

Misurazione dello spessore mediante birifrangenza (10 punti)

L'analisi dell'incertezza delle misure non è richiesta in questo problema.

La birifrangenza è una proprietà ottica di un cristallo in base alla quale un fascio di luce si propaga come due raggi con indici di rifrazione diversi. Quando gli assi ortogonali x e y del cristallo giacciono nel piano che contiene la faccia d'ingresso di un cristallo birifrangente (Fig. 1), il campo elettrico \mathbf{E} della luce polarizzata linearmente che incide perpendicolarmente sul cristallo viene scomposto in due componenti ortogonali \mathbf{E}_x e \mathbf{E}_y , caratterizzate, rispettivamente, da indice di rifrazione n_o e n_e . Per un cristallo di spessore L , lo sfasamento Γ_x della luce polarizzata lungo l'asse x e quello Γ_y della luce polarizzata lungo l'asse y al loro passaggio attraverso il cristallo sono dati rispettivamente da

$$\Gamma_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_o L, \quad (1)$$

$$\Gamma_y = \frac{2\pi}{\lambda} n_e L, \quad (2)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce nel vuoto.

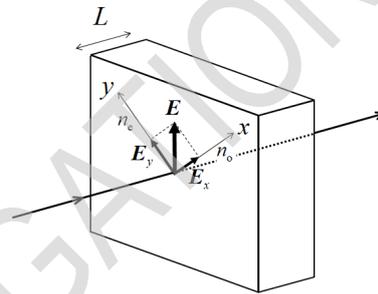


Figura 1: Scomposizione vettoriale del campo elettrico \mathbf{E} della luce polarizzata linearmente che incide perpendicolarmente sulla superficie di un cristallo birifrangente.

La differenza di fase Γ tra i due raggi è

$$\Gamma = \Gamma_y - \Gamma_x = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L, \quad (3)$$

dove

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (4)$$

è la birifrangenza. Poiché il campo elettrico della luce è la somma vettoriale di \mathbf{E}_x e \mathbf{E}_y con una differenza di fase Γ , la luce dopo aver attraversato il cristallo ha una componente di polarizzazione perpendicolare alla polarizzazione lineare iniziale della luce incidente.

Siano I_{\parallel} e I_{\perp} l'intensità delle componenti della luce, dopo il passaggio attraverso il cristallo, parallela e perpendicolare alla direzione della polarizzazione lineare della luce incidente. Di seguito, la direzione della polarizzazione lineare della luce incidente (\mathbf{E} nella Fig. 1) è di 45° rispetto all'asse x . Quindi l'intensità normalizzata della componente perpendicolare I_{Norm} è data da

$$I_{\text{Norm}} = \frac{I_{\perp}}{I_{\text{Total}}} = \sin^2 \frac{\Gamma}{2}, \quad (5)$$

dove I_{Total} è l'intensità totale della luce trasmessa, $I_{\parallel} + I_{\perp}$.

Possiamo progettare un esperimento in modo che I_{Norm} oscilli tra 0 e 1 al variare della lunghezza d'onda della luce incidente. Sia λ_m ($m = 1, 2, 3, \dots$) la lunghezza d'onda alla quale $I_{\text{Norm}} = 0$; si trova la differenza di fase Γ_m tale che

$$\Gamma_m = \frac{2\pi}{\lambda_m} \Delta n(\lambda_m) L = 2\pi m. \quad (6)$$

Questa equazione ci permette di determinare lo spessore del cristallo L se è possibile misurare diversi valori di λ_m , noti i corrispondenti valori di $\Delta n(\lambda_m)$.

In questo esperimento si determinerà lo spessore di una lastra di quarzo. Il quarzo è birfrangente e i suoi indici di rifrazione n_o e n_e dipendono dalla lunghezza d'onda della luce nel vuoto, come illustrato nella Fig. 2.

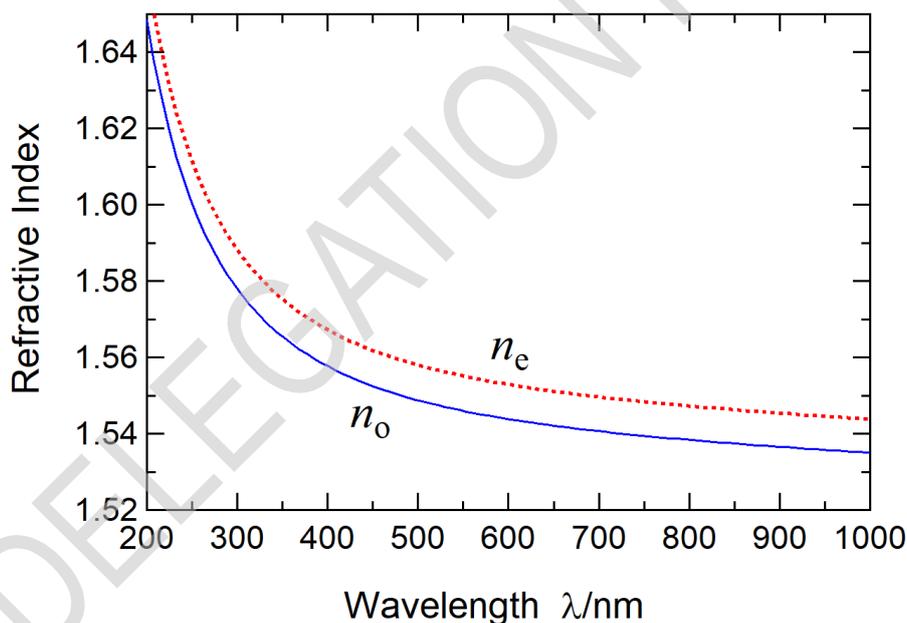


Figura 2: Dipendenza dalla lunghezza d'onda degli indici di rifrazione n_o e n_e del quarzo.

La Figura 3 mostra il dispositivo di misurazione dello spessore. Le figure 4 e 5 mostrano i componenti e i dispositivi optomeccanici e fotonici. Come sorgente luminosa viene utilizzato un diodo a emissione di luce bianca (LED), che contiene un LED blu e una sostanza fosforescente. Quando la luce del LED blu viene irradiata sulla sostanza fosforescente, viene emessa una luce bianca con uno spettro continuo. La luce proveniente da questo LED bianco viene dispersa, cioè risolta spettralmente, utilizzando il reticolo di diffrazione a trasmissione **G** e successivamente viene polarizzata linearmente dal polarizzatore **P1**. La sua direzione di polarizzazione (E nella Fig. 1) è a 45° rispetto all'asse x della lastra di quarzo **Q**. Ruotando il polarizzatore **P2** viene selezionata la componente della polarizzazione della luce dopo il passaggio attraverso **Q**, cioè quella parallela o quella perpendicolare alla direzione di polarizzazione di **P1**. Il fotorilevatore misura l'intensità della luce.

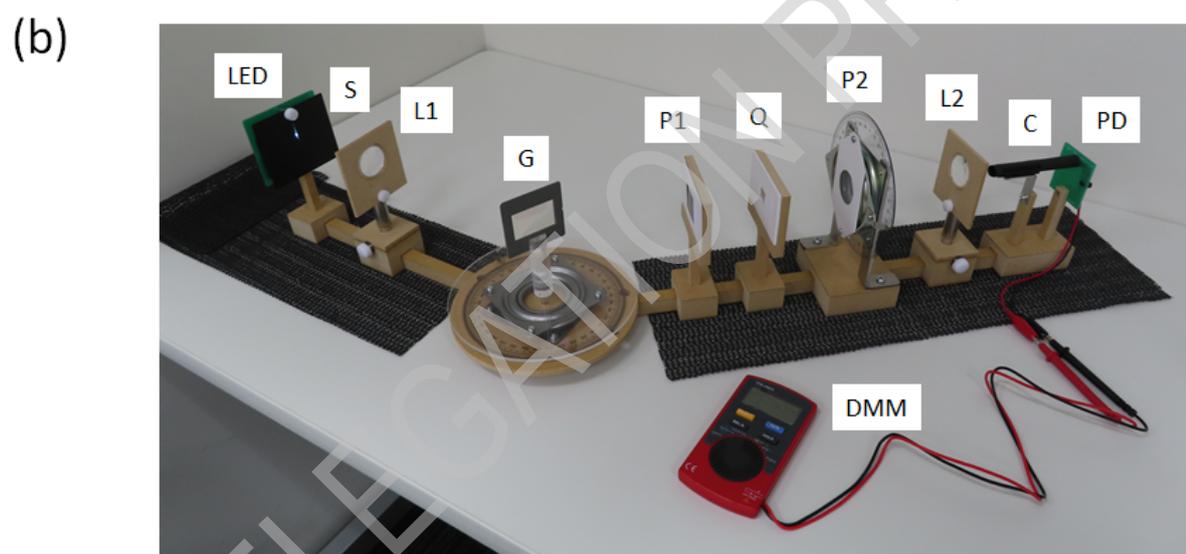
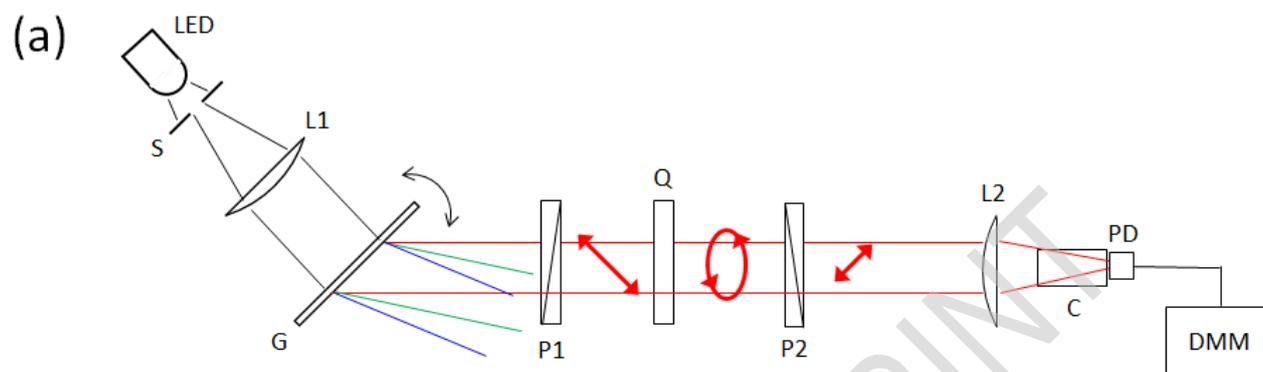


Figura 3: (a) Schema e (b) fotografia del dispositivo di misurazione dello spessore. **LED**: LED bianco, **S**: fenditura, **L1**: lente di collimazione, **G**: reticolo di diffrazione a trasmissione, **P1**: polarizzatore, **Q**: piastra di quarzo, **P2**: polarizzatore, **L2**: lente di messa a fuoco, **C**: cilindro di schermatura della luce, **PD**: fotorivelatore, **DMM**: multimetro digitale.

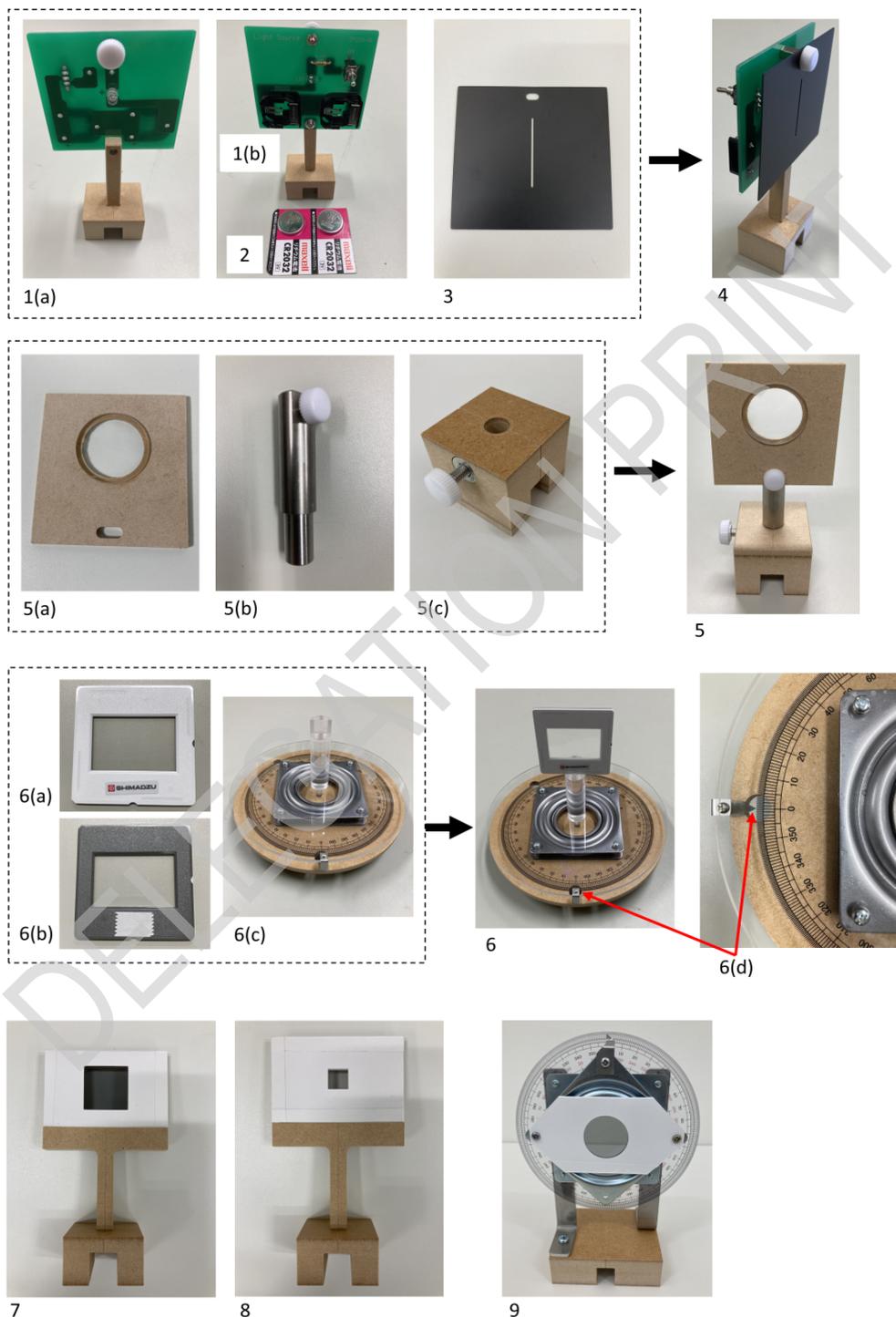


Figura 4: Componenti e dispositivi: **1(a)**. LED bianco (vista frontale); **1(b)**. LED bianco (vista posteriore); **2**. batterie; **3**. fenditura (**S** in Fig. 3); **4**. LED con fenditura attaccata; **5**. lente (**L1**, **L2** in Fig. 3); **5(a)** lente montata; **5(b)** supporto della lente; **5(c)** base del supporto; **6**. reticolo di diffrazione a trasmissione (**6(a)** anteriore; **6(b)** posteriore con nastro adesivo) su **6(c)** piattaforma di rotazione (**G** in Fig. 3); **6(d)** dispositivo di lettura dell'angolo sulla piattaforma di rotazione; **7**. polarizzatore (**P1** nella Fig. 3); **8**. piastra di quarzo (**Q** nella Fig. 3); **9**. polarizzatore sul supporto di rotazione (**P2** nella Fig. 3).



Figura 5: Componenti e dispositivi (continua): **10.** cilindro di protezione dalla luce con magneti (**C** in Fig. 3); **11.** supporto del cilindro; **12.** fotorilevatore (**PD** in Fig. 3); **13.** fotorilevatore con cilindro; **14.** multimetro digitale (**DMM** in Fig. 3); **15.** guida corta; **16.** guida lunga; **17.** schermo con carta millimetrata; **18.** cartoncino bianco; **19.** cartoncino nero; **20.** fogli antiscivolo; **21** & **22.** scatola di protezione dalla luce (prima del montaggio e come è montata).

Parte A. Impostazione del sistema di misura (2.3 punti)

La luce che esce dal LED è incidente sulla superficie del reticolo (Fig. 6). L'angolo di rotazione θ di **G** per l'incidenza normale è fissato a 0° . Le rotazioni in senso antiorario e orario sono indicate rispettivamente con + e -. L'angolo di diffrazione al primo ordine α è definito come illustrato. Indicando con d il passo della scanalatura (ossia la distanza tra le fenditure) di **G**, la lunghezza d'onda λ è data in termini di θ come

$$\lambda = d \sin(\alpha - \theta) + d \sin \theta \quad (7)$$

$$= 2d \sin \frac{\alpha}{2} \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right). \quad (8)$$

Di seguito utilizziamo $d = 1.00 \mu\text{m}$ e l'angolo di diffrazione viene fissato a $\alpha = 40.0^\circ$.

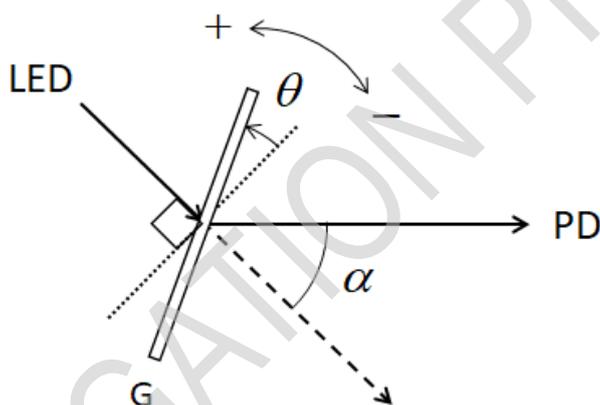


Figura 6: L'angolo di rotazione θ del reticolo di diffrazione in trasmissione **G** e l'angolo di diffrazione α .

- | | | |
|------------|--|--------|
| A.1 | Calcolare la lunghezza d'onda massima λ che può essere misurata e il relativo θ . | 0.3 pt |
| A.2 | Calcolare il valore numerico di θ per $\lambda = 440 \text{ nm}$. | 0.2 pt |

Le procedure di impostazione del sistema di misura sono le seguenti.

[1] Posizionare verticalmente lo schermo con carta millimetrata (**17** nella Fig. 5) utilizzando il piedistallo (**17(b)**).

[2] Posizionare due batterie sul modulo LED bianco. Le parti "+" devono essere rivolte verso di voi.

[3] Accendere il LED.

[4] Rimuovere la vite sul lato anteriore del modulo LED. Fissare la fenditura al modulo LED con la vite (4 nella Fig. 4). Utilizzando lo schermo con carta millimetrata, regolare la posizione della fenditura in modo che il flusso di luce bianca trasmesso sia il più luminoso possibile e misurare l'altezza del centro del fascio all'uscita della fenditura (per la procedura [9]).

[5] Fare in modo che l'estremità a forma di U con scanalatura aperta della guida lunga si appoggi a quella della guida corta (Fig. 7(i)). Inserire l'asse di rotazione che fuoriesce dalla faccia inferiore della piattaforma di rotazione nel "foro passante virtuale" creato dalle guide (Fig. 7(ii)). Assicurare una rotazione libera e

Experiment

regolare di entrambi i bracci attorno all'asse, come indicato nella Fig. 7(iii). Assicurarsi che la guida lunga rimanga sul tavolo $0^\circ \leq \alpha \leq 40.0^\circ$.

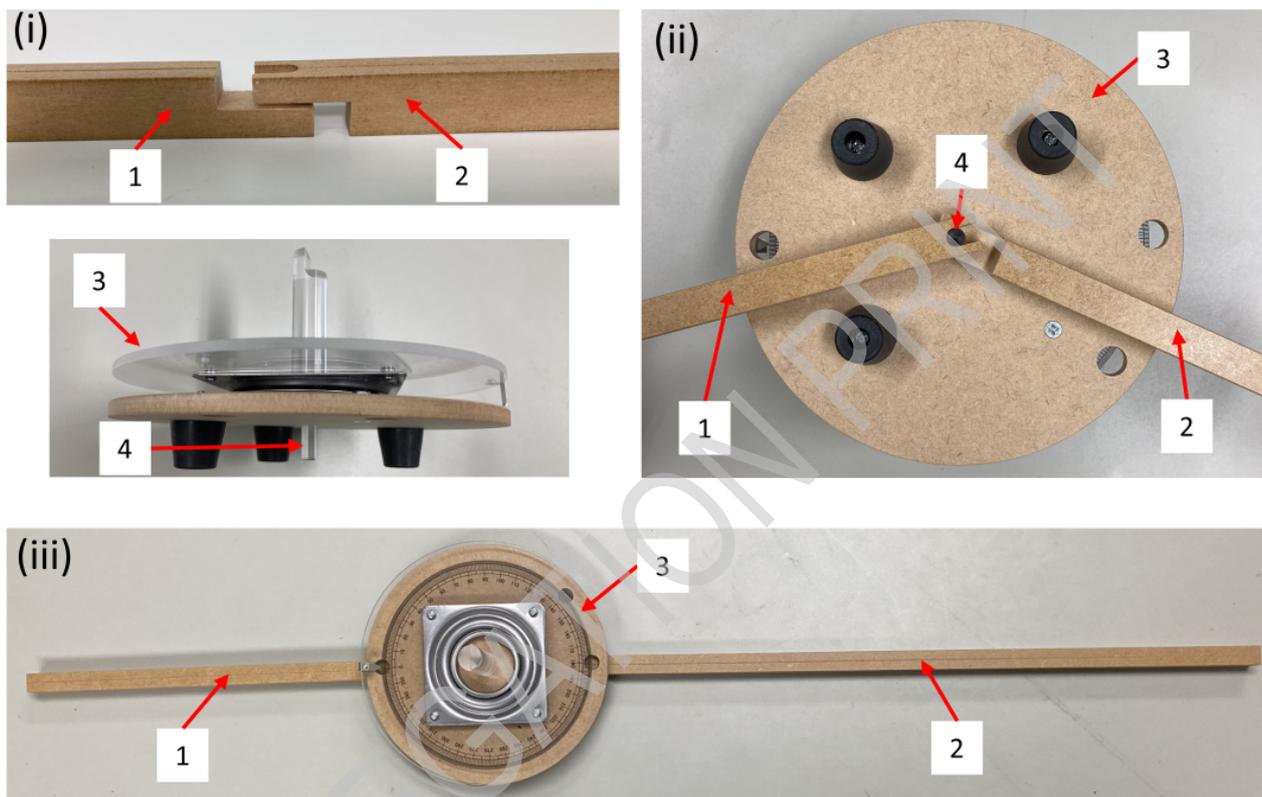


Figura 7: **(i)** L'estremità della guida corta con scanalatura aperta a U sotto quella della guida lunga crea un foro passante "virtuale". **(ii)** Nel foro virtuale, inserire l'asse che fuoriesce dalla faccia inferiore della piattaforma di rotazione. **(iii)** Vista dall'alto della piattaforma di rotazione con le guide libere di ruotare attorno all'asse. **1.** guida corta; **2.** guida lunga; **3.** piattaforma di rotazione; **4.** asse della piattaforma rotazione.

[6] Allineare la linea centrale della guida corta con 0° sulla scala della piattaforma di rotazione e mantenerla in tale posizione. È possibile collocare un foglio antiscivolo sotto la guida corta.

[7] Assemblare le lenti (**5** in Fig. 4).

[8] Posizionare il modulo LED bianco con la fenditura e la lente (**L1** nella Fig. 3) sulla guida corta. Regolare la distanza tra la fenditura e **L1** in modo che la dimensione del fascio di luce, dopo aver attraversato **L1**, rimanga pressoché costante, cioè collimata, lungo il percorso della luce.

[9] Utilizzando lo schermo con carta millimetrata, misurare l'altezza del fascio dopo **L1**. Regolare il livello di **L1** allentando la vite di fermo della base del montante e spostando il montante quanto necessario per mantenere l'altezza del fascio quasi uguale a quella subito dopo la fenditura.

[10] Allineare la linea centrale della guida lunga con i 180° della scala angolare sulla piattaforma di rotazione.

[11] Modificare la posizione orizzontale del supporto dell'obiettivo (**5(a)** nella Fig. 4) allentando la vite di fermo e spostandolo a destra o a sinistra. Il centro del fascio dopo **L1** dovrebbe allinearsi con la linea

centrale della guida lunga. È possibile posizionare lo schermo con carta millimetrata capovolto sulla guida lunga.

[12] Attaccare la seconda superficie del nastro biadesivo sul lato posteriore del reticolo di diffrazione a trasmissione (**6(b)**) nella Fig. 4) e fissarlo all'asse superiore della piattaforma di rotazione (**6** nella Fig. 4).

[13] Rivolgere il lato anteriore del reticolo verso la sorgente luminosa e ruotare la piattaforma in modo che la luce riflessa entri nella fenditura, cioè $\theta = 0^\circ$ (incidenza normale). Annotare l'angolo θ_{Stage} della piattaforma di rotazione. Sarà utilizzato nella domanda B.1.

[14] Spostare la guida lunga intorno all'asse in modo che $\alpha = 40.0^\circ$ (Fig. 6). Una volta fissata, è possibile posizionare successivamente un secondo foglio antiscivolo per evitare disallineamenti accidentali.

[15] Posizionare la lente (**L2** nella Fig. 3) e il fotorivelatore (**PD** nella Fig. 3) con il supporto cilindrico sulla guida lunga. Per focalizzare la luce diffratta su **PD**, regolare la distanza tra **PD** e **L2** lungo la guida lunga e l'altezza di **L2**. L'ampiezza verticale del fascio viene così ridotta al minimo. Controllare l'ampiezza del fascio con il cartoncino bianco. Nel caso in cui sia troppo debole per essere riconosciuto a occhio nudo, utilizzare la scatola di schermatura per coprire **PD**.

[16] Applicare il cilindro paraluce al supporto (**13** nella Fig. 5). Lo schermo luminoso riduce al minimo la luce indesiderata da rilevare.

[17] Collegare il **PD** al DMM. Il filo rosso (nero) va al terminale rosso (nero). Impostare il multimetro sulla modalità di misurazione della tensione continua (DC).

[18] Regolare l'altezza di **L2** per massimizzare le letture del DMM. Di seguito, l'intensità della luce è identificata con i valori di tensione sul DMM.

| | | |
|------------|--|--------|
| A.3 | Ruotare la piattaforma di rotazione e trovare l'angolo θ e la corrispondente lunghezza d'onda alla quale la densità spettrale di emissione del LED blu è massima, assumendo che $\alpha = 40.0^\circ$. Se la risposta ottenuta è compresa tra 450 e 460 nm, l'apparato è correttamente allineato; scrivere $\alpha = 40.0^\circ$ sul foglio delle risposte e continuare. Altrimenti, si dovrà trovare il vero valore di α . Senza cambiare nulla, compreso il valore originale di λ_{Peak} trovato, determinare un valore corretto per cui λ_{Peak} ricada nell'intervallo appropriato. Registrare questo α sul foglio delle risposte e utilizzarlo per il resto del problema. | 0.8 pt |
|------------|--|--------|

[19] Posizionare i polarizzatori (**P1** e **P2** nella Fig. 3) sulla guida lunga.

| | | |
|------------|--|--------|
| A.4 | Impostare la piattaforma di rotazione sulla posizione $\theta = -15.0^\circ$. Osservare le letture sul DMM e trovare l'angolo φ_\perp del supporto di rotazione del polarizzatore P2 tale per cui la sua direzione di polarizzazione sia perpendicolare a quella della luce trasmessa attraverso il polarizzatore P1 . Da questo risultato, trovare l'angolo φ_\parallel del supporto di rotazione del polarizzatore P2 quando la sua direzione di polarizzazione è parallela a quella del polarizzatore P1 . | 0.3 pt |
|------------|--|--------|

| | | |
|------------|---|--------|
| A.5 | Bloccare la luce attraverso la fenditura ponendo il cartoncino nero davanti alla fenditura. In questo modo è possibile valutare il rumore di fondo del sistema, cioè l'offset dell'intensità dallo zero. Definiamo le intensità luminose $I_{\text{Offset } \perp}$ e $I_{\text{Offset } \parallel}$ quando gli angoli del supporto di rotazione del polarizzatore P2 sono rispettivamente φ_\perp e φ_\parallel . Misurare gli offset $I_{\text{Offset } \perp}$ e $I_{\text{Offset } \parallel}$. Si noti che $I_{\text{Offset } \perp}$ e $I_{\text{Offset } \parallel}$ sono dovuti a luce diversa da quella della sorgente luminosa. Questi valori devono essere eliminati per sottrazione per determinare il solo contributo della sorgente luminosa. | 0.2 pt |
|------------|---|--------|

- A.6** I_{\perp} e I_{\parallel} si riferiscono alle intensità luminose della sorgente luminosa quando gli angoli del supporto di rotazione del polarizzatore **P2** sono rispettivamente φ_{\perp} e φ_{\parallel} . Misurare le intensità luminose I_{\perp} e I_{\parallel} per $\theta = -15.0^{\circ}$. 0.5 pt

Parte B. Misurazione dell'intensità della luce trasmessa (4.7 punti)

Di seguito, utilizzare i valori di λ calcolati utilizzando il valore corretto di α in **A.3**, se necessario.

- B.1** Posizionare la lastra di quarzo tra i polarizzatori **P1** e **P2** e misurare le intensità della luce trasmessa I_{\perp} e I_{\parallel} a vari angoli θ . Le misure devono coprire completamente l'intervallo di lunghezze d'onda da 440 nm a 660 nm. Tabulare i seguenti parametri: θ_{Stage} (letture dell'angolo dello strumento di rotazione), θ , λ , I_{\perp} , I_{\parallel} , $I_{\text{Total}} = I_{\perp} + I_{\parallel}$, $I_{\text{Norm}} = I_{\perp}/I_{\text{Total}}$. Si noti che quando il valore di θ_{Stage} aumenta, il valore di θ diminuisce della stessa quantità e viceversa. Non è necessario utilizzare tutte le righe della tabella fornita, ma è opportuno prendere abbastanza dati per ottenere risultati accurati. 2.0 pt

- B.2** Disegnare sul grafico lo spettro del LED bianco, cioè I_{Total} in funzione della lunghezza d'onda. 1.0 pt

- B.3** Trovare $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$, cioè la larghezza a metà altezza dello spettro del LED blu incorporato nel LED bianco. Essa è la larghezza di un picco misurata tra i punti che si trovano a metà dell'intensità massima. 0.2 pt

- B.4** Disegnare sul grafico lo spettro di I_{Norm} . 1.5 pt

Parte C. Analisi delle misure (3.0 punti)

- C.1** Dal grafico I_{Norm} , trovare tutte le lunghezze d'onda alle quali le intensità passano attraverso minimi locali. Il numero d'ordine associato m secondo l'Eq. (6) deve essere indicato sotto la lunghezza d'onda corrispondente. Per determinare la birifrangenza Δn , utilizzare i valori di n_o e n_e indicati nella Tabella 1. 1.5 pt

- C.2** Ottenere lo spessore del campione L . 1.5 pt

Tabella 1: Indici di rifrazione n_o e n_e del quarzo (400-700 nm).

| λ/nm | n_o | n_e | λ/nm | n_o | n_e | λ/nm | n_o | n_e |
|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|
| 400 | 1.55769 | 1.56725 | 434 | 1.55394 | 1.56337 | 467 | 1.55107 | 1.56041 |
| 401 | 1.55756 | 1.56712 | 435 | 1.55384 | 1.56327 | 468 | 1.55099 | 1.56033 |
| 402 | 1.55744 | 1.56700 | 436 | 1.55374 | 1.56318 | 469 | 1.55091 | 1.56025 |
| 403 | 1.55732 | 1.56687 | 437 | 1.55365 | 1.56308 | 470 | 1.55084 | 1.56017 |
| 404 | 1.55720 | 1.56674 | 438 | 1.55355 | 1.56298 | 471 | 1.55076 | 1.56009 |
| 405 | 1.55707 | 1.56662 | 439 | 1.55346 | 1.56288 | 472 | 1.55068 | 1.56001 |
| 406 | 1.55695 | 1.56649 | 440 | 1.55337 | 1.56278 | 473 | 1.55061 | 1.55993 |
| 407 | 1.55684 | 1.56637 | 441 | 1.55327 | 1.56269 | 474 | 1.55054 | 1.55986 |
| 408 | 1.55672 | 1.56625 | 442 | 1.55318 | 1.56259 | 475 | 1.55046 | 1.55978 |
| 409 | 1.55660 | 1.56613 | 443 | 1.55309 | 1.56250 | 476 | 1.55039 | 1.55970 |
| 410 | 1.55648 | 1.56601 | 444 | 1.55300 | 1.56240 | 477 | 1.55031 | 1.55963 |
| 411 | 1.55637 | 1.56589 | 445 | 1.55291 | 1.56231 | 478 | 1.55024 | 1.55955 |
| 412 | 1.55625 | 1.56577 | 446 | 1.55282 | 1.56222 | 479 | 1.55017 | 1.55948 |
| 413 | 1.55614 | 1.56565 | 447 | 1.55273 | 1.56213 | 480 | 1.55010 | 1.55940 |
| 414 | 1.55603 | 1.56554 | 448 | 1.55264 | 1.56203 | 481 | 1.55003 | 1.55933 |
| 415 | 1.55592 | 1.56542 | 449 | 1.55255 | 1.56194 | 482 | 1.54995 | 1.55926 |
| 416 | 1.55580 | 1.56531 | 450 | 1.55247 | 1.56185 | 483 | 1.54988 | 1.55918 |
| 417 | 1.55569 | 1.56519 | 451 | 1.55238 | 1.56176 | 484 | 1.54981 | 1.55911 |
| 418 | 1.55558 | 1.56508 | 452 | 1.55229 | 1.56167 | 485 | 1.54974 | 1.55904 |
| 419 | 1.55548 | 1.56497 | 453 | 1.55221 | 1.56159 | 486 | 1.54967 | 1.55897 |
| 420 | 1.55537 | 1.56485 | 454 | 1.55212 | 1.56150 | 487 | 1.54961 | 1.55890 |
| 421 | 1.55526 | 1.56474 | 455 | 1.55204 | 1.56141 | 488 | 1.54954 | 1.55883 |
| 422 | 1.55515 | 1.56463 | 456 | 1.55195 | 1.56132 | 489 | 1.54947 | 1.55875 |
| 423 | 1.55505 | 1.56452 | 457 | 1.55187 | 1.56124 | 490 | 1.54940 | 1.55868 |
| 424 | 1.55494 | 1.56442 | 458 | 1.55179 | 1.56115 | 491 | 1.54933 | 1.55862 |
| 425 | 1.55484 | 1.56431 | 459 | 1.55171 | 1.56107 | 492 | 1.54927 | 1.55855 |
| 426 | 1.55474 | 1.56420 | 460 | 1.55162 | 1.56098 | 493 | 1.54920 | 1.55848 |
| 427 | 1.55463 | 1.56410 | 461 | 1.55154 | 1.56090 | 494 | 1.54913 | 1.55841 |
| 428 | 1.55453 | 1.56399 | 462 | 1.55146 | 1.56082 | 495 | 1.54907 | 1.55834 |
| 429 | 1.55443 | 1.56389 | 463 | 1.55138 | 1.56073 | 496 | 1.54900 | 1.55827 |
| 430 | 1.55433 | 1.56378 | 464 | 1.55130 | 1.56065 | 497 | 1.54894 | 1.55821 |
| 431 | 1.55423 | 1.56368 | 465 | 1.55122 | 1.56057 | 498 | 1.54887 | 1.55814 |
| 432 | 1.55413 | 1.56358 | 466 | 1.55115 | 1.56049 | 499 | 1.54881 | 1.55807 |
| 433 | 1.55403 | 1.56348 | | | | | | |

| λ/nm | n_o | n_e | λ/nm | n_o | n_e | λ/nm | n_o | n_e |
|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|
| 500 | 1.54875 | 1.55801 | 534 | 1.54678 | 1.55597 | 567 | 1.54518 | 1.55432 |
| 501 | 1.54868 | 1.55794 | 535 | 1.54673 | 1.55592 | 568 | 1.54514 | 1.55427 |
| 502 | 1.54862 | 1.55788 | 536 | 1.54667 | 1.55587 | 569 | 1.54509 | 1.55423 |
| 503 | 1.54856 | 1.55781 | 537 | 1.54662 | 1.55581 | 570 | 1.54505 | 1.55418 |
| 504 | 1.54850 | 1.55775 | 538 | 1.54657 | 1.55576 | 571 | 1.54500 | 1.55414 |
| 505 | 1.54843 | 1.55768 | 539 | 1.54652 | 1.55570 | 572 | 1.54496 | 1.55409 |
| 506 | 1.54837 | 1.55762 | 540 | 1.54647 | 1.55565 | 573 | 1.54492 | 1.55405 |
| 507 | 1.54831 | 1.55756 | 541 | 1.54642 | 1.55560 | 574 | 1.54487 | 1.55400 |
| 508 | 1.54825 | 1.55749 | 542 | 1.54637 | 1.55555 | 575 | 1.54483 | 1.55396 |
| 509 | 1.54819 | 1.55743 | 543 | 1.54632 | 1.55549 | 576 | 1.54479 | 1.55391 |
| 510 | 1.54813 | 1.55737 | 544 | 1.54627 | 1.55544 | 577 | 1.54474 | 1.55387 |
| 511 | 1.54807 | 1.55731 | 545 | 1.54622 | 1.55539 | 578 | 1.54470 | 1.55383 |
| 512 | 1.54801 | 1.55725 | 546 | 1.54617 | 1.55534 | 579 | 1.54466 | 1.55378 |
| 513 | 1.54795 | 1.55718 | 547 | 1.54612 | 1.55529 | 580 | 1.54462 | 1.55374 |
| 514 | 1.54789 | 1.55712 | 548 | 1.54607 | 1.55524 | 581 | 1.54458 | 1.55370 |
| 515 | 1.54783 | 1.55706 | 549 | 1.54602 | 1.55519 | 582 | 1.54453 | 1.55365 |
| 516 | 1.54777 | 1.55700 | 550 | 1.54597 | 1.55514 | 583 | 1.54449 | 1.55361 |
| 517 | 1.54772 | 1.55694 | 551 | 1.54592 | 1.55509 | 584 | 1.54445 | 1.55357 |
| 518 | 1.54766 | 1.55688 | 552 | 1.54587 | 1.55504 | 585 | 1.54441 | 1.55352 |
| 519 | 1.54760 | 1.55682 | 553 | 1.54583 | 1.55499 | 586 | 1.54437 | 1.55348 |
| 520 | 1.54754 | 1.55676 | 554 | 1.54578 | 1.55494 | 587 | 1.54433 | 1.55344 |
| 521 | 1.54749 | 1.55671 | 555 | 1.54573 | 1.55489 | 588 | 1.54429 | 1.55340 |
| 522 | 1.54743 | 1.55665 | 556 | 1.54568 | 1.55484 | 589 | 1.54425 | 1.55336 |
| 523 | 1.54738 | 1.55659 | 557 | 1.54564 | 1.55479 | 590 | 1.54421 | 1.55331 |
| 524 | 1.54732 | 1.55653 | 558 | 1.54559 | 1.55474 | 591 | 1.54417 | 1.55327 |
| 525 | 1.54726 | 1.55648 | 559 | 1.54554 | 1.55470 | 592 | 1.54413 | 1.55323 |
| 526 | 1.54721 | 1.55642 | 560 | 1.54550 | 1.55465 | 593 | 1.54409 | 1.55319 |
| 527 | 1.54715 | 1.55636 | 561 | 1.54545 | 1.55460 | 594 | 1.54405 | 1.55315 |
| 528 | 1.54710 | 1.55631 | 562 | 1.54541 | 1.55455 | 595 | 1.54401 | 1.55311 |
| 529 | 1.54705 | 1.55625 | 563 | 1.54536 | 1.55451 | 596 | 1.54397 | 1.55307 |
| 530 | 1.54699 | 1.55619 | 564 | 1.54531 | 1.55446 | 597 | 1.54393 | 1.55303 |
| 531 | 1.54694 | 1.55614 | 565 | 1.54527 | 1.55441 | 598 | 1.54389 | 1.55299 |
| 532 | 1.54688 | 1.55608 | 566 | 1.54522 | 1.55437 | 599 | 1.54385 | 1.55295 |
| 533 | 1.54683 | 1.55603 | | | | | | |

| λ/nm | n_o | n_e | λ/nm | n_o | n_e | λ/nm | n_o | n_e |
|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|
| 600 | 1.54382 | 1.55291 | 634 | 1.54260 | 1.55165 | 667 | 1.54157 | 1.55059 |
| 601 | 1.54378 | 1.55287 | 635 | 1.54257 | 1.55162 | 668 | 1.54154 | 1.55056 |
| 602 | 1.54374 | 1.55283 | 636 | 1.54254 | 1.55159 | 669 | 1.54151 | 1.55053 |
| 603 | 1.54370 | 1.55279 | 637 | 1.54250 | 1.55155 | 670 | 1.54148 | 1.55050 |
| 604 | 1.54366 | 1.55275 | 638 | 1.54247 | 1.55152 | 671 | 1.54145 | 1.55047 |
| 605 | 1.54363 | 1.55271 | 639 | 1.54244 | 1.55148 | 672 | 1.54143 | 1.55044 |
| 606 | 1.54359 | 1.55267 | 640 | 1.54241 | 1.55145 | 673 | 1.54140 | 1.55041 |
| 607 | 1.54355 | 1.55264 | 641 | 1.54237 | 1.55142 | 674 | 1.54137 | 1.55038 |
| 608 | 1.54351 | 1.55260 | 642 | 1.54234 | 1.55138 | 675 | 1.54134 | 1.55035 |
| 609 | 1.54348 | 1.55256 | 643 | 1.54231 | 1.55135 | 676 | 1.54131 | 1.55032 |
| 610 | 1.54344 | 1.55252 | 644 | 1.54228 | 1.55132 | 677 | 1.54128 | 1.55029 |
| 611 | 1.54340 | 1.55248 | 645 | 1.54224 | 1.55128 | 678 | 1.54125 | 1.55026 |
| 612 | 1.54337 | 1.55245 | 646 | 1.54221 | 1.55125 | 679 | 1.54123 | 1.55023 |
| 613 | 1.54333 | 1.55241 | 647 | 1.54218 | 1.55122 | 680 | 1.54120 | 1.55020 |
| 614 | 1.54330 | 1.55237 | 648 | 1.54215 | 1.55119 | 681 | 1.54117 | 1.55017 |
| 615 | 1.54326 | 1.55233 | 649 | 1.54212 | 1.55115 | 682 | 1.54114 | 1.55014 |
| 616 | 1.54322 | 1.55230 | 650 | 1.54209 | 1.55112 | 683 | 1.54111 | 1.55011 |
| 617 | 1.54319 | 1.55226 | 651 | 1.54206 | 1.55109 | 684 | 1.54109 | 1.55009 |
| 618 | 1.54315 | 1.55222 | 652 | 1.54202 | 1.55106 | 685 | 1.54106 | 1.55006 |
| 619 | 1.54312 | 1.55219 | 653 | 1.54199 | 1.55102 | 686 | 1.54103 | 1.55003 |
| 620 | 1.54308 | 1.55215 | 654 | 1.54196 | 1.55099 | 687 | 1.54100 | 1.55000 |
| 621 | 1.54305 | 1.55211 | 655 | 1.54193 | 1.55096 | 688 | 1.54098 | 1.54997 |
| 622 | 1.54301 | 1.55208 | 656 | 1.54190 | 1.55093 | 689 | 1.54095 | 1.54994 |
| 623 | 1.54298 | 1.55204 | 657 | 1.54187 | 1.55090 | 690 | 1.54092 | 1.54992 |
| 624 | 1.54294 | 1.55201 | 658 | 1.54184 | 1.55087 | 691 | 1.54090 | 1.54989 |
| 625 | 1.54291 | 1.55197 | 659 | 1.54181 | 1.55083 | 692 | 1.54087 | 1.54986 |
| 626 | 1.54287 | 1.55193 | 660 | 1.54178 | 1.55080 | 693 | 1.54084 | 1.54983 |
| 627 | 1.54284 | 1.55190 | 661 | 1.54175 | 1.55077 | 694 | 1.54081 | 1.54980 |
| 628 | 1.54280 | 1.55186 | 662 | 1.54172 | 1.55074 | 695 | 1.54079 | 1.54978 |
| 629 | 1.54277 | 1.55183 | 663 | 1.54169 | 1.55071 | 696 | 1.54076 | 1.54975 |
| 630 | 1.54274 | 1.55179 | 664 | 1.54166 | 1.55068 | 697 | 1.54073 | 1.54972 |
| 631 | 1.54270 | 1.55176 | 665 | 1.54163 | 1.55065 | 698 | 1.54071 | 1.54969 |
| 632 | 1.54267 | 1.55172 | 666 | 1.54160 | 1.55062 | 699 | 1.54068 | 1.54967 |
| 633 | 1.54264 | 1.55169 | | | | 700 | 1.54066 | 1.54964 |