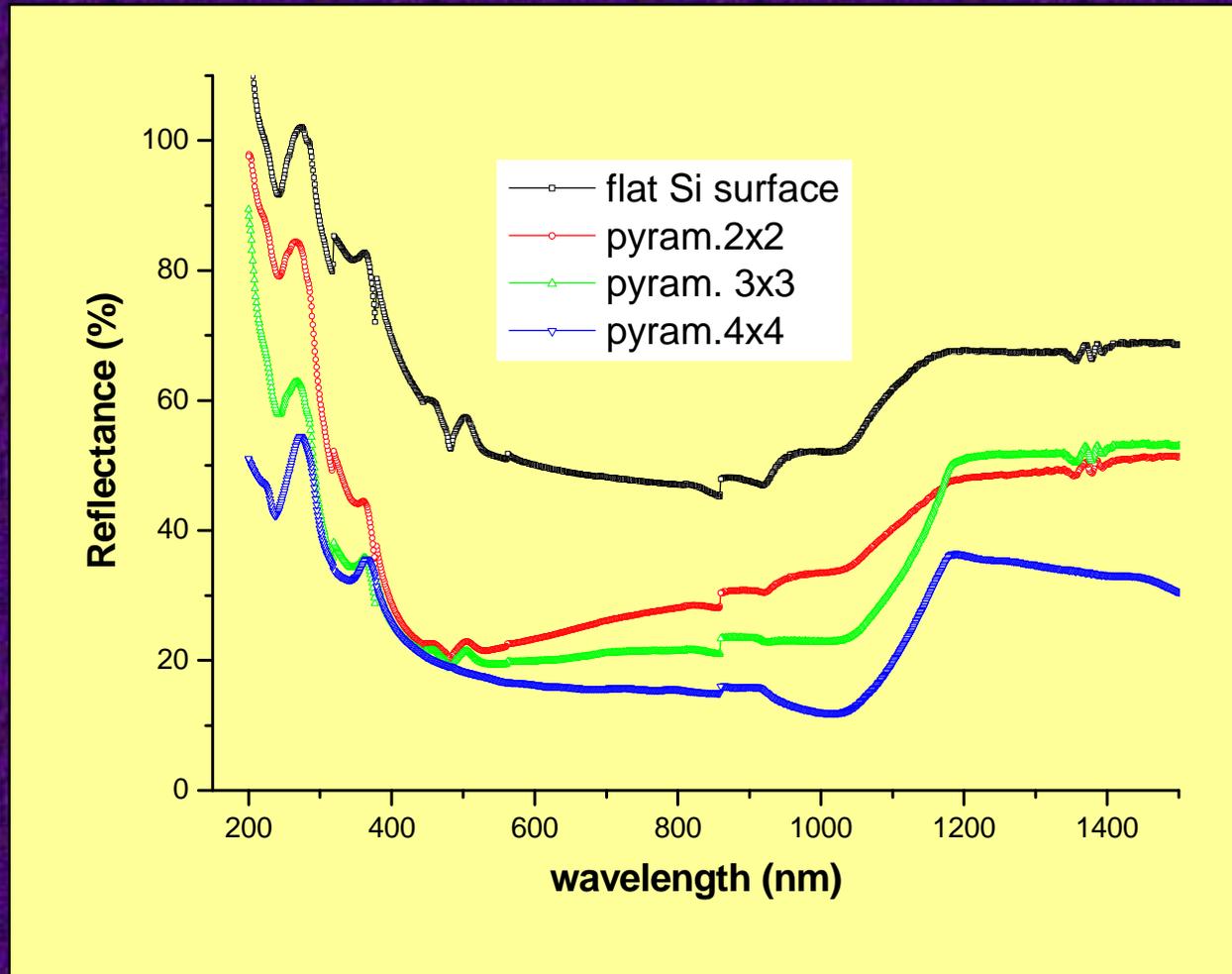


Flusso normalizzato del campione Labsphere SRS-99-020, confrontato con quello calcolato per alcuni tipi di ellissoidi di rivoluzione. Il fattore di forma risulta  $ff = a/c = 1.05$ , corrispondente ad un ellissoide lievemente oblato.





# SCATTEROMETRO BASALT



Total hemispherical reflectance at  $8^\circ$  incidence as measured at the Lambda 900 Perkin Elmer spectrophotometer. The range of wavelengths suitable for defining a correlation between total reflectance and aspect ratio of backscattered light should be moved towards values  $> 600$  nm, where the textured samples show a higher difference in reflectance.

# SINTESI PIRAMIDI INVERSE

