



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Εργαστήριο Φυσικής III - Οπτική

Πέτρος Ρακιτζής

Τμήμα Φυσικής

3. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ FABRY-PEROT

1. Σκοπός

- Παρατήρηση της συμβολής πολλαπλών δεσμών (multiple-beam interference) φωτός που προέρχεται από μονοχρωματική σύμφωνη πηγή Laser
- Μέτρηση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας του Laser
- Χαρακτηρισμός του συμβολομέτρου Fabry-Perot

2. Στοιχεία Θεωρίας

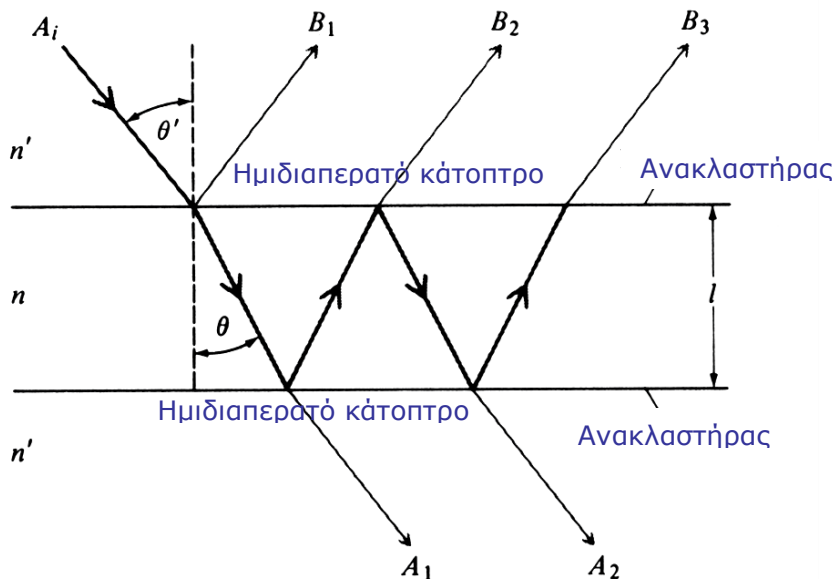
Βασική προαπαιτούμενη γνώση

Serway, Physics for Scientists & Engineers, Τόμος ΙΙΙ, Κεφ. 37.1, 37.2, 37.3, 37.4, 37.6 (συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων παραδειγμάτων και προβλημάτων).

2.1 Συμβολή πολλαπλών δεσμών

Έχετε ήδη ασχοληθεί με φαινόμενα συμβολής από δύο σύμφωνες δέσμες (ΦΙ). Στο πείραμά μας θα ασχοληθούμε με μια εφαρμογή συμβολομετρίας πολλαπλών δεσμών.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος παραγωγής ενός μεγάλου αριθμού σύμφωνων φωτεινών δεσμών είναι η διαίρεση κατά πλάτος. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με πολλαπλή ανάκλαση μεταξύ δύο παράλληλων ημιδιαπερατών επιφανειών. Αυτές οι επιφάνειες μπορεί να είναι π.χ. ημιδιαπερατά κάτοπτρα, ή απλώς οι δυο πλευρές ενός φιλμ, ή μιας πλάκας διαφανούς υλικού, οι οποίες ανακλούν ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ το υπόλοιπο της διαπερνά. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται σχηματικά μια τέτοια διάταξη.

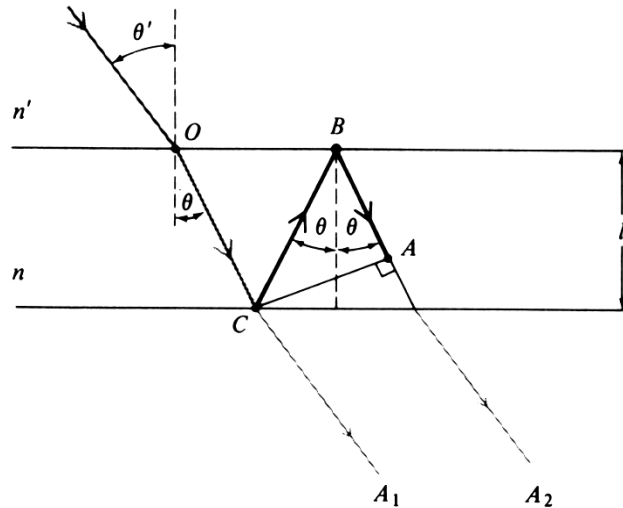


Σχήμα 1: Παράδειγμα παραγωγής σύμφωνων δεσμών από μία αρχική δέσμη, μέσω πολλαπλής ανάκλασης μεταξύ δύο ημιδιαπερατών κάτοπτρων.

Η κύρια δέσμη, προσπίπτουσα στην πρώτη επιφάνεια, κατά ένα μέρος διαδίδεται και κατά ένα μέρος ανακλάται. Το διαδιδόμενο τμήμα της εν συνεχεία ανακλάται εκ νέου και διαδοχικά από τις δύο επιφάνειες

όπως φαίνεται στο σχήμα. Μπορούμε να λύσουμε το πρόβλημα της διάδοσης ή ανάκλασης του επίπεδου κύματος δια μέσου του συμβολόμετρου, θεωρώντας τα άπειρα σε αριθμό μερικά κύματα που δημιουργούνται από τις διαδοχικές ανακλάσεις στις δύο επιφάνειες. Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο μερικών κυμάτων, που αντιστοιχεί σε μια ολόκληρη διαδρομή μέσα στο συμβολόμετρο, δίνεται από την ακόλουθη σχέση σύμφωνα με το Σχήμα 2 (η απόδειξη αφήνεται στον φοιτητή):

$$\delta = \frac{4\pi n \cos \theta}{\lambda} l \quad (1)$$



Σχήμα 2. Δύο διαδοχικές διερχόμενες ακτίνες A_1 και A_2 .

Στη σχέση (1) το λ είναι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος και θ είναι η εσωτερική γωνία πρόσπτωσης.

Αν το μιγαδικό πλάτος του προσπίπτοντος κύματος είναι A_i , τότε οι μερικές ανακλάσεις B_1 και B_2 κλπ (βλ. Σχήμα 1) δίνονται από τις σχέσεις

$$B_1 = r A_i, \quad B_2 = t t' r' A_i e^{i\delta}, \quad B_3 = t t' r'^3 A_i e^{2i\delta}, \dots \quad (2)$$

όπου r είναι ο συντελεστής ανακλάσεως (δηλ. ο λόγος του πλάτους του ανακλώμενου κύματος προς το προσπίπτον), t είναι ο συντελεστής διαδόσεως για κύματα που προχωρούν από το υλικό με δείκτη n' προς το υλικό με δείκτη διάθλασης n , και r' και t' είναι οι αντίστοιχες ποσότητες για κύματα που διαδίδονται από το υλικό n στο υλικό n' . Το μιγαδικό πλάτος του ολικού ανακλώμενου κύματος είναι:

$$A_r = B_1 + B_2 + B_3 + \dots = \{ r + t t' r' e^{i\delta} (1 + r'^2 e^{i\delta} + r'^4 e^{2i\delta} + \dots) \} A_i \quad (3)$$

Αντίστοιχα, για το κύμα που διαδίδεται έχουμε:

$$A_l = t t' A_i, \quad A_2 = t t' r'^2 e^{i\delta} A_i, \quad A_3 = t t' r'^4 e^{2i\delta} A_i \quad (4)^2$$

Προσθέτοντας τους όρους βρίσκουμε για το μιγαδικό πλάτος του ολικού κύματος που διαπερνά το σύστημα των κατόπτρων βρίσκουμε:

² όπου ο συντελεστής φάσης $e^{i\delta}$ που αντιστοιχεί στο απλό πέρασμα μέσω της πλάκας και που είναι κοινός για όλους τους όρους, έχει παραληφθεί.

$$A_t = tt' (1 + r'^2 e^{i\delta} + r'^4 e^{2i\delta} + \dots) \quad (5)$$

Παρατηρούμε ότι οι όροι μέσα στις παρενθέσεις στις εξισώσεις (3) και (5) είναι όροι γεωμετρικής σειράς οπότε έχουμε:

$$A_t = \frac{(1 - e^{i\delta})\sqrt{R}}{1 - Re^{i\delta}} A_i \quad (6)$$

και

$$A_t = \frac{T}{1 - Re^{i\delta}} A_i \quad (7)$$

όπου χρησιμοποιήσαμε τη σχέση $r' = -r$, τη σχέση $r^2 + tt' = 1$, που εκφράζει την αρχή διατηρήσεως της ενέργειας για κάτοπτρα χωρίς απώλειες, καθώς και τους ορισμούς, $R \equiv r'^2 = r^2$ και $T \equiv tt'$, για την ανακλαστικότητα (reflectance) και διαπερατότητα (transmittance) ενός κατόπτρου αντίστοιχα.

Η ένταση του διαδιδόμενου κύματος είναι $I_T = A_T A_T^*$, οπότε από την (7) βρίσκουμε³ ότι

$$I_T = I_o \frac{T^2}{(1 - R)^2} \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (8)$$

όπου

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2} \quad (9)$$

ο λεγόμενος **συντελεστής λεπτότητας ή ευδιακρισίας** (coefficient of finesse), που αποτελεί ένα μέτρο του πόσο λεπτοί/ευδιάκριτοι είναι οι κροσσοί συμβολής. Ο όρος $1/\left(1 + F \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\right)$ της εξίσωσης (8)

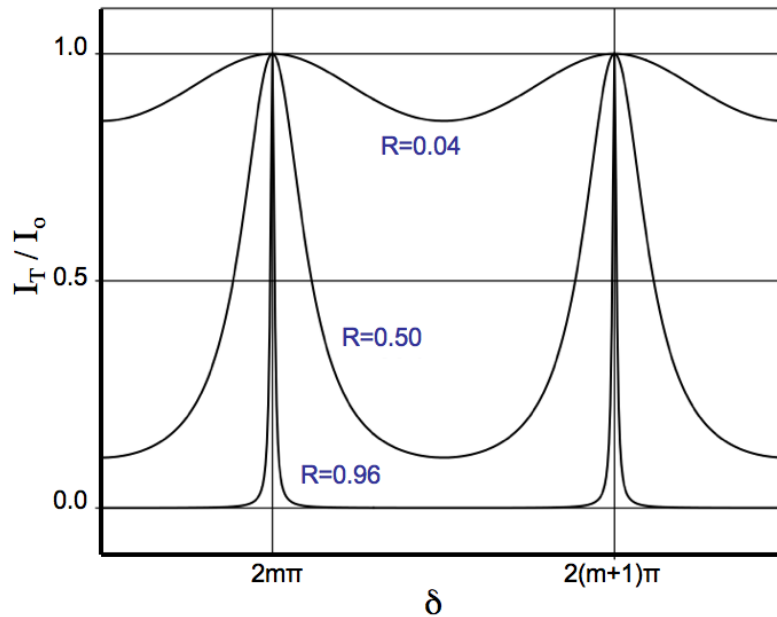
λέγεται **συνάρτηση του Airy**.

Η γενική συμπεριφορά των συναρτήσεων Airy φαίνεται στο Σχήμα 3, όπου παρουσιάζουμε μια γραφική παράσταση της εξίσωσης (8) στην οποία ο λόγος I_T/I_o έχει κανονικοποιηθεί ως προς R , ώστε το μέγιστο του να είναι πάντα μονάδα. Οι καμπύλες αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές της ανακλαστικότητας R , και απεικονίζουν την κατανομή έντασης των κροσσών συμβολής για συμβολή πολλαπλών δεσμών. Παρατηρήστε ότι εάν η μεταβλητή $\delta/2$ είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του π , δηλαδή $\delta/2 = m\pi$, όπου m ακέραιος, τότε η συνάρτηση του Airy έχει μέγιστο για κάθε F (και R) και επομένως η ένταση του διαδιδόμενου κύματος I_T είναι επίσης μέγιστη. Η συνθήκη για μέγιστα μπορεί να γραφεί και ως (χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1),

$$2m\pi = \frac{4\pi}{\lambda_o} nl \cos\theta \quad (10)$$

Ο ακέραιος, m , ονομάζεται **τάξη συμβολής** (order of interference).

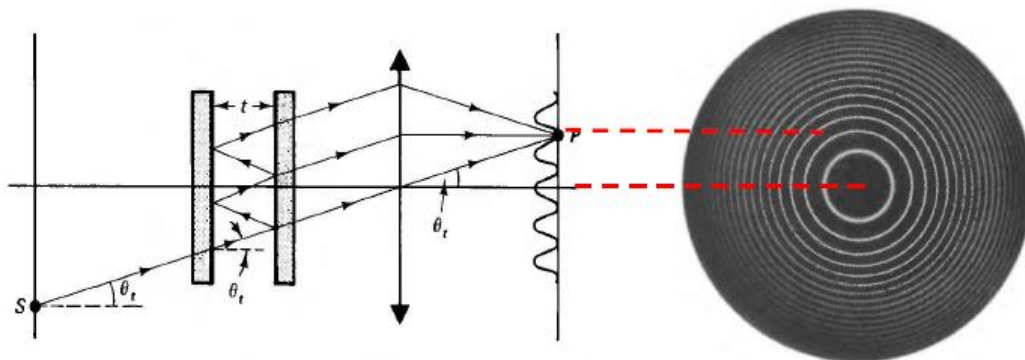
³ Οι πράξεις αφήνονται ως άσκηση για τον φοιτητή.



Σχήμα 3: Γραφική παράσταση του στο λόγο I_T/I_0 της εξίσωσης (8) ως συνάρτηση του δ , για διάφορες τιμές του R , που μας δείχνουν τη συνέπειες της συνάρτησης Airy στην ένταση του διαδιδόμενου κύματος.

2.2 Συμβολόμετρο Fabry-Perot

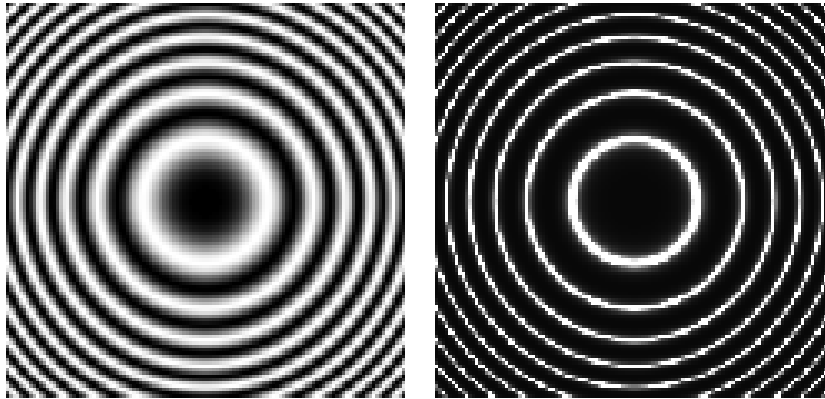
Το συμβολόμετρο αυτό, που χρησιμοποιεί τις αρχές συμβολής πολλαπλών δεσμών, σχεδιάστηκε για πρώτη φορά από τους Fabry και Perot το 1899. Χρησιμοποιείται για την ακριβή μέτρηση μήκους κύματος, και για την μελέτη της λεπτής δομής φασματικών γραμμών. Το συμβολόμετρο Fabry-Perot αποτελείται από δύο επίπεδες μερικώς ανακλαστικές επιφάνειες από γυαλί ή quartz, που διατηρούνται με ακρίβεια σε παραλληλία μεταξύ τους. Εάν η απόσταση μεταξύ των πλακών μπορεί να μεταβάλλεται με κάποιο μηχανισμό, τότε η συσκευή λέγεται «συμβολόμετρο». Εάν η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών παραμένει σταθερή τότε μιλάμε για το «έταλον» Fabry-Perot. Οι επιφάνειες των δύο πλακών πρέπει να είναι εξαιρετικά επίπεδες (με ακρίβεια από 1/20 μέχρι 1/100 του λ !) και παράλληλες για να μπορεί να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή λεπτότητα των κροσσών. Στο Σχήμα 4 φαίνεται μια τυπική διάταξη συμβολόμετρου F-P.



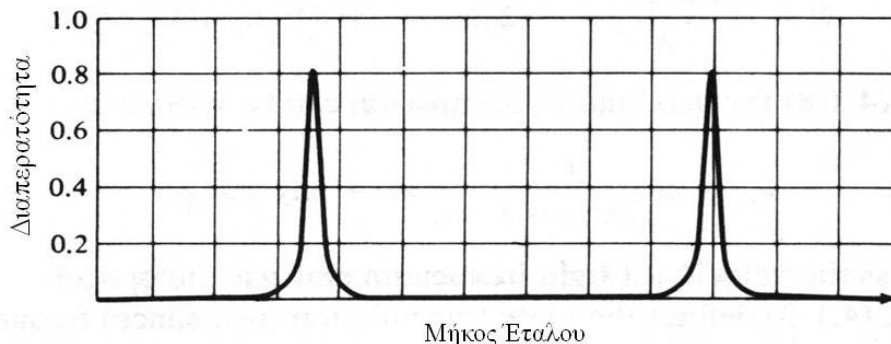
Σχήμα 4: Τυπική πειραματική διάταξη ενός Fabry-Perot μεταβλητού μήκους. Στην περίπτωση (όπως εδώ) που το πέτασμα είναι αρκετά μακριά δεν γίνεται χρήση φακού κατά την έξοδο. Η γωνία θ_i είναι μικρή αλλά όχι 0.

Συνήθως, όπως στην περίπτωση του πειράματός σας, μπροστά από το συμβολόμετρο F-P τοποθετείται ένας φακός. Το αποτέλεσμα είναι η γωνία πρόσπτωσης στην πρώτη πλάκα, θ , να είναι διαφορετική,

ανάλογα με το σημείο πρόσπτωσης. Σύμφωνα με την (2.1-10), η συνθήκη για μέγιστα θα είναι διαφορετική για τις διαφορετικές γωνίες. Έτσι, στην έξοδο του συμβολομέτρου (π.χ. σε ένα πέτασμα που μπορεί να έχει τοποθετηθεί εκεί) θα δημιουργηθούν ομόκεντροι κροσσοί συμβολής, που λέγονται **κροσσοί ίσης κλίσης** (βλ. Σχήμα 5). Ένας άλλος τρόπος χρήσης του F-P χρησιμοποιεί την λεγόμενη μέθοδο σάρωσης (scanner method). Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε στη έξοδο το κέντρο του συστήματος των δακτυλίων. Η σάρωση επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ των πλακών, είτε μηχανικά, είτε οπτικά (αλλάζοντας π.χ. σταδιακά την πίεση του αέρα μεταξύ των πλακών, μεταβάλλοντας έτσι τον δείκτη διάθλασης, άρα και τον οπτικό δρόμο). Η ένταση του κέντρου του δακτυλίου μπορεί να καταγραφεί με ένα φωτόμετρο. Με αυτό τον τρόπο παίρνουμε ένα διάγραμμα του συστήματος των κροσσών (βλ. Σχήμα 6), που ουσιαστικά ταυτίζεται με την συνάρτηση Airy.



Σχήμα 5: Κροσσοί συμβολής ίσης κλίσης, για μονοχρωματική πηγή, (αριστερά) με χαμηλό finesse, (δεξιά) με υψηλό finesse.



Σχήμα 6. Πειραματική καμπύλη διαπερατότητας ενός Fabry-Perot έταλου στα 632.8 nm ως συνάρτηση του οπτικού δρόμου του έταλου με $R=0.9$ και $A=0.98$. Τα δύο μέγιστα στο σχήμα αντιστοιχούν σε μεταβολή της οπτικής διαδρομής $\Delta(nl) = \lambda/2$.

2.2.1 Ελεύθερο Φασματικό Εύρος

Η συνθήκη της εξίσωσης (10) μπορεί να γραφεί και ως:

$$v_m = m \frac{c}{2nl \cos \theta} \quad (11)$$

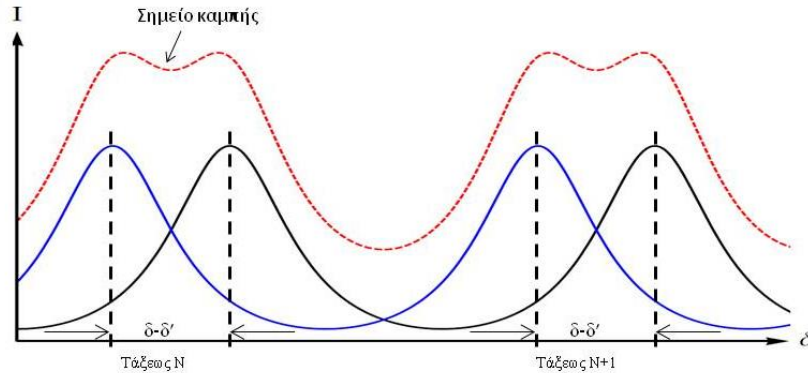
όπου, m , ακέραιος και $v = c/\lambda$. Για καθορισμένα l και θ η εξίσωση (11) ορίζει τις συχνότητες εκείνες για τις οποίες η διαπερατότητα του F-P είναι μέγιστη (μονάδα, αν δεν έχουμε απορροφήσεις). Αυτές οι συχνότητες απέχουν μεταξύ τους κατά

$$\Delta \nu = \nu_{m+1} - \nu_m = \frac{c}{2nl \cos \theta} = FSR \quad (12)$$

που ονομάζεται *περιοχή μη διάδοσης ή ελεύθερο φασματικό εύρος* (free spectral range = FSR) του F-P.

2.2.2. Διακριτική Ικανότητα Fabry-Perot

Ας υποθέσουμε ότι ένα φάσμα αποτελείται από δύο πολύ κοντινές συχνότητες, ν , και ν' . Η κατανομή έντασης που θα προκύψει (από το F-P) θα είναι στην ουσία μια επικάλυψη δυο συστημάτων κροσσών συμβολής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Κατανομή έντασης για δυο μονοχρωματικές δέσμες που περνάνε από ένα συμβολόμετρο F-P.

Εάν υποθέσουμε ότι οι δυο συνιστώσες είναι ίσης έντασης, η τελική κατανομή έντασης θα είναι το άθροισμα των δύο αντίστοιχων συναρτήσεων Airy (βλέπε εξίσωση 8) δηλ.

$$I_T = I_o \frac{T^2}{(1-R)^2} \left(\frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} + \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta'}{2}\right)} \right) \quad (13)$$

όπου $\delta \approx 4\pi\nu l/c$ (σύμφωνα με την εξίσωση 1, για κάθετη πρόσπτωση, και $n \approx 1$), και $\delta' \approx 4\pi\nu' l/c$.

Λέμε ότι μπορούμε να διακρίνουμε τις δυο συχνότητες μεταξύ τους όταν το σημείο διασταύρωσης (saddle point) που φαίνεται στο Σχήμα 7, βρίσκεται στο μισό της έντασης των δυο γραμμών, δηλαδή συνολικά στο σημείο αυτό η ένταση είναι $I_s = 2x(I_o/2) = I_o$. Επομένως, στο σημείο διασταύρωσης, που είναι στη μέση της απόστασης μεταξύ των δυο συχνοτήτων, $\delta_s = (\delta - \delta')/2$, μπορούμε να γράψουμε⁴:

$$I_s = 2I_o \left(1 + F \sin^2\left(\frac{\delta - \delta'}{4}\right) \right)^{-1} = I_o \quad (14)$$

Εάν το $\delta - \delta'$ είναι μικρό, τότε

$$\delta - \delta' = 4F^{-1/2} = 2 \left(\frac{1-R}{\sqrt{R}} \right) \quad (15)$$

οπότε

$$\Delta \nu_{1/2} = \frac{c}{2\pi l} \left(\frac{1-R}{\sqrt{R}} \right) \quad (16)$$

⁴ όπου ο όρος $T^2(1-R)^{-2}$ έχει ενσωματωθεί στο I_o

που δίνει το πάχος του κροσσού στο μισό της μέγιστης έντασης, ή, ισοδύναμα, την ελάχιστη διαφορά δύο συχνοτήτων που μόλις διακρίνονται μεταξύ τους από ένα F-P μήκους l , και ανακλαστικότητας R . Μια αδιάστατη παράμετρος που χρησιμοποιείται συχνά στη συμβολομετρία είναι η **ανακλαστική λεπτότητα** (reflecting finesse) \mathcal{F} , η οποία ορίζεται ως ο λόγος του ελεύθερου φασματικού εύρους προς το πάχος του κροσσού $\delta-\delta'$ ($FSR = c / (2l)$), από εξίσωση 12, για γραμμική κυλότητα με $\theta=0$, και $n=1$), δηλαδή :

$$\mathcal{F} = \frac{\delta_{m+1} - \delta_m}{|\delta - \delta'|} = \frac{\nu_{m+1} - \nu_m}{|\nu - \nu'|} = \frac{\pi}{2} \sqrt{F} = \pi \left(\frac{\sqrt{R}}{1-R} \right) \quad (17)$$

Η τιμή του \mathcal{F} καθορίζει πόσο ευκρινείς είναι οι κροσσοί. Μεγάλες τιμές του \mathcal{F} υποδηλώνουν πιο λεπτούς και ευκρινείς κροσσούς. *Προσοχή στην διαφορά μεταξύ \mathcal{F} και F !*

Η διακριτική ικανότητα ορίζεται ως $\mathcal{R} = \nu / |\Delta\nu_{1/2}| = \lambda / |\Delta\lambda_{1/2}|$, συνεπώς από τις εξισώσεις 10, 16 και 17 έχουμε,

$$\mathcal{R} = m\pi \left(\frac{\sqrt{R}}{1-R} \right) = m \mathcal{F} \quad (18)$$

Άρα, η διακριτική ικανότητα ενός F-P εξαρτάται από την τάξη συμβολής και από την ανακλαστικότητα των κατόπτρων. Αυξάνοντας την τάξη συμβολής, η διακριτική ικανότητα μπορεί να αυξηθεί «απεριόριστα» (για δεδομένη ανακλαστικότητα). Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ των κατόπτρων, διότι $m \approx (2nl) / \lambda$. Όμως με αυτό τον τρόπο το ελεύθερο φασματικό εύρος ελαττώνεται.

3. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός αποτελείται από:

- Ένα laser He-Ne ($\lambda=632.8\text{nm}$)
- Ένα συμβολόμετρο Fabry-Perot με μικρόμετρο
- Ένα φακό εισόδου
- Ένα πέτασμα με μιλλμετρέ χαρτί

Δίνεται ότι η ανακλαστικότητα των κατόπτρων του Fabry-Perot που θα χρησιμοποιήσετε είναι $R_1 \approx R_2 \approx 80\%$, οπότε η συνολική ανακλαστικότητα R του Fabry-Perot είναι $R = \sqrt{R_1 R_2} = 0.8$.

4. Εκτέλεση του πειράματος

1. Ανοίξτε το laser και αφήστε το να θερμαίνεται το λιγότερο για 15 λεπτά.
2. Ευθυγραμμίστε το F-P (χωρίς τον φακό εισόδου), ώστε στο πέτασμά σας να παρατηρήσετε μια όσο το δυνατό πιο συμμετρική και μικρή κουκίδα.
3. Παρατηρήστε πώς μεταβάλλεται η ένταση του ειδώλου στο πέτασμα, όταν μετακινήσετε το κινούμενο κάτοπτρο, χρησιμοποιώντας το μικρόμετρο της συσκευής. Εξηγήστε το φαινόμενο.
4. Τοποθετήστε τον φακό μπροστά από το Fabry-Perot, και παρατηρήστε την εικόνα που εμφανίζεται στο πέτασμά σας. Αυτό που βλέπετε είναι **οι κροσσοί ίσης κλίσης**. Κάνετε κατάλληλες ρυθμίσεις ώστε η εικόνα να είναι όσο το δυνατόν πιο συμμετρική.
5. Μετακινήστε το κινητό κάτοπτρο με τον μικρομετρικό κοχλία και παρατηρήστε πώς μεταβάλλεται η εικόνα στο πέτασμα. Εξηγήστε.
6. Για να μετρήσετε **το μήκος κύματος του laser** αρκεί να μετρήσετε την απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κροσσών (για κάθετη πρόσπτωση). Για να το πετύχετε αυτό, μετακινείτε το μικρόμετρο αργά, μετρώντας ταυτόχρονα στο πέτασμα τον αριθμό των μεγίστων που σαρώνετε με αυτό τον τρόπο. Έστω ότι μετράτε 10 τέτοια μέγιστα. Η διαφορά της τελικής μείον την αρχική ένδειξη του μικρομέτρου θα σας δείξει πόσο έχει μετατοπισθεί η θέση του κινουμένου κατόπτρου. Από αυτά τα δεδομένα μπορείτε να υπολογίσετε το λ . *Υπόδειξη: Σύμφωνα με τις ενδείξεις του F-P ($1 \text{ div} = 1 \text{ MICRON}$) η απόσταση μεταξύ δύο ελαχίστων υποδιαίρέσεων του μικρομέτρου*

- αντιστοιχεί σε μία μετατόπιση του κινουμένου κατόπτρου κατά $\Delta l = 1 \mu\text{m}$ ή μια πλήρη περιστροφή του μικρομέτρου δηλαδή 25 υποδιαίρεσεις ισοδυναμεί με 25 μm .
7. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι προτιμότερο να μετρήσετε πολύ περισσότερα μέγιστα, π.χ. 100, και να επαναλάβετε την μέτρησή σας μερικές φορές.
 8. Είναι εύκολο να χαθείτε στο μέτρημα. Για να αποφύγετε τέτοιου είδους σφάλματα μετρήματος των αριθμών των κροσσών μπορείτε να κάνετε το εξής απλό: Πάνω στο πέτασμα μαρκάρετε με μολύβι μια γραμμή αναφοράς που να εφάπτεται κάποιου κροσσού αναφοράς στο έξω μέρος του. Μετά μετράτε όλου τους κροσσούς που περνούν από αυτή την γραμμή (καθώς αλλάζετε την απόσταση μεταξύ των κατόπτρων) μέχρι να σταματήσετε το μέτρημα με τον τελικό κροσσό να είναι ακριβώς στην ίδια θέση σχετικά με την γραμμή αναφοράς.
 9. Βρείτε το λ και το αντίστοιχο σφάλμα σ_λ . Συγκρίνετε με την τιμή που σας δίνετε για το μήκος κύματος του laser.
 10. Από την απόσταση l των κατόπτρων του F-P ($l = 3.48 \pm 0.01 \text{ mm}$ όταν το μικρόμετρο δείχνει 0), υπολογίστε το ελεύθερο φασματικό εύρος (FSR) του F-P (χρησιμοποιώντας της εξίσωση 12). Η ερώτηση αυτή μπορεί να απαντηθεί μόνο εφόσον μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια η απόλυτη απόσταση l μεταξύ των κατόπτρων. Η απόσταση αυτή έχει μετρηθεί με ακρίβεια και σας δίνεται ως $l = 3.48 \pm 0.01 \text{ mm}$ στην θέση που το μικρόμετρο δείχνει 0.00.
 11. Υπολογίστε τη λεπτότητα F (όταν $R_1 = R_2 = 0.8$) του F-P.
 12. Υπολογίστε την ανακλαστική λεπτότητα \mathcal{F} του F-P.
 13. Υπολογίστε το πάχος της γραμμής στο μισό της έντασης $\Delta \nu_{1/2}$, και την διακριτική ικανότητα \mathcal{R} του F-P, σε πρώτη και δεύτερη τάξη.
 14. Μετρήστε με στο μιλλιμετρέ χαρτί του πετάσματος το πάχος, b , του πρώτου κύκλου και την διαφορά ακτίνας πρώτου και δεύτερου, a .
 15. Από τις σχέσεις $\Delta \nu_{1/2} = \frac{b}{a} (FSR)$, και $FSR = \frac{c}{2l}$, βρείτε το πάχος της γραμμής $\Delta \nu_{1/2}$. Συγκρίνετε με την τιμή που βρήκατε προηγουμένως.

Προσοχή: Οι κροσσοί συμβολής που παρατηρείτε αλλάζουν όταν αλλάξει είτε η γεωμετρική είτε η οπτική απόσταση μεταξύ των δύο κατόπτρων. Η οπτική απόσταση μπορεί να μεταβληθεί π.χ. όταν μιλάτε, διότι τότε αυξομειώνεται η πίεση του αέρα που βρίσκεται μεταξύ των δύο κατόπτρων, άρα και ο δείκτης διάθλασης.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

Ένα laser He-Ne αποτελείται από μια οπτική κοιλότητα, δηλαδή ένα Fabry-Perot, με κάτοπτρα συγκεκριμένης ανακλαστικότητας σε μια απόσταση και ένα ενεργό υλικό το οποίο έχει ένα φάσμα εκπομπής με ένα καθορισμένο εύρος ζώνης.

Η έξοδος του laser θα αποτελείται από τις συχνότητες του F-P που βρίσκονται στην περιοχή του φάσματος εκπομπής (Βλέπετε Σχήματα 1 και 2). Οι συχνότητες του laser απέχουν απόσταση που καθορίζεται από την απόσταση των κατόπτρων ($\Delta \nu_{laser} = c / (2l_{laser})$), για $\theta \approx 0$).

Οι συχνότητες του laser έχουν ένα εύρος που καθορίζεται από την ανακλαστικότητα των κατόπτρων του

$$laser R_{laser}. \text{ Έτσι } \Delta \nu_{1/2laser} = \frac{\Delta \nu_{laser}}{\mathcal{F}} \text{ όπου } \mathcal{F} = \frac{\pi \sqrt{R_{laser}}}{1 - R_{laser}} \text{ και } R_{laser} = \sqrt{R_{1laser} R_{2laser}}.$$

Προσοχή! Οι παραπάνω τύποι αναφέρονται στους καθρέφτες του laser και όχι στους καθρέφτες του F-P!

Βιβλιογραφία

- G.R. Fowles, "Introduction to Modern Optics", DOVER, 1989
- F.L. Pedrotti S.J. and L. Fedrotti, "Introduction to optics", Prentice Hall.
- H.J. Pain, "Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων", κεφ. 10, Εκδόσεις Συμμετρία, 1993.

Σημειώματα

Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, Π. Ρακιτζής, 2014. «Εργαστήριο Φυσικής III - Οπτική». Έκδοση: 1.0. Ηράκλειο 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://opencourses.uoc.gr>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

