

Μετρήσεις πάχους με χρήση διπλοθλαστικότητας (10 μονάδες)

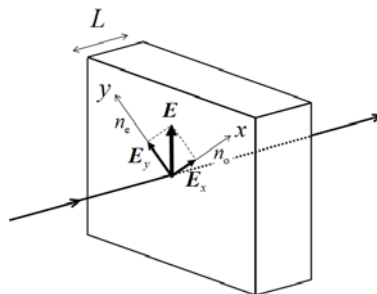
Στο πρόβλημα αυτό δεν χρειάζεται να κάνετε υπολογισμούς αβεβαιότητας.

Η διπλή διάθλαση (διπλοθλαστικότητα) είναι μια οπτική ιδιότητα των κρυστάλλων, σύμφωνα με την οποία το φως διαδίδεται ως δύο ακτίνες με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Όταν οι ορθογώνιοι άξονες x και y του κρυστάλλου βρίσκονται στο επίπεδο της επιφάνειας εισόδου του φωτός στον διπλοθλαστικό κρύσταλλο (Σχ. 1), το ηλεκτρικό πεδίο E του γραμμικά πολωμένου φωτός που προσπίπτει κάθετα στον κρύσταλλο αναλύεται σε δύο ορθογώνιες συνιστώσες E_x και E_y που υπόκεινται σε δείκτες διάθλασης n_o και n_e , αντίστοιχα. Για έναν κρύσταλλο πάχους L , οι ακτίνες που, λόγω της διέλευσής τους από αυτόν, είναι πολωμένες στους άξονες x και y υφίστανται αλλαγές φάσης Γ_x και Γ_y αντίστοιχα, που δίνονται από τις σχέσεις

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

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

όπου λ είναι το μήκος κύματος του φωτός στο κενό.



Σχήμα 1: Διανυσματικές συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου E γραμμικά πολωμένου φωτός, το οποίο προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια ενός διπλοθλαστικού κρυστάλλου.

Η διαφορά φάσης Γ μεταξύ των δύο ακτίνων είναι

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

όπου

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

είναι η διπλοθλαστικότητα. Δεδομένου ότι το ηλεκτρικό πεδίο του φωτός είναι το διανυσματικό άθροισμα των E_x και E_y με διαφορά φάσης Γ , το φως μετά τη διέλευσή του από τον κρύσταλλο έχει μια πολωμένη συνιστώσα κάθετη στην διεύθυνση γραμμικής πόλωσης του προσπίπτοντος φωτός.

Έστω $I_{\parallel}$ και $I_{\perp}$ οι εντάσεις των συνιστωσών ακτίνων που προκύπτουν μετά την διέλευση του φωτός από τον κρύσταλλο και είναι η μία παράλληλη και η άλλη κάθετη προς την διεύθυνση του γραμμικά

πολωμένου προσπίπτοντος φωτός. Στο εξής η κατεύθυνση του γραμμικά πολωμένου προσπίπτοντος φωτός (E στο Σχήμα 1) θα θεωρείται ότι σχηματίζει γωνία ίση προς 45° ως προς τον άξονα x . Τότε η κανονικοποιημένη (ανηγμένη στην μονάδα) ένταση της κάθετης συνιστώσας I_{Norm} δίνεται από τη σχέση

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

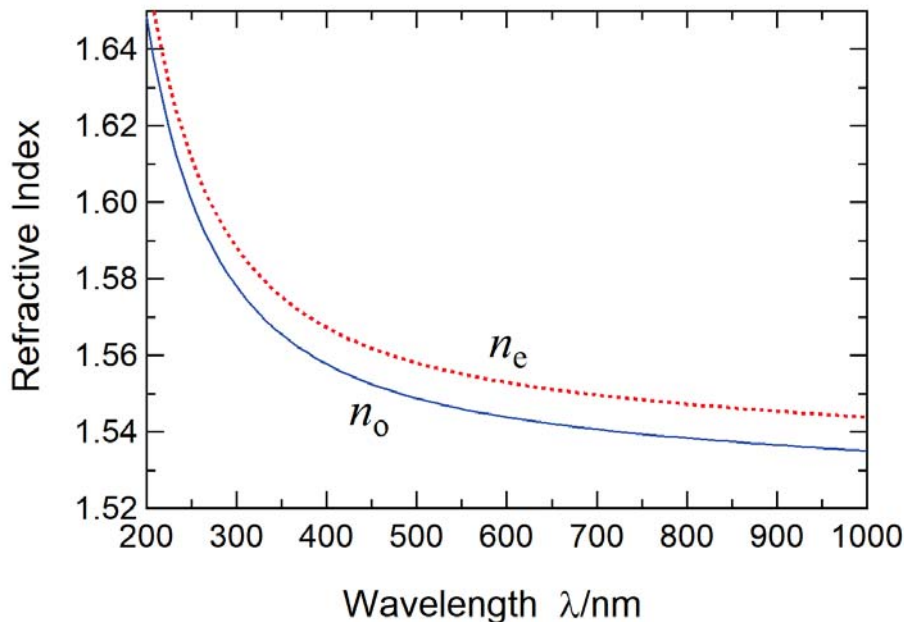
όπου I_{Total} είναι η συνολική εκπεμπόμενη ένταση, $I_{\parallel} + I_{\perp}$.

Μπορούμε λοιπόν να σχεδιάσουμε ένα πείραμα έτσι ώστε το I_{Norm} να ταλαντώνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1 καθώς μεταβάλλουμε το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Έστω λ_m ($m = 1, 2, 3, \dots$) τα μήκη κύματος για τα οποία $I_{\text{Norm}} = 0$. Στην περίπτωση αυτή για την διαφορά φάσης Γ_m ισχύει:

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

Η εξίσωση αυτή μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε την τιμή του πάχους L του κρυστάλλου, με την προϋπόθεση ότι είναι δυνατό να μετρηθούν πολλαπλά λ_m με γνωστό το $\Delta n(\lambda_m)$.

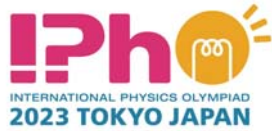
Στο πείραμα αυτό θα προσδιορίσετε το πάχος μιας κρυσταλλικής πλάκας (πλακίδιο) χαλαζία για να προσδιορίσετε το πάχος της. Ο χαλαζίας είναι διπλοθλαστικός και οι τιμές των δεικτών διάθλασης n_o και n_e εξαρτώνται από το μήκος κύματος του φωτός στο κενό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Εξάρτηση των δεικτών διάθλασης n_o και n_e του χαλαζία από το μήκος κύματος.

Στο σχήμα 3 φαίνεται η πειραματική διάταξη μέτρησης του πάχους. Στα σχήματα 4 και 5 απεικονίζονται οπτομηχανικά και φωτονικά εξαρτήματα και συσκευές. Μια δίοδος (LED) εκπομπής λευκού φωτός, που χρησιμοποιείται ως φωτεινή πηγή, περιέχει μια LED μπλε φωτός και ένα κομμάτι φωσφόρου. Όταν μπλε φως από την LED προσπίπτει στον φωσφόρο, αυτός εκπέμπει λευκό φως συνεχούς φάσματος. Ακολουθώντας, το φως αυτό υφίσταται ανάλυση, διερχόμενο από το φράγμα περίθλασης **G**, και πολώνεται γραμμικά εξ αιτίας του πολωτή **P1**. Η διεύθυνση πόλωσης του (E στο Σχ. 1) σχηματίζει γωνία 45° με

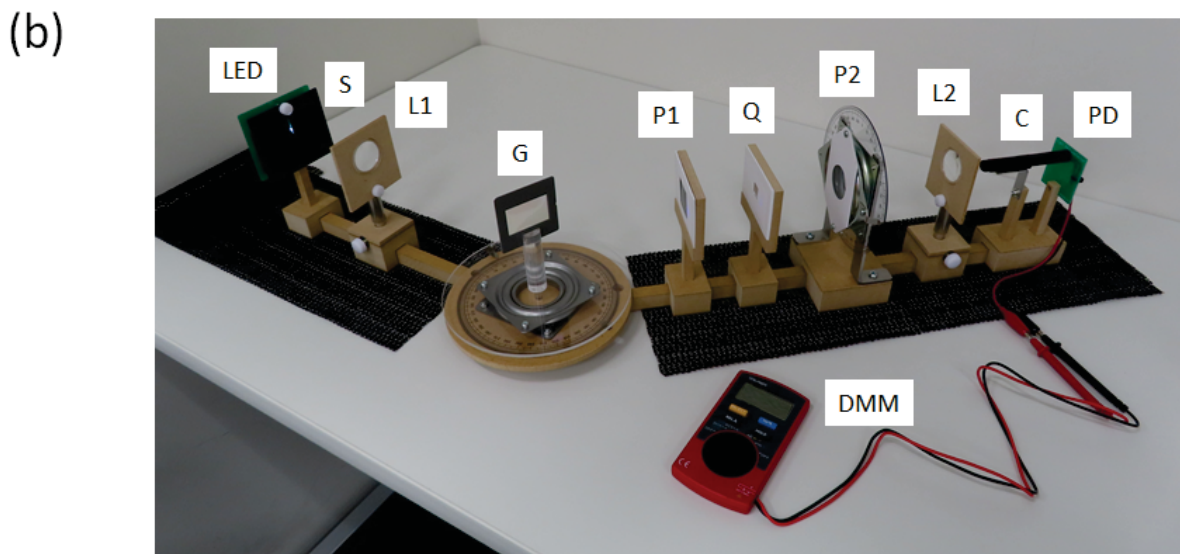
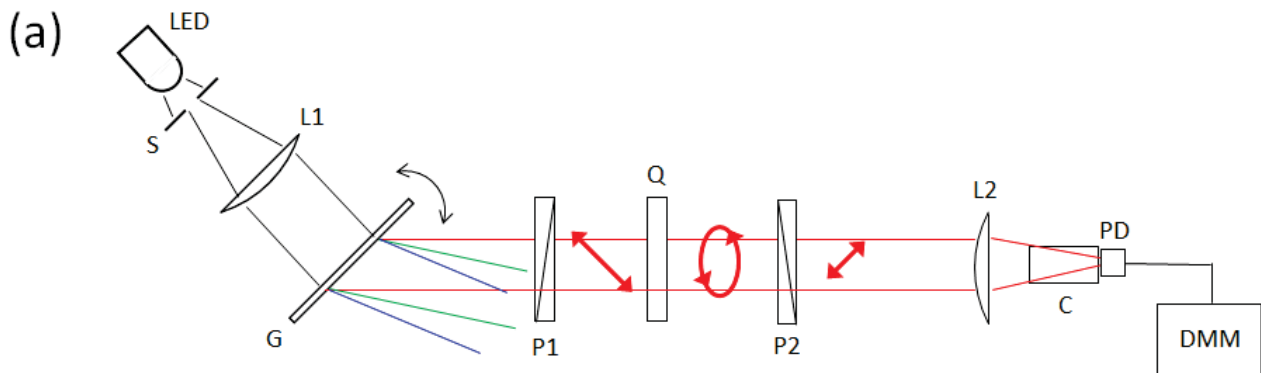
Experiment



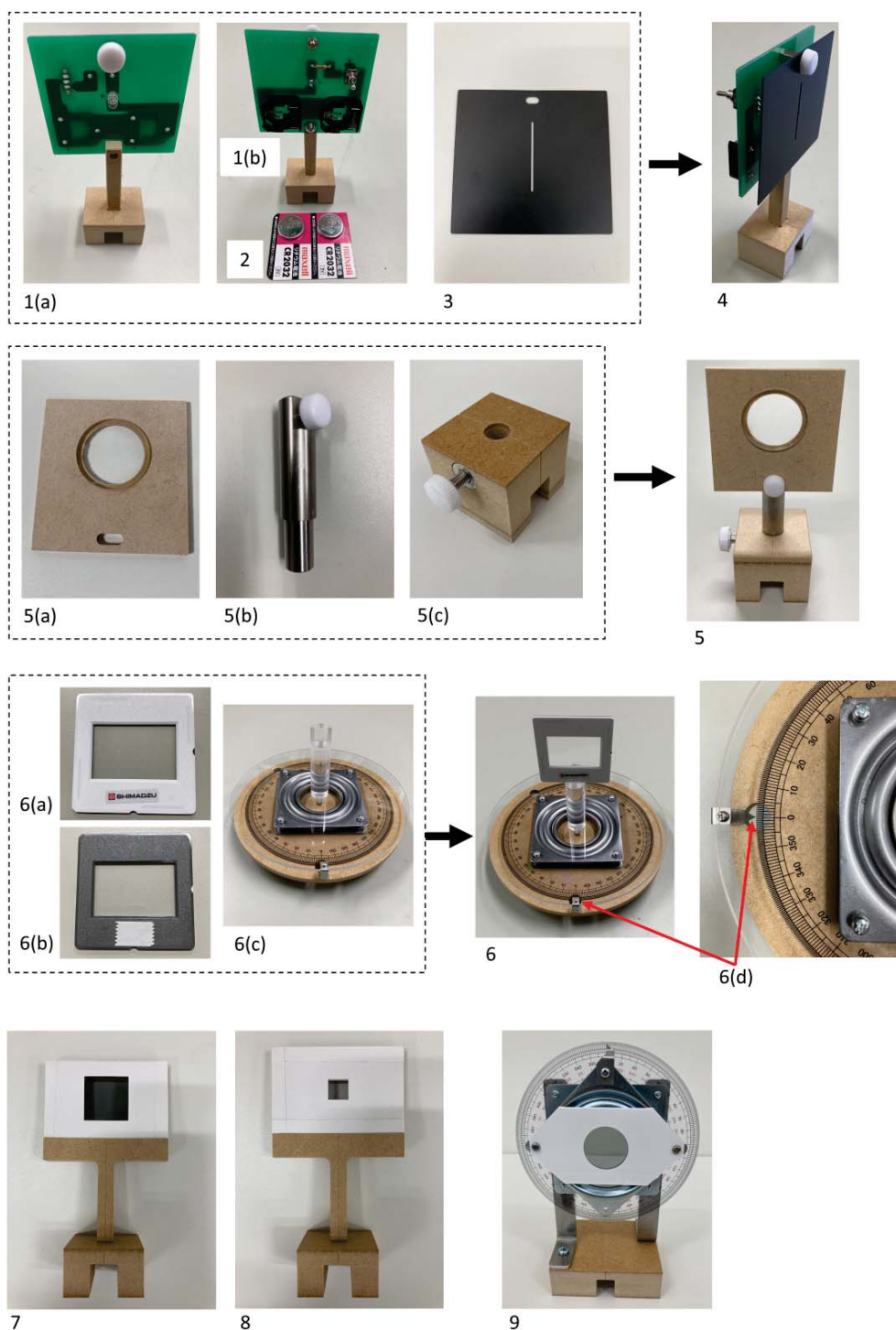
Q2-3

Greek (Greece)

τον άξονα x -του πλακιδίου χαλαζία **Q**. Κάθε μία από τις πολωμένες, μετά την διέλευσή τους από το **Q**, συνιστώσες του φωτός, η μία παράλληλη και η άλλη κάθετη στην διεύθυνση πόλωσης **P1**, επιλέγεται με την περιστροφή του πολωτή **P2** (αναλύτη). Ο φωτοανιχνευτής **PD** μετρά την ένταση του φωτός.

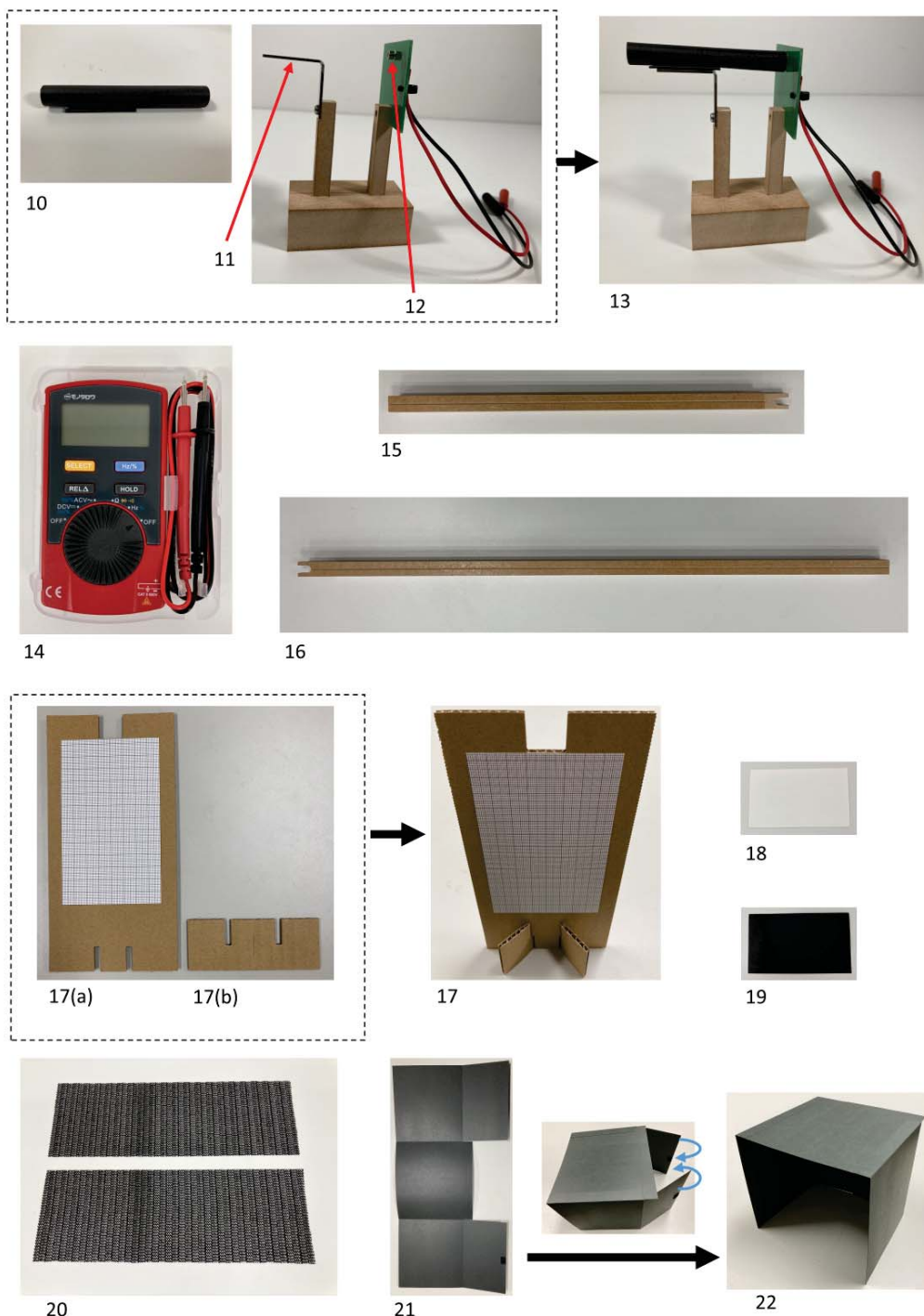


Σχήμα 3: (α) Σχηματική αναπαράσταση και (β) φωτογραφική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης μέτρησης πάχους. **LED**: LED λευκού φωτός, **S**: σχισμή, **L1**: φακός συμβολομετρίας, **G**: φράγμα περίθλασης, **P1**: πολωτής, **Q**: πλάκα χαλαζία, **P2**: πολωτής (αναλύτης), **L2**: φακός εστίασης, **C**: κύλινδρος φωτοασπίδας, **PD**: φωτοανιχνευτής, **DMM**: ψηφιακό πολύμετρο.



Σχήμα 4: Εξαρτήματα και συσκευές: **1(α)**. LED λευκού φωτός (εμπρόσθια όψη)- **1(β)**. LED λευκού φωτός (οπίσθια όψη)- **2**. μπαταρίες- **3**. σχισμή (**S** στο Σχ. 3)- **4**. LED με προσαρτημένη σχισμή- **5**. φακός (**L1**, **L2** στο Σχ. 3)- **5(α)** φακός τοποθετημένος - **5(β)** στήριγμα (στήλος) φακού- **5(γ)** βάση στήλου- **6**. φράγμα περίθλασης (**6(α)** εμπρόσθια όψη- **6(β)** οπίσθια όψη με αυτοκόλλητη ταινία) σε **6(γ)** περιστρεφόμενη βάση (**G** στο Σχ. 3)- **6(δ)** διάταξη ανάγνωσης μέτρου γωνίας στην περιστρεφόμενη βάση - **7**. πολωτής (**P1** στο Σχ. 3)- **8**. πλακίδιο χαλαζία (**Q** στο Σχ. 3)- **9**. πολωτής (αναλύτης) στην περιστρεφόμενη βάση (**P2** στο Σχ. 3).

Experiment



Σχήμα 5: Εξαρτήματα και συσκευές (συνέχεια): **10.** κύλινδρος φωτοασπίδας με μαγνήτη (**C** στο σχήμα 3)- **11.** βάση κυλίνδρου- **12.** φωτοανιχνευτής (**PD** στο σχήμα 3)- **13.** φωτοανιχνευτής με κύλινδρο- **14.** ψηφιακό πολύμετρο (**DMM** στο σχήμα 3)- **15.** μικρού μήκους ράγα οδήγησης- **16.** μεγάλου μήκους ράγα οδήγησης- **17.** κλίμακα μετρήσεων- **18.** λευκή κάρτα- **19.** μαύρη κάρτα- **20.** αντιολισθητικά φύλλα- **21 & 22.** κουτί φωτοασπίδας (πριν και μετά από τη συναρμολόγηση).

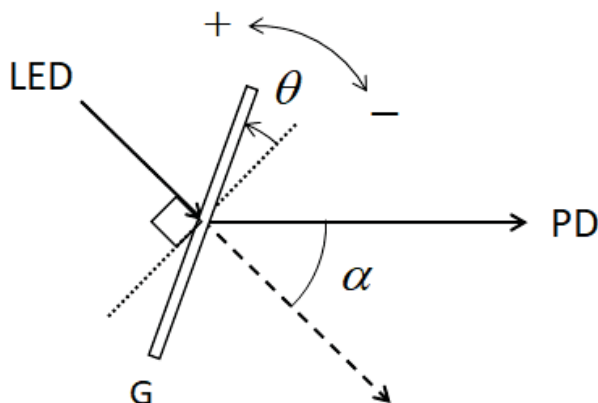
Μέρος Α. Ρύθμιση του συστήματος μέτρησης (2,3 μονάδες)

Το φως της LED προσπίπτει στην επιφάνεια του φράγματος περίθλασης (Σχ. 6). Η γωνία περιστροφής θ του **G** για κάθετη πρόσπτωση ορίζεται ως 0° . Η αντιωρολογιακή και η ωρολογιακή περιστροφή συμβολίζονται με $+$ και $-$, αντίστοιχα. Η προσέγγιση πρώτης τάξης της γωνίας περίθλασης α ορίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα. Χρησιμοποιώντας την περίοδο d στο αυλάκι ρύθμισης (ή διακριτική ικανότητα της σχισμής) της θέσης του **G**, το μήκος κύματος λ δίνεται ως προς το θ ως εξής

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

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

Στη συνέχεια να χρησιμοποιείτε την τιμή $d = 1.00 \mu\text{m}$ και για την γωνία περίθλασης της σταθερή τιμή $\alpha = 40.0^\circ$.



Σχήμα 6: Η γωνία περιστροφής θ του φράγματος περίθλασης **G** και η γωνία περίθλασης α .

A.1	Να υπολογίσετε την μεγαλύτερη τιμή μήκους κύματος λ που μπορεί να μετρηθεί και το αντίστοιχο θ .	0.3 pt
------------	---	--------

A.2	Να υπολογίσετε τις τιμές του θ για $\lambda = 440 \text{ nm}$.	0.2 pt
------------	--	--------

Οι διαδικασίες ρύθμισης του συστήματος μέτρησης έχουν ως εξής:

[1] Τοποθετήστε την κλίμακα μετρήσεων σε όρθια θέση (**17** στην Εικ. 5) χρησιμοποιώντας το στήριγμα (**17(β)**).

[2] Τοποθετήστε δύο μπαταρίες στην μονάδα LED λευκού φωτός. Οι πλευρές "+" πρέπει να είναι στραμμένες προς το μέρος σας.

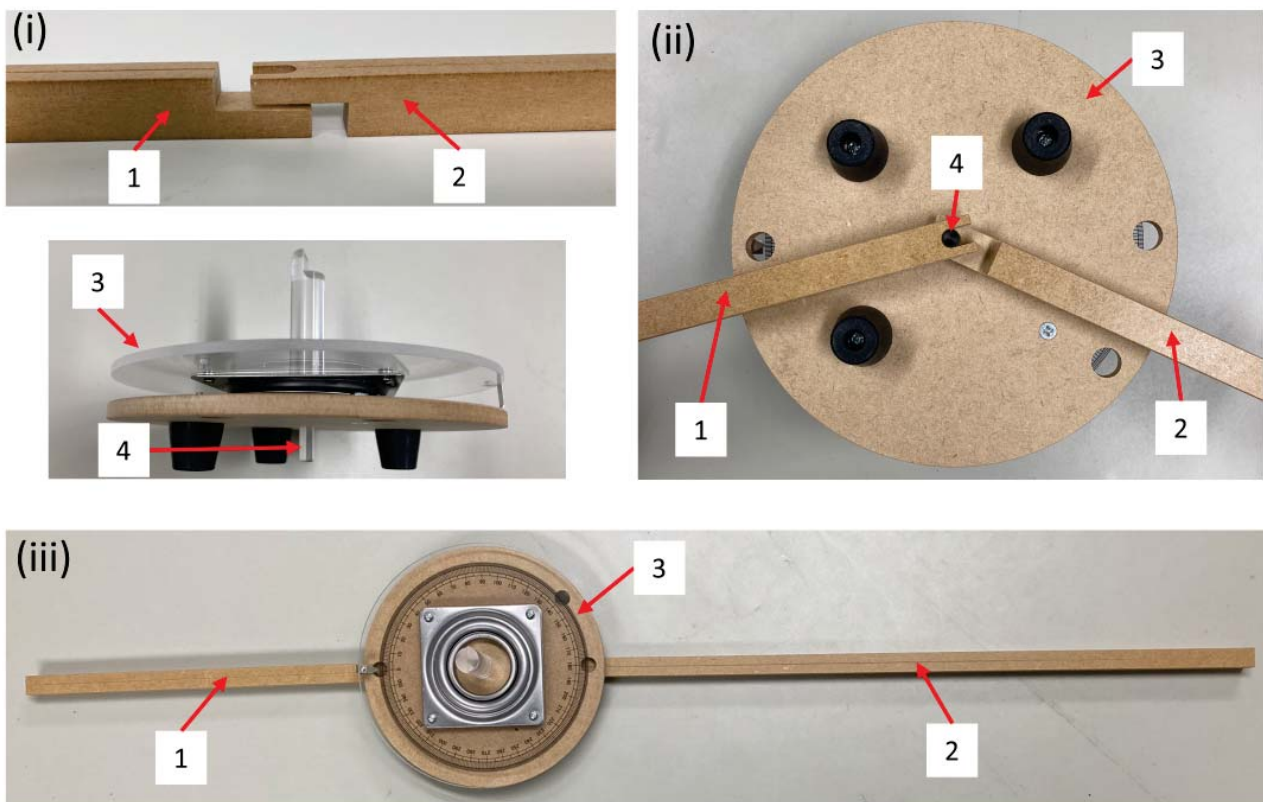
[3] Ανάψτε την LED.

[4] Αφαιρέστε τη βίδα στην εμπρόσθια πλευρά της μονάδας LED. Συνδέστε τη σχισμή στη μονάδα LED με τη βίδα (**4** στην Εικ. 4). Χρησιμοποιώντας την κλίμακα μετρήσεων, ρυθμίστε τη θέση της σχισμής

Experiment

ώστε η ροή του εκπεμπόμενου λευκού φωτός να είναι η πιο φωτεινή και μετρήστε το ύψος του κέντρου της δέσμης στην έξοδο της σχισμής (για την διαδικασία [9]).

[5] Φέρτε σε επαφή το ανοικτό άκρο με εγκοπή σχήματος U της ράγας οδήγησης μεγάλου μήκους με εκείνο της ράγας μικρού μήκους (Σχ. 7(i)). Εισάγετε τον άξονα περιστροφής που προεξέχει από την κάτω πλευρά της περιστρεφόμενης βάσης στην "εικονική διαμπερή οπή" που δημιουργείται από τις ράγες οδήγησης (Σχ. 7(ii)). Εξασφαλίστε την ελεύθερη και ομαλή περιστροφή και των δύο βραχιόνων γύρω από τον άξονα σύμφωνα με το Σχ. 7(iii). Βεβαιωθείτε ότι η ράγα οδήγησης μεγάλου μήκους θα παραμείνει στο τραπέζι $0^\circ \leq \alpha \leq 40.0^\circ$.



Σχήμα 7: (i) Ανοικτό άκρο με εγκοπή σχήματος U της ράγας οδήγησης μικρού μήκους κάτω από το αντίστοιχο άκρο της ράγας οδήγησης μεγάλου μήκους, που δημιουργεί μια "εικονική" διαμπερή οπή. (ii) Μέσα στην εικονική οπή, εισάγετε τον άξονα που προεξέχει από την κάτω πλευρά της περιστρεφόμενης βάσης. (iii) Άνω όψη της περιστρεφόμενης βάσης με τις ράγες οδήγησης που είναι ελεύθερες να περιστρέφονται γύρω από τον άξονα. 1. Ράγα οδηγού μικρού μήκους- 2. Ράγα οδηγού μεγάλου μήκους- 3. Περιστρεφόμενη βάση- 4. Άξονας της περιστρεφόμενης βάσης.

[6] Ευθυγραμμίστε την κεντρική γραμμή της ράγας οδήγησης μικρού μήκους με τις 0° στην κλίμακα της περιστρεφόμενης βάσης και διατηρήστε την σε αυτή τη θέση. Μπορείτε να τοποθετήσετε ένα αντιολισθητικό φύλλο κάτω από τη ράγα.

[7] Συναρμολογήστε τους φακούς (5 στην Εικ. 4).

[8] Τοποθετήστε τη λευκή μονάδα LED με τη σχισμή και το φακό (L1 στην Εικ. 3) στη ράγα οδήγησης

μικρού μήκους. Ρυθμίστε την απόσταση μεταξύ της σχισμής και του **L1**, έτσι ώστε το μέγεθος της δέσμης φωτός μετά τη διέλευσή της από το **L1** να παραμένει σχεδόν σταθερό, δηλ. ευθυγραμμισμένο, σε όλη την διάρκεια της διαδρομής.

[9] Χρησιμοποιώντας την κλίμακα μετρήσεων, μετρήστε το ύψος της ακτίνας μετά το **L1**. Ρυθμίστε τη στάθμη του **L1** χαλαρώνοντας τη βίδα ρύθμισης της βάσης του στύλου και μετακινώντας τον στύλο όπως είναι απαραίτητο, ώστε το ύψος της δέσμης να είναι σχεδόν το ίδιο με αυτό ακριβώς μετά τη σχισμή.

[10] Ευθυγραμμίστε τον άξονα της ράγας οδήγησης μεγάλου μήκους με τις 180° στην κλίμακα της περιστρεφόμενης βάσης.

[11] Ρυθμίστε την οριζόντια θέση της βάσης του φακού (**5(a)**) στην Εικ. 4) χαλαρώνοντας τη βίδα και μετακινώντας την δεξιά ή αριστερά. Το κέντρο της δέσμης μετά το **L1** θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί με την κεντρική γραμμή της ράγας οδήγησης μεγάλου μήκους. Μπορείτε να τοποθετήσετε την κλίμακα μετρήσεων ανάποδα πάνω από τη ράγα μεγάλου μήκους.

[12] Αποκαλύψτε την δεύτερη επιφάνεια της αυτοκόλλητης ταινίας διπλής όψης και κολλήστε την στην οπίσθια πλευρά του φράγματος περίθλασης (**6(β)**) στο Σχ. 4) στην κορυφή του άξονα της περιστρεφόμενης βάσης (**6** στο Σχ. 4).

[13] Στρέψτε την εμπρόσθια πλευρά του φράγματος προς την πηγή φωτός και περιστρέψτε την βάση, έτσι ώστε το ανακλώμενο φως να εισέρχεται στη σχισμή, δηλαδή $\theta = 0^\circ$ (κάθετη πρόσπτωση). Καταγράψτε τη γωνία θ_{stage} της περιστρεφόμενης βάσης. Θα χρησιμοποιηθεί στο ερώτημα B.1.

[14] Μετακινήστε την ράγα οδηγού μεγάλου μήκους γύρω από τον άξονα έτσι ώστε $\alpha = 40.0^\circ$ (Σχ. 6). Αφού οριστικοποιήσετε την θέση της, μπορείτε να τοποθετήσετε στη συνέχεια ένα άλλο αντιστοιχιστικό φύλλο για να αποτρέψετε την συμπτωματική απώλεια ευθυγράμμισης.

[15] Τοποθετήστε τον φακό (**L2** στο Σχ. 3) και τον φωτοανιχνευτή (**PD** στο Σχ. 3) με την βάση κυλίνδρου στη ράγα μεγάλου μήκους. Για να εστιάσετε το διαθλώμενο φως στον **PD**, ρυθμίστε την απόσταση μεταξύ **PD** και **L2** κατά μήκος της ράγας μεγάλου μήκους, καθώς και το ύψος του **L2**. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η διάμετρος της κατακόρυφης δέσμης. Ελέγξτε τη διάμετρο της δέσμης με τη λευκή κάρτα. Σε περίπτωση που είναι πολύ ασθενής για να την διακρίνετε με γυμνό μάτι, χρησιμοποιήστε το κουτί φωτοασπίδας για να καλύψετε το **PD**.

[16] Τοποθετήστε τον κύλινδρο φωτοασπίδας στο στήριγμα (**13** στην Εικ. 5). Η φωτοασπίδα ελαχιστοποιεί το ανεπιθύμητο φως που θα ανιχνευθεί.

[17] Συνδέστε το **PD** στο DMM. Το κόκκινο (μαύρο) καλώδιο πηγαίνει στον κόκκινο (μαύρο) ακροδέκτη. Ρυθμίστε το πολύμετρο στη λειτουργία μέτρησης τάσης συνεχούς ρεύματος.

[18] Ρυθμίστε το ύψος του **L2** για να μεγιστοποιήσετε τις ενδείξεις του DMM. Στο εξής η ένταση του φωτός θα προσδιορίζεται από τις τιμές τάσης στο DMM.

- | | | |
|------------|--|--------|
| A.3 | Στρέψτε την περιστρεφόμενη βάση και βρείτε τη γωνία θ και το αντίστοιχο μήκος κύματος λ_{peak} όπου μεγιστοποιείται η φασματική πυκνότητα της LED μπλε φωτός, θεωρώντας ότι $\alpha = 40.0^\circ$. Εάν η απάντησή σας για το λ_{peak} είναι μεταξύ 450 και 460 nm, η συσκευή σας είναι σωστά ευθυγραμμισμένη- σημειώστε το $\alpha = 40.0^\circ$ στο φύλλο απαντήσεων και συνεχίστε. Διαφορετικά, θα πρέπει να βρείτε την πραγματική τιμή του α . Χωρίς να αλλάξετε τίποτα, συμπεριλαμβανομένης της αρχικής σας τιμής για το λ_{peak} , βρείτε μια διορθωμένη τιμή για το α που θα κάνει το λ_{peak} να εμπίπτει στο κατάλληλο διάστημα τιμών. Καταγράψτε αυτό το α στο φύλλο απαντήσεων και χρησιμοποιήστε το για το υπόλοιπο του προβλήματος. | 0.8 pt |
|------------|--|--------|

[19] Να τοποθετήσετε τους πολωτές (**P1** και **P2** στο Σχ. 3) στη ράγα οδήγησης μεγάλου μήκους.

A.4 Να ρυθμίσετε την περιστρεφόμενη βάση στη θέση $\theta = -15.0^\circ$. Να παρακολουθήσετε τις ενδείξεις στο DMM και να βρείτε τη γωνία $\varphi_\perp$ της βάσης περιστροφής του πολωτή **P2**, ώστε η διεύθυνση πόλωσης να είναι κάθετη σε εκείνη του φωτός που διέρχεται μέσω του πολωτή **P1**. Από το αποτέλεσμα αυτό, να βρείτε τη γωνία $\varphi_\parallel$ της περιστρεφόμενης βάσης του πολωτή **P2**, όταν η διεύθυνση πόλωσης είναι παράλληλη με εκείνη του πολωτή **P1**. 0.3 pt

A.5 Τοποθετώντας την μαύρη κάρτα μπροστά από τη σχισμή, να διακόψετε το διερχόμενο φως. Με τον τρόπο αυτό, μπορείτε να εκτιμήσετε το υπόβαθρο του συστήματος, δηλαδή την μετατόπιση του σημείου μηδέν της κλίμακας μετρήσεων της έντασης. Ορίζουμε τις φωτεινές εντάσεις $I_{\text{Offset } \perp}$ και $I_{\text{Offset } \parallel}$ όταν οι γωνίες της βάσης περιστροφής του πολωτή **P2** είναι $\varphi_\perp$ και $\varphi_\parallel$, αντίστοιχα. Να μετρήσετε τις μετατοπίσεις $I_{\text{Offset } \perp}$ και $I_{\text{Offset } \parallel}$. Να λάβετε υπ' όψη σας ότι τα $I_{\text{Offset } \perp}$ και $I_{\text{Offset } \parallel}$ οφείλονται σε φως διαφορετικό από εκείνο της πηγής φωτός. Θα πρέπει να απαλειφθούν με αφαίρεση για να προσδιοριστεί η πραγματική συνεισφορά της φωτεινής πηγής. 0.2 pt

A.6 Τα $I_\perp$ και $I_\parallel$ αναφέρονται στις εντάσεις από την πηγή φωτός όταν οι γωνίες περιστροφής της βάσης στήριξης του πολωτή **P2** είναι $\varphi_\perp$ και $\varphi_\parallel$, αντίστοιχα. Να μετρήσετε τις φωτεινές εντάσεις $I_\perp$ και $I_\parallel$ για $\theta = -15.0^\circ$. 0.5 pt

Μέρος Β. Μέτρηση της έντασης του διερχόμενου φωτός (4,7 μονάδες)

Στη συνέχεια, να χρησιμοποιήσετε τις τιμές του λ που υπολογίσατε χρησιμοποιώντας τη διορθωμένη τιμή του α στο ερώτημα **A.3**, ανάλογα με τις ανάγκες.

B.1 Να τοποθετήσετε το πλακίδιο χαλαζία μεταξύ των πολωτών **P1** και **P2** και να μετρήσετε τις εντάσεις του διαδιδόμενου φωτός $I_\perp$ και $I_\parallel$ σε διάφορες γωνίες θ . Οι μετρήσεις σας θα πρέπει να καλύπτουν πλήρως το διάστημα μηκών κύματος 440 nm έως 660 nm. Να καταγράψετε σε πίνακες τις ακόλουθες παραμέτρους: θ_{Stage} (μετρήσεις γωνίας περιστρεφόμενης βάσης), θ , λ , $I_\perp$, $I_\parallel$, $I_{\text{Total}} = I_\perp + I_\parallel$, $I_{\text{Norm}} = I_\perp / I_{\text{Total}}$. Σημειώστε πως όταν η τιμή του θ_{Stage} αυξάνεται, η τιμή του θ μειώνεται ισόποσα και αντιστρόφως. Δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσετε κάθε γραμμή του παρεχόμενου πίνακα, αλλά θα πρέπει να πάρετε αρκετά δεδομένα για να λάβετε ακριβή αποτελέσματα. 2.0 pt

B.2 Να σχεδιάσετε το φάσμα της LED λευκού φωτός, δηλ. I_{Total} , ως προς το μήκος κύματος στο γράφημα. 1.0 pt

B.3 Να βρείτε το πλήρες πλάτος στο μισό μέγιστο $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ του φάσματος της LED μπλε φωτός που είναι ενσωματωμένη στη LED λευκού φωτός. Είναι το πλάτος ενός μεγίστου που μετριέται μεταξύ δύο σημείων που αντιστοιχούν στο μισό του μέγιστου πλάτους. 0.2 pt

B.4 Να σχεδιάσετε το φάσμα του I_{Norm} στη γραφική παράσταση.

1.5 pt

Μέρος Γ. Ανάλυση των μετρήσεων (3,0 μονάδες)

C.1 Από τη γραφική παράσταση I_{Norm} , να βρείτε όλα τα μήκη κύματος στα οποία η τιμή της έντασης αποτελεί τοπικό ελάχιστο. Ο αριθμός τάξης m σύμφωνα με την εξίσωση (6) πρέπει να δοθεί κάτω από το αντίστοιχο μήκος κύματος. Για τον προσδιορισμό της διπλοθλαστικότητας Δn , να χρησιμοποιήσετε τις τιμές των n_o και n_e που δίνονται στον πίνακα 1.

1.5 pt

C.2 Να υπολογίσετε το πάχος L του πλακιδίου.

1.5 pt

Πίνακας 1: Δείκτες διάθλασης n_o και n_e του χαλαζία (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						

Experiment



Q2-12

Greek (Greece)

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

Μετρήσεις πάχους με χρήση διπλοθλαστικότητας (10 μονάδες)

Μέρος Α. Ρύθμιση του συστήματος μέτρησης (2,3 μονάδες)

A.1 (0.3 pt)

$$\lambda =$$

$$\theta =$$

A.2 (0.2 pt)

$$\theta =$$

A.3 (0.8 pt)

$$\theta =$$

$$\lambda_{\text{Peak}} =$$

$$\alpha =$$

A.4 (0.3 pt)

$$\varphi_{\perp} =$$

$$\varphi_{\parallel} =$$

A.5 (0.2 pt)

$$I_{\text{Offset } \perp} =$$

$$I_{\text{Offset } \parallel} =$$

A.6 (0.5 pt)

$$I_{\perp} =$$

$$I_{\parallel} =$$

Μέρος Β. Μέτρηση της έντασης του διερχόμενου φωτός (4,7 μονάδες)

B.1 (2.0 pt)

[illegible]

[illegible]

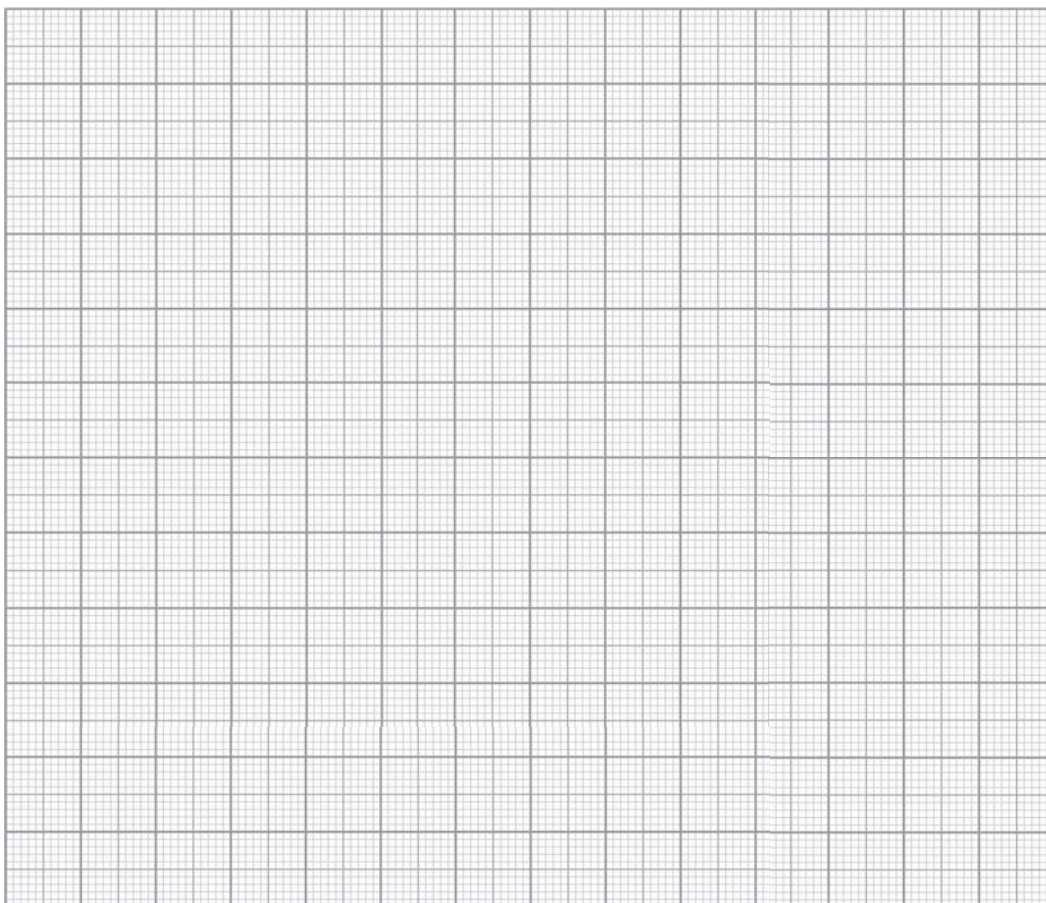
A2-5
Greek (Greece)

[illegible]

A2-6
Greek (Greece)

[illegible]

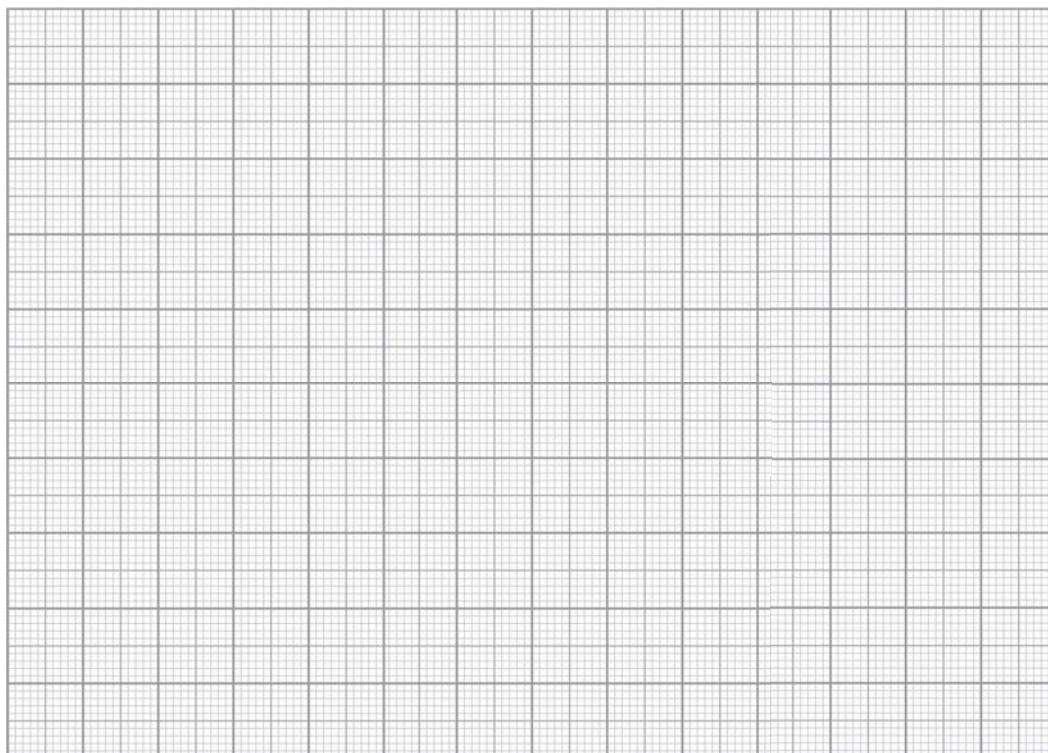
B.2 (1.0 pt)



B.3 (0.2 pt)

$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} =$

B.4 (1.5 pt)



Μέρος Γ. Αναλύση των μετρήσεων (3,0 μονάδες)

C.1 (1.5 pt)

$$\lambda =$$

$$m =$$

C.2 (1.5 pt)

$$L =$$

Experiment



W2-1

do not write on the back of this page

Experiment



W2-2

Experiment



W2-3

Experiment



W2-4

Experiment



W2-5

Experiment



W2-6

Experiment



W2-7

Experiment



W2-8

Experiment



W2-9

Experiment



W2-10

Thickness Measurements Using Birefringence (10 points)

Part A. Measurement System Setup (2.3 points)

A.1 (0.3 pt)

$$\lambda = 684 \text{ nm}$$

Correct value of $\lambda \rightarrow$ **0.2 pt**

$$\theta = 20.0^\circ$$

Correct value of $\theta \rightarrow$ **0.1 pt**

A.2 (0.2 pt)

$$\theta = -30.0^\circ, 70.0^\circ$$

Correct values of θ (0.1 each) $\rightarrow$ **0.2 pt**

A.3 (0.8 pt)

$$\theta = -28.0^\circ$$

$$\lambda_{\text{Peak}} = 458 \text{ nm}$$

$$\alpha = 40.0^\circ$$

☐ λ_{Peak} and θ fulfill Eqs. (7) and (8) $\rightarrow$ **0.1 pt**

☐ $450 \text{ nm} \leq \lambda_{\text{Peak}} \leq 460 \text{ nm} \rightarrow$ **0.5 pt** (full marks)

$440 \text{ nm} \leq \lambda_{\text{Peak}} < 450 \text{ nm}$ or $460 \text{ nm} < \lambda_{\text{Peak}} \leq 470 \text{ nm} \rightarrow$ **0.3 pt**

$430 \text{ nm} \leq \lambda_{\text{Peak}} < 440 \text{ nm}$ or $470 \text{ nm} < \lambda_{\text{Peak}} \leq 480 \text{ nm} \rightarrow$ **0.1 pt**

☐ $\alpha = 40.0^\circ$ or a corrected value of α for $450 \text{ nm} \leq \lambda_{\text{Peak}} \leq 460 \text{ nm} \rightarrow$ **0.2 pt**

A.4 (0.3 pt)

$$\varphi_{\perp} = 90^\circ \text{ or } 270^\circ$$

$85^\circ \leq \varphi_{\perp} \leq 95^\circ$ or $265^\circ \leq \varphi_{\perp} \leq 275^\circ \rightarrow$ **0.2 pt**

$$\varphi_{\parallel} = \varphi_{\perp} + 90^\circ \text{ or } \varphi_{\perp} - 90^\circ$$

Correct value of $\varphi_{\parallel} \rightarrow$ **0.1 pt**

A.5 (0.2 pt)

$$I_{\text{Offset } \perp} = 0.005 \text{ V or } 5 \text{ mV}$$

$$I_{\text{Offset } \perp} \leq 0.010 \text{ V} \rightarrow \mathbf{0.1 \text{ pt}}$$

$$I_{\text{Offset } \parallel} = 0.010 \text{ V or } 10 \text{ mV}$$

$$I_{\text{Offset } \parallel} \leq 0.020 \text{ V} \rightarrow \mathbf{0.1 \text{ pt}}$$

A.6 (0.5 pt)

$$I_{\perp} = 0.001 \text{ V or } 1 \text{ mV}$$

$$0.000 \text{ V} \leq I_{\perp} \leq 0.003 \text{ V} \rightarrow \mathbf{0.2 \text{ pt (full marks)}}$$

$$0.004 \text{ V} \leq I_{\perp} \leq 0.006 \text{ V} \rightarrow 0.1 \text{ pt}$$

$$I_{\parallel} = 0.160 \text{ V or } 160 \text{ mV}$$

$$I_{\parallel} \geq 0.100 \text{ V} \rightarrow \mathbf{0.3 \text{ pt (full marks)}}$$

$$0.050 \text{ V} \leq I_{\parallel} \leq 0.099 \text{ V} \rightarrow 0.2 \text{ pt}$$

$$0.030 \text{ V} \leq I_{\parallel} \leq 0.049 \text{ V} \rightarrow 0.1 \text{ pt}$$

Part B. Measurement of transmitted light intensities (4.7 points)**B.1** (2.0 pt)

○ Data available at $\lambda \leq 440 \text{ nm}$ → **0.1 pt**

○ Data available at $\lambda \geq 660 \text{ nm}$ → **0.1 pt**

○ Number of data points $N \geq 20$ → **0.9 pt (full marks)**

$$15 \leq N \leq 19 \rightarrow 0.6 \text{ pt}$$

$$10 \leq N \leq 14 \rightarrow 0.3 \text{ pt}$$

○ Data spacing 5 nm or less within $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ around λ_{Peak} → **0.3 pt**

○ Wavelength spacing 5 nm or less with respect to three data points around each minimum of I_{Norm} (0.2 pt each) → **0.6 pt (full marks)**

► Incorrect relation between θ and λ (each) → -0.1 pt

► Incorrect relation between $I_{\perp}$, $I_{\parallel}$, and I_{Norm} (each) → -0.1 pt

► Max deduction -2.0 pt

B.1 (2.0 pt)

$\theta_{\text{Stage}}/\text{degree}$	θ/degree	λ/nm	$I_{\perp}/\text{mV}$	$I_{\parallel}/\text{mV}$	$I_{\text{Total}}/\text{mV}$	I_{Norm}
30.5	-31	430.5	13	26	39	0.333
30	-30.5	435.1	38	31	69	0.551
29.5	-30	439.7	83	27	110	0.755
29	-29.5	444.2	166	17	183	0.907
28.5	-29	448.8	244	21	265	0.921
28	-28.5	453.3	280	80	360	0.778
27.5	-28	457.7	267	159	426	0.627
27	-27.5	462.1	188	216	404	0.465
26.5	-27	466.5	73	223	296	0.247
26	-26.5	470.9	17	197	214	0.079
25.5	-26	475.2	12	162	174	0.069
25	-25.5	479.5	19	121	140	0.136
24.5	-25	483.7	34	71	105	0.324
24	-24.5	487.9	48	43	91	0.527
23.5	-24	492.1	61	22	83	0.735
23	-23.5	496.2	72	10	82	0.878
22.5	-23	500.3	83	4	87	0.954
22	-22.5	504.3	94	8	102	0.922
21.5	-22	508.3	97	19	116	0.836

B.1 (2.0 pt)

(Continued)

$\theta_{\text{Stage}}/\text{degree}$	θ/degree	λ/nm	$I_{\perp}/\text{mV}$	$I_{\parallel}/\text{mV}$	$I_{\text{Total}}/\text{mV}$	I_{Norm}
21	-21.5	512.3	92	37	129	0.713
20.5	-21	516.3	77	68	145	0.531
20	-20.5	520.1	61	90	151	0.404
19.5	-20	524.0	35	130	165	0.212
19	-19.5	527.8	18	153	171	0.105
18.5	-19	531.6	8	166	174	0.046
18	-18.5	535.3	8	167	175	0.046
17.5	-18	539.0	14	158	172	0.081
17	-17.5	542.7	32	141	173	0.185
16.5	-17	546.3	47	127	174	0.270
16	-16.5	549.9	73	99	172	0.424
15.5	-16	553.4	93	76	169	0.550
15	-15.5	556.9	112	55	167	0.671
14.5	-15	560.3	130	34	164	0.793
14	-14.5	563.7	141	20	161	0.876
13.5	-14	567.1	147	10	157	0.936
13	-13.5	570.4	148	6	154	0.961
12.5	-13	573.7	146	6	152	0.961
12	-12.5	576.9	138	10	148	0.932

B.1 (2.0 pt)

(Continued)

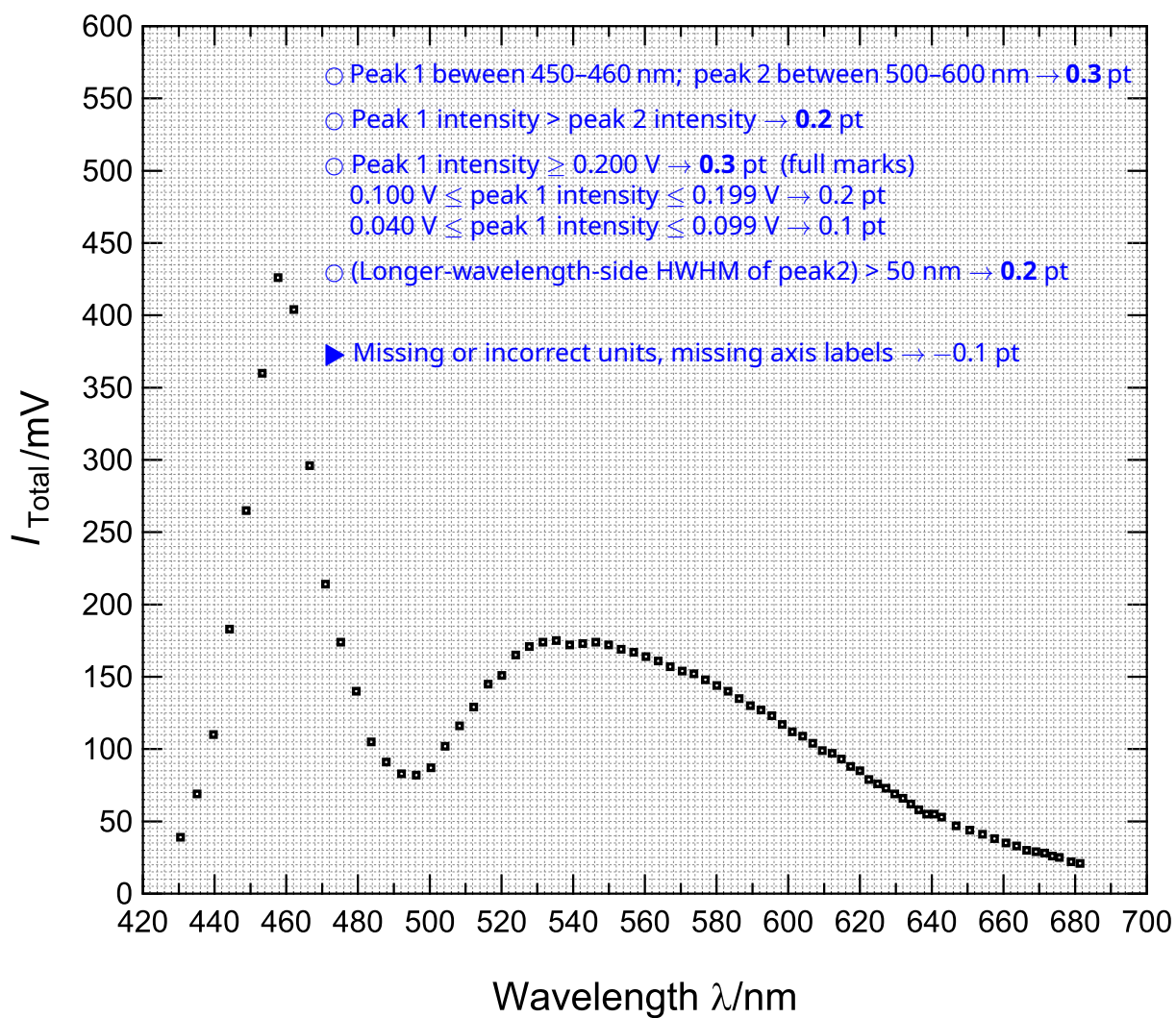
$\theta_{\text{Stage}}/\text{degree}$	θ/degree	λ/nm	$I_{\perp}/\text{mV}$	$I_{\parallel}/\text{mV}$	$I_{\text{Total}}/\text{mV}$	I_{Norm}
11.5	-12	580.1	127	17	144	0.882
11	-11.5	583.2	114	26	140	0.814
10.5	-11	586.3	97	38	135	0.719
10	-10.5	589.4	80	50	130	0.615
9.5	-10	592.4	67	60	127	0.528
9	-9.5	595.4	54	69	123	0.439
8.5	-9	598.3	41	76	117	0.350
8	-8.5	601.1	31	81	112	0.277
7.5	-8	604.0	22	87	109	0.202
7	-7.5	606.8	15	89	104	0.144
6.5	-7	609.5	8	91	99	0.081
6	-6.5	612.2	6	91	97	0.062
5.5	-6	614.8	4	89	93	0.043
5	-5.5	617.4	3	85	88	0.034
4.5	-5	620.0	4	81	85	0.047
4	-4.5	622.5	5	74	79	0.063
3.5	-4	624.9	7	69	76	0.092
3	-3.5	627.3	10	63	73	0.137
2.5	-3	629.7	12	57	69	0.174

B.1 (2.0 pt)

(Continued)

$\theta_{\text{Stage}}/\text{degree}$	θ/degree	λ/nm	$I_{\perp}/\text{mV}$	$I_{\parallel}/\text{mV}$	$I_{\text{Total}}/\text{mV}$	I_{Norm}
2	-2.5	632.0	15	51	66	0.227
1.5	-2	634.2	18	44	62	0.290
1	-1.5	636.4	21	37	58	0.362
0.5	-1	638.6	23	32	55	0.418
0	-0.5	640.7	25	30	55	0.455
-0.5	0	642.8	27	26	53	0.509
-1.5	1	646.8	29	18	47	0.617
-2.5	2	650.6	31	13	44	0.705
-3.5	3	654.2	32	9	41	0.780
-4.5	4	657.5	32	6	38	0.842
-5.5	5	660.7	31	4	35	0.886
-6.5	6	663.7	30	3	33	0.909
-7.5	7	666.5	28	2	30	0.933
-8.5	8	669.1	27	2	29	0.931
-9.5	9	671.5	26	2	28	0.929
-10.5	10	673.6	24	2	26	0.923
-11.5	11	675.6	23	2	25	0.920
-13.5	13	678.9	20	2	22	0.909
-15.5	15	681.4	18	3	21	0.857

B.2 (1.0 pt)

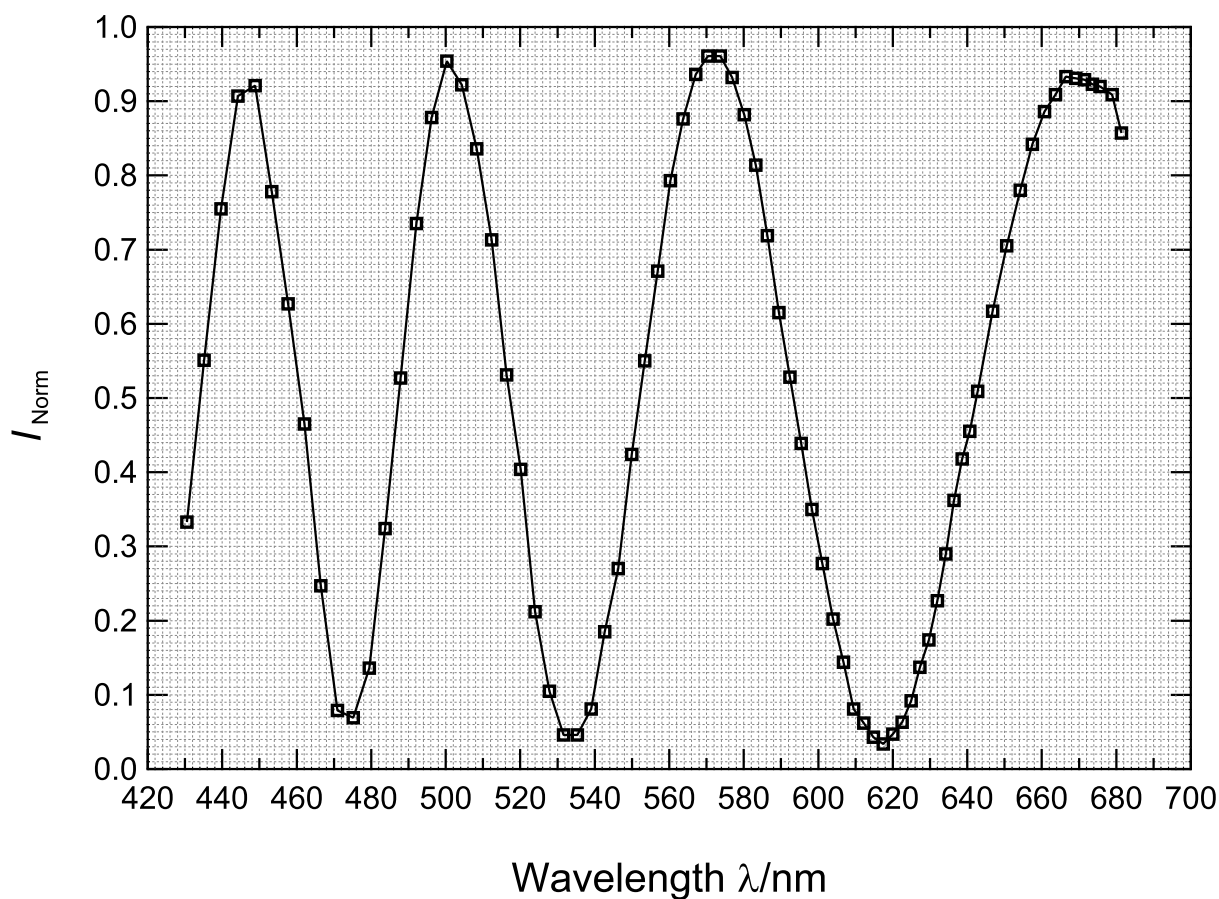


B.3 (0.2 pt)

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 25 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \leq 40 \text{ nm} \rightarrow \mathbf{0.2 \text{ pt}}$$

B.4 (1.5 pt)



- Three local minima such that $I_{\text{Norm}} \leq 0.3 \rightarrow \mathbf{0.6}$ pt (full marks)
Two local minima such that $I_{\text{Norm}} \leq 0.3 \rightarrow 0.3$ pt
- Local minimum height $I_{\text{Norm}} \leq 0.2$ (0.1 pt each) $\rightarrow \mathbf{0.3}$ pt (full marks)
- Three or more local maxima such that $I_{\text{Norm}} \geq 0.7 \rightarrow \mathbf{0.6}$ pt (full marks)
Two local maxima such that $I_{\text{Norm}} \geq 0.7 \rightarrow 0.3$ pt
- Missing or incorrect units, missing axis labels $\rightarrow -0.1$ pt

Part C. Analyses of Measured Results (3.0 points)

C.1 (1.5 pt)

$$\lambda = 473 \text{ nm}, 534 \text{ nm}, 617 \text{ nm}$$

$$455 < \lambda < 479 \text{ nm} \rightarrow \mathbf{0.4 \text{ pt}} \text{ (full marks)}$$

$$444 \text{ nm} < \lambda \leq 455 \text{ nm} \text{ or } 479 \text{ nm} \leq \lambda < 490 \text{ nm} \rightarrow 0.2 \text{ pt}$$

$$513 < \lambda < 539 \text{ nm} \rightarrow \mathbf{0.4 \text{ pt}} \text{ (full marks)}$$

$$500 \text{ nm} < \lambda \leq 513 \text{ nm} \text{ or } 539 \text{ nm} \leq \lambda < 553 \text{ nm} \rightarrow 0.2 \text{ pt}$$

$$590 < \lambda < 620 \text{ nm} \rightarrow \mathbf{0.4 \text{ pt}} \text{ (full marks)}$$

$$575 \text{ nm} < \lambda \leq 590 \text{ nm} \text{ or } 620 \text{ nm} \leq \lambda < 636 \text{ nm} \rightarrow 0.2 \text{ pt}$$

$$m = 8, \quad 7, \quad 6$$

Correct values of m consistent with Eq. (6) (0.1 pt each) $\rightarrow \mathbf{0.3 \text{ pt}}$ (full marks)

C.2 (1.5 pt)

$$L = 407 \text{ } \mu\text{m}$$

With respect to $\Delta L \equiv L - 400 \text{ } \mu\text{m}$

$$|\Delta L| < 10 \text{ } \mu\text{m} \rightarrow \mathbf{1.5 \text{ pt}} \text{ (full marks)}$$

$$10 \text{ } \mu\text{m} \leq |\Delta L| < 20 \text{ } \mu\text{m} \rightarrow 1.2 \text{ pt}$$

$$20 \text{ } \mu\text{m} \leq |\Delta L| < 30 \text{ } \mu\text{m} \rightarrow 0.8 \text{ pt}$$

$$30 \text{ } \mu\text{m} \leq |\Delta L| < 40 \text{ } \mu\text{m} \rightarrow 0.4 \text{ pt}$$

$$40 \text{ } \mu\text{m} \leq |\Delta L| < 50 \text{ } \mu\text{m} \rightarrow 0.1 \text{ pt}$$