

Polarizzazione della luce e lamina polaroid

Francesco Alessandro Angiulli, Arianna Grossi, Francesco Zanni

SCOPO DELL'ESPERIENZA

- Determinare il valore dell'angolo di Brewster per due differenti materiali, vetro e plastica.
- Ricavare da esso l'indice di rifrazione del materiale in esame, da confrontare con il valore ottenuto tramite l'applicazione delle leggi di Snell.

APPARATO SPERIMENTALE

La strumentazione necessaria per svolgere l'esperimento consiste in:

- Una lamina polaroid, ad esempio il filtro Polaroid della macchina fotografica;
- Lamine trasparenti di due differenti materiali, vetro e plastica, di cui però non si conosce il tipo specifico;
- Sorgente di luce LASER;
- Sorgente di luce bianca per determinare l'asse di trasmissione del polaroid;
- Appositi supporti per laser, lamina Polaroid e lamina del materiale in esame: in particolare come supporto della lamina si è scelto un oggetto ruotabile di forma cilindrica, in modo da poter ruotare la lamina e variare l'angolo di incidenza della radiazione in modo controllato.

CENNI TEORICI

Per poter compiere questa esperienza è necessario conoscere il fenomeno di polarizzazione di una radiazione, in particolare la polarizzazione per riflessione, e le proprietà di un particolare tipo di lamine, i polaroidi.

Polarizzazione di una radiazione:

Con polarizzazione di una radiazione elettromagnetica si indica una caratteristica delle onde tale per cui la direzione di oscillazione del vettore campo elettrico durante la propagazione dell'onda varia seguendo una legge ben precisa, che dipende dal tipo di polarizzazione considerato.

Per distinguere i vari tipi di polarizzazione bisogna considerare il fatto che un'onda piana può essere scritta come la somma di due onde polarizzate linearmente lungo le due direzioni ortogonali alla direzione di propagazione. Assumendo per comodità che l'onda si propaghi lungo \hat{z} , il vettore campo elettrico \vec{E} può essere scritto come somma vettoriale delle due componenti:

$$\begin{cases} \vec{E}_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \hat{x} \\ \vec{E}_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \hat{y} \end{cases}$$

A seconda dei valori relativi delle costanti di fase φ_y e φ_x e del rapporto fra le ampiezze E_{0x} e E_{0y} si hanno diversi tipi di polarizzazione:

-*Polarizzazione lineare:* $\varphi_x = \varphi_y \pm \pi \rightarrow$ il vettore campo elettrico \vec{E} oscilla lungo la stessa direzione durante la propagazione spatio-temporale dell'onda, individuata da una retta giacente nel piano (x,y) , ortogonale alla direzione di propagazione \hat{z} .

-*Polarizzazione ellittica:* $\varphi_x = \varphi_y \pm \frac{\pi}{2} \rightarrow$ il vettore campo elettrico ruota nel piano ortogonale alla direzione di propagazione descrivendo una ellisse.

-*Polarizzazione circolare*: $\varphi_x = \varphi_y \pm \frac{\pi}{2}$ e $E_{0x} = E_{0y} \rightarrow$ il vettore campo elettrico ruota nel piano ortogonale alla direzione di propagazione descrivendo una circonferenza.

Al contrario, una radiazione si dice non polarizzata quando il vettore campo elettrico è orientato in modo casuale nel piano (x,y) senza seguire nessuna legge. Un esempio di radiazione non polarizzata è la luce solare, anche se andrebbe precisato che, entrando in atmosfera, la radiazione solare subisce diffusione dalle particelle che la compongono. Questo fenomeno induce una parziale polarizzazione della radiazione lungo le direzioni perpendicolari alla congiungente il Sole con il punto sulla Terra in cui si trova l'osservatore.

Polarizzazione per riflessione:

Per polarizzare una radiazione esistono diversi metodi, ma quello su cui si basa la nostra esperienza è la **polarizzazione per riflessione**.

Se consideriamo un fascio di luce non polarizzata che incida sulla superficie di separazione fra due mezzi, esso può essere scritto in termini delle due componenti del campo elettrico, una con direzione perpendicolare l'altra parallela al piano di incidenza, essendo entrambe perpendicolari alla direzione di propagazione poiché le onde elettromagnetiche sono trasversali.

Quando l'onda completamente non polarizzata incide con un angolo pari all'*angolo di Brewster*, tale per cui l'angolo tra raggio rifratto e riflesso è $\frac{\pi}{2}$, il raggio riflesso risulta essere completamente polarizzato linearmente, con vettore campo elettrico diretto perpendicolarmente al piano di incidenza. Inoltre, il raggio rifratto risulta parzialmente polarizzato.

Applicando la legge di Snell e tenendo in considerazione la condizione per ottenere l'angolo di Brewster, si può ricavare l'indice di rifrazione n_2 del mezzo su cui la radiazione incide

$$\begin{cases} n_1 \sin(\theta_p) = n_2 \sin(\theta_r) \\ \theta_r + \theta_p + \frac{\pi}{2} = \pi \rightarrow \theta_r = \frac{\pi}{2} - \theta_p \end{cases}$$

$$\rightarrow n_1 \sin(\theta_p) = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_p\right) = n_2 \cos(\theta_p) \rightarrow \tan(\theta_p) = \frac{n_2}{n_1}$$

da cui:

$$\theta_p = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Dove θ_p è l'angolo di Brewster, θ_r l'angolo di rifrazione e n_1 e n_2 gli indici di rifrazione dei mezzi in cui la radiazione si propaga.

Un'osservazione utile a livello sperimentale è che se il raggio incidente fosse polarizzato parallelamente al piano di incidenza, non si avrebbe un raggio riflesso: infatti abbiamo visto che viene concessa solo emissione in riflessione di radiazione polarizzata perpendicolarmente al piano di incidenza, che in questo caso sarebbe nulla, essendo la radiazione incidente polarizzata parallelamente al piano di incidenza.

Lamina Polaroid:

Un polaroide è un dispositivo realizzato con materie plastiche, avente forma di dischetto sottile e dotato di un asse, detto asse di trasmissione, giacente nel piano del polaroide stesso.

Esso ha una particolare caratteristica, cioè è in grado di polarizzare la luce su di esso incidente lungo il suo asse di trasmissione.

Infatti, considerando luce polarizzata linearmente che incida su un polaroide con direzione di polarizzazione formante un angolo θ con l'asse del polaroide, viene trasmessa solo la componente di \vec{E} parallela all'asse di trasmissione, per cui risulta polarizzata linearmente lungo tale asse.

Lo stesso accade nel caso in cui la radiazione incidente sia non polarizzata, ma per ogni treno d'onde che compone il raggio di luce, avente un vettore campo elettrico che forma un angolo θ diverso con l'asse del polaroide, solo la componente di \vec{E} lungo tale asse viene trasmessa, ottenendo comunque una polarizzazione lineare lungo l'asse di trasmissione.

La spiegazione di tale comportamento risiede in un fenomeno detto assorbimento selettivo, che caratterizza dispositivi come i polaroidi. Essi infatti, essendo costituiti da catene polimeriche di molecole allungate e orientate in una stessa direzione, sono caratterizzati da una forte anisotropia dell'assorbimento, elevato lungo la direzione di orientamento delle catene e trascurabile in quella ad essa ortogonale.

Per questo motivo, una radiazione incidente sul polaroide può cedere energia per indurre oscillazione delle cariche solo quando il vettore campo elettrico oscilla nella direzione delle catene, mentre lungo la direzione perpendicolare alle catene non si ha assorbimento di energia, ma completa trasmissione di tale componente di \vec{E} .

PROCEDIMENTO

Per prima cosa bisogna individuare l'asse di trasmissione del polarizzatore, ovvero la direzione in cui viene polarizzata un'onda che incide perpendicolarmente su di esso.

Per fare questo è sufficiente osservare attraverso la lamina Polaroid un fascio di luce naturale riflesso su un pavimento. Dopo la riflessione, la radiazione naturale, inizialmente non polarizzata, risulta infatti parzialmente polarizzata nella direzione ortogonale al piano di incidenza, ovvero il piano verticale che contiene raggio incidente e riflesso. Per questa ragione, osservando il raggio riflesso dal pavimento attraverso il polarizzatore si osserva, ruotando la lamina Polaroid, una modulazione di intensità della luce che la attraversa: individuato la posizione a cui corrisponde la minima intensità trasmessa si potrà affermare che l'asse di trasmissione della lamina Polaroid è parallelo al piano di incidenza e quindi verticale.

Una volta determinato l'asse del polarizzatore si procede alla costruzione dell'apparato strumentale per le misure. Esso è costituito da un puntatore laser che emette radiazione incidendo normalmente sul polarizzatore, posto con l'asse di trasmissione parallelo al piano di lavoro (orizzontale) in modo da estinguere in partenza la componente di polarizzazione perpendicolare al piano di incidenza. Il raggio trasmesso risulta quindi polarizzato linearmente e prosegue il suo cammino fino a incontrare un oggetto di materiale trasparente. Questo è posto al centro di una base circolare in grado di ruotare attorno all'asse verticale senza quindi cambiare posizione, così da far variare l'angolo di incidenza del raggio polarizzato in precedenza. L'aspetto importante è che il raggio sia polarizzato parallelamente al piano di incidenza. Quando si è in configurazione di angolo di Brewster, ovvero raggio riflesso ortogonale al raggio rifratto, il raggio riflesso presenta una componente nulla corrispondente alla direzione parallela al piano di incidenza. Poiché è stato posizionato il

polarizzatore in modo da avere l'asse di trasmissione orizzontale, all'angolo di Brewster, il raggio riflesso dovrebbe essere di intensità nulla, pertanto sullo schermo non dovremmo osservare nessun raggio.

Per una buona riuscita dell'esperimento bisogna inoltre assicurarsi che la superficie del polarizzatore sia posizionata in modo ortogonale al fascio di luce; questo lo si fa verificando inizialmente che il raggio riflesso torni alla sorgente (prima di posizionare la lamina). In modo analogo si procede per verificare che la superficie di separazione tra aria e plastica sia parallela al polarizzatore e quindi che il raggio incida normalmente su tale lamina.

Poiché non è noto l'indice di rifrazione, abbiamo proceduto con un semplice calcolo sfruttando la legge di Snell sulla rifrazione, quindi, facendo incidere il fascio di luce sull'oggetto di plastica e misurando angolo di incidenza e angolo di rifrazione, abbiamo fatto una stima dell'indice di rifrazione.

Per la misura degli angoli è stato usato un goniometro, permettendoci di limitare la propagazione degli errori grazie a una misura diretta.

Usando il filtro polarizzatore siamo anche stati in grado di osservare, seppure con poca precisione, la direzione di polarizzazione del fascio di luce generato dal puntatore LASER. Ci è bastato osservare il raggio trasmesso dal polaroide dopo aver fatto incidere il LASER ortogonalmente, a questo punto ruotando il filtro polarizzatore si è arrivati a una condizione di annullamento del fascio trasmesso: in questa condizione si può supporre la direzione di polarizzazione del fascio incidente ortogonale alla direzione di trasmissione della lamina Polaroid. Abbiamo per questo concluso che il puntatore LASER genera un fascio di luce polarizzato linearmente in una direzione inclinata rispetto all'orizzontale. Preso atto di ciò, abbiamo posto il polarizzatore con l'asse di trasmissione orizzontale, in modo da essere sicuri che il raggio incidente sia polarizzato parallelamente al piano di incidenza. La direzione di polarizzazione del LASER è fondamentale ai fini dell'esperimento poiché, se fosse verticale e quindi ortogonale rispetto alla direzione di polarizzazione voluta, non ci sarebbe raggio trasmesso. Per ovviare a questo problema un metodo potrebbe essere, oltre a quello di ruotare il laser, quello di eseguire una doppia polarizzazione passando per un angolo intermedio. Infatti, la legge di Malus ci dice che, data un'onda elettromagnetica polarizzata linearmente che incide su un polaroide con asse di trasmissione formante un angolo φ con la direzione di polarizzazione, l'intensità dell'onda trasmessa vale:

$$I_{tr} = I_{in} \cdot \cos^2(\varphi)$$

Dove I_{tr} è l'intensità trasmessa e I_{in} è l'intensità dell'onda incidente.

Pertanto, se $\varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos(\varphi) = 0 \Rightarrow I_{tr} = 0$.

Facendo un passaggio intermedio per un angolo qualsiasi compreso tra 0 e $\frac{\pi}{2}$ avremo che $I_{tr} \neq 0$, cioè dalla lente emerge un raggio polarizzato nella direzione voluta.

DATI E MISURE

Come prima cosa abbiamo misurato l'indice di rifrazione dell'oggetto di plastica trasparente mediante la legge di Snell in modo da avere un valore di riferimento con cui confrontare il valore ottenuto con l'angolo di Brewster. Abbiamo quindi misurato angolo di incidenza e di rifrazione del raggio LASER

incidente sulla superficie laterale dell'oggetto in tre diverse configurazioni, ottenendo tre valori dell'indice di rifrazione. Mediante una media pesata abbiamo ricavato il valore finale con relativo errore, in seguito la tabella con i dati:

| Misura | Angolo di incidenza(gradi) | Errore | Angolo di rifrazione (gradi) | Errore | n | Errore |
|--------|----------------------------|--------|------------------------------|--------|-------------|----------|
| 1 | 55 | 1 | 30 | 1 | 1,638304 | 0,05342 |
| 2 | 60 | 1 | 33 | 1 | 1,590091 | 0,04564 |
| 3 | 65 | 1 | 34 | 1 | 1,620743 | 0,043963 |
| Media | | | | | n= 1,614391 | 0,027238 |

| Misura | Angolo di incidenza(gradi) | Errore | Angolo di rifrazione (gradi) | Errore | n | Errore |
|--------|----------------------------|--------|------------------------------|--------|------------|----------|
| 1 | 55 | 1 | 37 | 1 | 1,361136 | 0,035645 |
| 2 | 60 | 1 | 40 | 1 | 1,347296 | 0,031139 |
| 3 | 65 | 1 | 45 | 1 | 1,281713 | 0,024683 |
| Media | | | | | n= 1,31933 | 0,017001 |

Si ricavano due valori dell'indice di rifrazione per i due setup sperimentali:

$$n = 1,61 \pm 0,03$$

$$n = 1,32 \pm 0,02$$

Successivamente è stato misurato l'angolo di Brewster seguendo le indicazioni riportate in precedenza.

Va sottolineato che probabilmente a causa dell'imprecisione nella determinazione dell'asse del filtro polaroid non si osserva un angolo in cui il fascio riflesso scompare totalmente, ma piuttosto si nota una diminuzione dell'intensità luminosa fino ad un valore minimo, dal quale l'intensità riinizia ad aumentare all'aumentare dell'angolo. Di conseguenza è stato considerato come angolo di Brewster l'angolo per il quale la luminosità dell'onda riflessa è minima. Questo problema è facilmente dovuto ad una non perfetta orientazione del polarizzatore. Nelle foto seguenti si notano due configurazioni notevoli: la prima si riferisce ad un angolo maggiore dell'angolo di Brewster, dove quindi l'intensità del punto luminoso è quasi massima, la seconda immagine rappresenta il setup sperimentale all'angolo di Brewster, si nota che il punto luminoso che indica dove il fascio riflesso colpisce lo "schermo" è di bassa intensità ma non scompare del tutto.



Angolo superiore all'angolo di Brewster



Angolo di Brewster

I valori misurati dell'angolo di Brewster sono (per il rispettivo setup sperimentale):

- $\theta_b = (57 \pm 2)^\circ$ $n = \tan \theta_b = 1,53 \pm 0,22$
- $\theta_b = (53 \pm 2)^\circ$ $n = \tan \theta_b = 1,32 \pm 0,18.$

L'elevata incertezza deriva dal fatto che non è immediato osservare per quale angolo si ha la condizione di minima intensità luminosa del raggio riflesso. Un luogo più buio e protetto da luce avrebbe sicuramente facilitato la misura. I valori dell'indice di rifrazione ottenuti quindi non sono particolarmente precisi ma il cui intervallo di incertezza si sovrappone al valore ottenuto nella prima parte dell'esperimento.

Sono state effettuate altre osservazioni con il filtro polarizzatore:

- La luce dello schermo del PC è polarizzata verticalmente;
- Le lampade a incandescenza non risultano polarizzate, in accordo con quanto ci aspettavamo;
- Le lampade a LED non risultano polarizzate;
- I tubi al neon non risultano polarizzati.

ERRORI

Gli errori sulle misure dirette, quindi sugli angoli misurati con il goniometro sono stati valutati durante lo svolgimento dell'esperimento, quelli relativi alla legge di Snell sono pari alla sensibilità dello strumento, mentre quello della misura dell'angolo di Brewster è maggiore come detto in precedenza.

Le formule usate per ottenere gli errori sulle misure indirette sono le seguenti:

- $\sin \theta$ (valore non mostrato ma calcolato per ricavare l'indice di rifrazione dalla legge di Snell):

$$\delta \sin \theta = \cos \theta \cdot \delta \theta$$

- Indice di rifrazione (dall'angolo di Brewster): $n = \tan \theta_b$

$$\delta n = (1 + \tan^2 \theta_b) \delta \tan \theta_b$$

Per quanto riguarda il valore medio dell'indice di rifrazione ottenuto dalla legge di Snell è stata fatta una media pesata per ricavare il valore e l'errore, le formule utilizzate sono le seguenti:

$$\bar{n} = \frac{\sum_i n_i / (\delta n_i)^2}{\sum_i 1 / (\delta n_i)^2}$$

$$\delta \bar{n} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \left(\frac{1}{\delta n_i}\right)^2}}$$

CONCLUSIONI

L'errore sulla misura è molto alto, questo perché nell'osservazione dell'angolo di Brewster è difficile stabilire la posizione esatta in cui l'intensità è minima, dunque abbiamo considerato un errore sull'angolo maggiore della sensibilità del goniometro.

Nel caso della plastica, il valore ottenuto sfruttando l'angolo di Brewster si sovrappone a quello ottenuto con la misura basata sulle leggi di Snell.

Nel caso del vetro, il valore dell'angolo di Brewster ottenuto utilizzando il polaroide e tramite le leggi di Snell (e quindi il corrispondente indice di rifrazione), pari a 53 gradi, non rientra nel range di valori attesi per il vetro. Ciò può essere dovuto al fatto che non sia stato possibile eseguire le misure in modo preciso. Tuttavia, il fatto che in entrambi i modi sia stato ottenuto lo stesso valore per l'angolo di Brewster fa pensare che esso possa avvicinarsi al valore reale per il vetro in esame, di cui non si conosce il tipo esatto.