

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

Μετάφραση από Αγγλικά του κειμένου από τους:

Κ. ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗ , ΕΛ. ΜΑΝΑΝΑ , Γ. ΜΑΓΓΙΝΑ
και ΑΛ. ΛΕΒΑΝΤΗ

Η εξίσωση φράγματος για ένα φράγμα ανάκλασης μπορεί να γραφτεί:

$$d(\sin \theta_{inc} \pm \sin \theta_{diff}) = m\lambda \quad (1)$$

όπου d είναι η σταθερά του φράγματος, ορισμένη ως $d \equiv 1/N$ και $N \equiv$ ο αριθμός των χαραγών ανά mm. Το πρόσημο + αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου η περιθλώμενη δέσμη βρίσκεται στην ίδια πλευρά με την προσπίπτουσα δέσμη ως προς την κάθετο στην επιφάνεια του φράγματος. Το πρόσημο - αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου η προσπίπτουσα και η περιθλώμενη δέσμη βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές ως προς την κάθετο. Για απλότητα, θεωρούμε ότι η προσπίπτουσα δέσμη είναι επίπεδο κύμα και το γωνιακό της άνοιγμα είναι σχεδόν μηδέν.

Διαφορίζοντας την παραπάνω σχέση, παίρνουμε , με θ_{inc} σταθερό:

$$d(\pm \cos \theta_{diff}) d\theta_{diff} = m d \lambda$$

Αυτή η εξίσωση μας δίνει την γωνιακή ανάλυση $d\theta_{diff} / d\lambda$ του οπτικού φράγματος.

Τώρα, είμαστε έτοιμοι να μελετήσουμε τα φράγματα που βασίζονται σε μονοχρωμάτορες.

Εκτός της περίπτωσης όπου χρησιμοποιείται ισχυρή δέσμη λέιζερ, συνήθως έχουμε μικρό οπτικό άμεσο σήμα σε οποιαδήποτε γωνιακή διεύθυνση εξ' αιτίας της φασματικής ανάλυσης που έχουμε με το φράγμα. Επομένως, είμαστε αναγκασμένοι να χρησιμοποιήσουμε αντικείμενα τα οποία να συγκεντρώνουν τη δέσμη (φακούς ή κάτοπτρα τα οποία έχουν εστιακή απόσταση f) έτσι ώστε να αυξήσουμε τον λόγο του σήματος ως προς τον θόρυβο. Συνεπώς είμαστε υποχρεωμένοι να κατανοήσουμε την επίδραση της επιλεγόμενης τιμής του f στην απόδοση του φασματομέτρου (μονοχρωμάτορα).

Για να απλοποιήσουμε τη παραπάνω σχέση, θεωρούμε ότι συμβαίνει η πολύ απλή υπόθεση όταν έχουμε αυτό που ονομάζεται ρύθμιση Littrow, όπου θεωρούμε ότι

$$\theta_{inc} = \theta_{diff}$$

Αφήνεται ως άσκηση, ναδειχθεί ότι η γραμμική ανάλυση, $d\lambda / dx$ είναι :

$$d(2 \cos \theta_{diff}) f d\theta_{diff} = m d \lambda f \quad \text{ή} :$$

$$d\lambda / dx = d(2 \cos \theta_{diff}) / (mf) \quad \text{και} \quad \delta x / \delta \lambda = mf / (d 2 \cos \theta_{diff}) = mfN / (2 \cos \theta_{diff}) \equiv R_d \quad (1)$$

όπου: R_d είναι η αντίστροφη γραμμική σκέδαση

Οπότε, για $\Delta x = 1\text{mm}$, έχουμε $\Delta \lambda = 1\text{mm} \cdot 3600\text{grooves/mm} / (2 \times .20)$ αν $\cos\theta_{\text{diff}} = 0.2$, $N = 3600\text{grooves/mm}$, $f = 1000\text{mm}$, και $m = 1$.

Οπότε $\delta\lambda/\delta x = .4\text{mm} / (1000\text{mm} \times 3600) \approx 10^{-7} \cdot 10^6 \text{ nm/mm} = 0.1 \text{ Angstroms/mm}$

Αν η γραμμική ανάλυση είναι περίπου $25\mu\text{m}$ (η οποία επιβλήθηκε από τον τεμαχισμό της γραμμικής CCD στήλης), περιμένουμε ανάλυση της τάξης:

$$\Delta\lambda_{\text{limit}} \approx 0.1 \text{ Angstrom} \cdot 25 \mu\text{m} / 1000 \mu\text{m} \cdot 2.5 \times 10^{-3} \text{ nm} \quad (2)$$

Αυτό θα μπορούσε να είναι μια προσέγγιση στην οριακή ανάλυση, αλλά μπορεί να προκύψει και άλλο όριο από την ανάλυση του οπτικού φράγματος περίθλασης.

$\lambda / \Delta\lambda_{\text{limit}} \approx \text{αριθμός σχισμών} = 3600 \times 25 = 90000$ για ένα τυπικό φράγμα.

Οπότε για $\lambda = 450\text{nm}$, παίρνουμε $\Delta\lambda_{\text{limit}} \approx 0.6 \times 10^{-3} \text{ nm}$

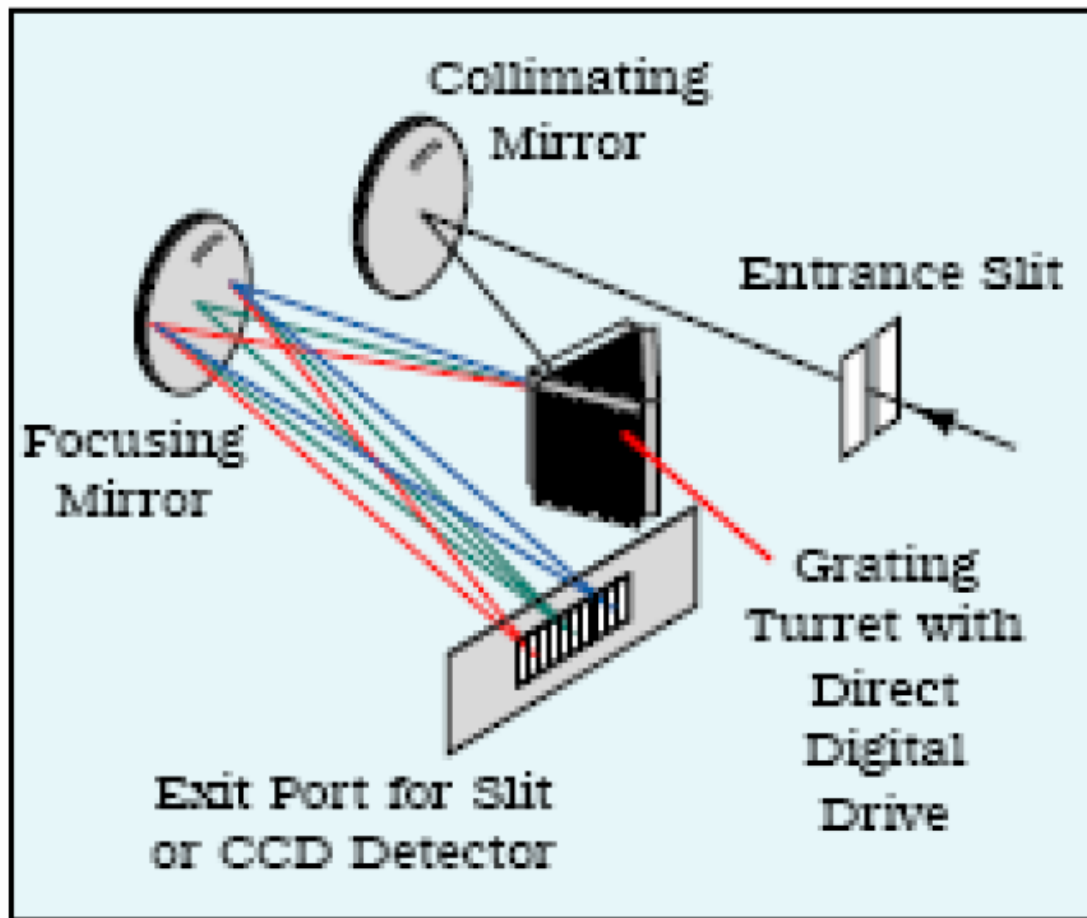
Οπότε, βλέπουμε ότι αυτή η οριακή ανάλυση που προκύπτει από το κριτήριο του Rayleigh δεν είναι αντιφατική με την σχέση (2) που δίνει την αναμενόμενη ακρίβεια του φασματοσκοπικού συστήματος που θεωρήθηκε. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξουν και άλλοι παράγοντες δύναται να επηρεάσουν αρνητικά την ανάλυση που προβλέφθηκε από την σχέση (2), όπως για παράδειγμα ο λόγος μικρού σήματος και θορύβου λόγω αδυναμίας της φασματικής γραμμής, οπτικές παρεκκλίσεις των καθρεπτών ή των φακών που χρησιμοποιούνται, το πεπερασμένο μέγεθος των σχισμών που χρησιμοποιούνται στην είσοδο των μονοχρωμάτων κτλ.

Η ακριβής ανάλυση μπορεί να ληφθεί πειραματικά μετρώντας πολλές φορές μια σχεδόν ιδανική μονοχρωματική γραμμή και ύστερα να υπολογιστεί το στατιστικό σφάλμα.

Μια άλλη άποψη της ακρίβειας του Μονοχρωμάτορα

Στη συνέχεια θα δούμε και άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν τον καθορισμό του μήκους κύματος με ακρίβεια. Αυτά απαριθμούνται ως εξής:

α) Φυσικό εύρος της γραμμής, β) Σφάλματα απεικόνισης λόγω των φακών ή των καθρεπτών οι οποίοι είναι μέρος του συστήματος του μονοχρωμάτορα, γ) φαινόμενα λόγω του μεγέθους των σχισμών (είτε στην είσοδο, είτε στην έξοδο του φασματομέτρου)



Η επίδραση του πεπερασμένου μεγέθους των σφαιρικών καθρεφτών μπορεί να υπολογιστεί με τη διαμόρφωση της αναλογίας f/d , όπου f η εστιακή απόσταση και d η ενεργή διάμετρος του καθρέφτη. Αυτή η αναλογία αποκαλείται συχνά στην οπτική ως " f /αριθμός ή $f/\#$ ή f/No ". Όσο μεγαλύτερο είναι το f/No , τόσο μικρότερη η συνεισφορά στο συνολικό σφάλμα μήκους κύματος. Ένα οπτικό όργανο με μεγάλο f/No εμφανίζει ακριβέστερη δυνατότητα απεικόνισης από ένα όργανο με μικρό f/No συντελεστή. Για αυτό έχουμε συχνά μακριά τηλεσκόπια.

Η ανάλυση ενός φασματοσκοπικού οργάνου περιορίζεται από τον παράγοντα FWHM του προφίλ του οργάνου.

Πιο συγκεκριμένα,

$$\text{FWHM} = (d\lambda^2_{(\text{σχισμής})} + d\lambda^2_{(\text{ανάλυσης})} + d\lambda^2_{(\text{γραμμής})})^{1/2}$$

Όπου,

$d\lambda^2_{\text{(σχισμής)}}$ → Δίοδος δακτυλίου καθοριζόμενη από το πεπερασμένο πλάτος των σχισμών του φασματόμετρου και από την γραμμική διασπορά του φραγματος.

$d\lambda^2_{\text{(ανάλυσης)}}$ → Η περιορισμένη ανάλυση του φασματόμετρου που περιλαμβάνει αποκλίσεις του συστήματος, φαινόμενα περίθλασης του συστήματός μας καθώς και το πάχος της γραμμής εκπομπής του laser του συστήματος *.

και,

$d\lambda^2_{\text{(γραμμής)}}$ → το φυσικό πάχος γραμμής της φασματικής γραμμής που εξετάζεται.

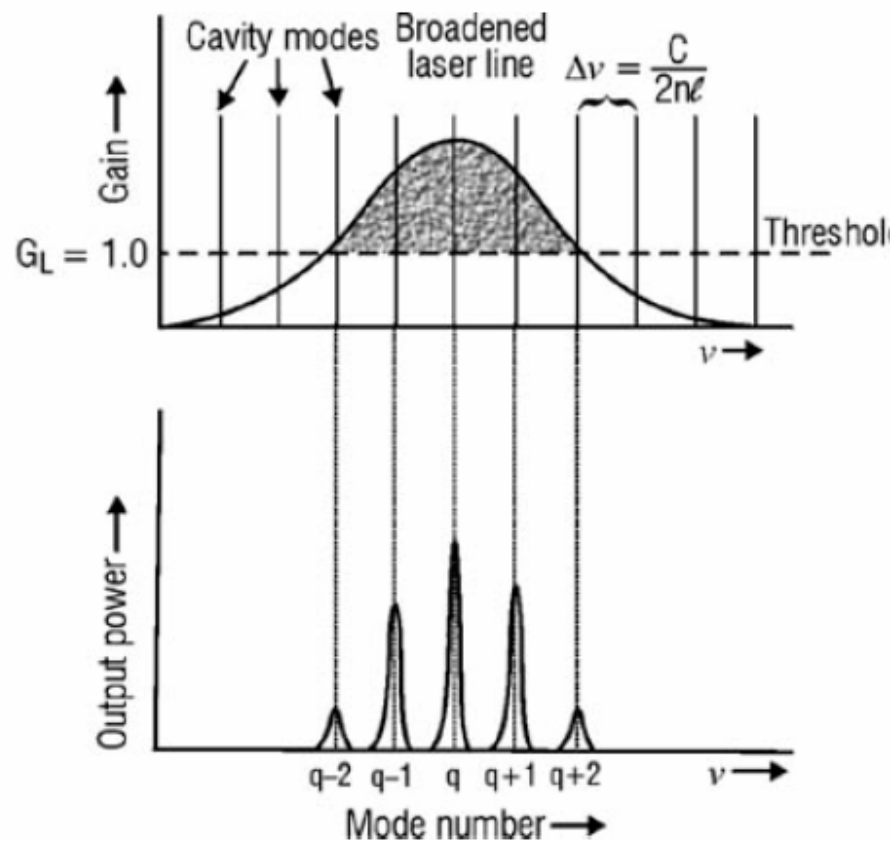
Αυτός ο παράγοντας FWHM αποτελεί το όριο της ανάλυσης του φασματόμετρου.

* Στην περίπτωση που το φασματοσκοπικό όργανο εξετάζει μία γραμμή εκπομπής laser.

Πως υπολογίζουμε το FWHM του προφίλ του οργάνου;

- Το προφίλ του οργάνου FWHM είναι κάτι το οποίο μπορεί να μετρηθεί πειραματικά.
- $d\lambda^2_{\text{(γραμμής)}}$: Παρατηρώντας και μόνο την γραμμή εκπομπής ενός laser με ένα φασματόμετρο, μπορούμε να περιορίσουμε την διεύρυνση του FWHM εξαιτίας του φυσικού εύρους της φασματικής γραμμής **.
- $d\lambda^2_{\text{(σχισμής)}}$: Η δίοδος δακτυλίου εξαιτίας του πεπερασμένου πλάτους των σχισμών και του φράγματος του φασματόμετρου μπορεί να υπολογισθεί.
- $d\lambda^2_{\text{(ανάλυσης)}}$: Η περιορισμένη ανάλυση του φασματόμετρου είναι κάτι το οποίο μπορεί να βρεθεί γνωρίζοντας τις υπόλοιπες μεταβλητές της εξίσωσης FWHM.

** Δείτε το επόμενο διάγραμμα για να κατανοήσετε την θερμική διεύρυνση μιας γραμμής και την στιγμή τις κορυφές που αντιστοιχούν στους διαμήκεις ρυθμούς laser μέσα στο συγκεκριμένο εύρος γραμμής.



ΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΥΜΕ ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ (BANDPASS)

Μπορούμε να εφαρμόσουμε, για αυτό το σκοπό, την εξίσωση (1), πιο πάνω.

Επομένως, σύμφωνα με την εξίσωση (1)

$$BP = W \times R_d$$

Όπου W είναι το πλάτος της σχισμής της εισόδου ή το πλάτος της εξόδου (όποιο είναι μεγαλύτερο).

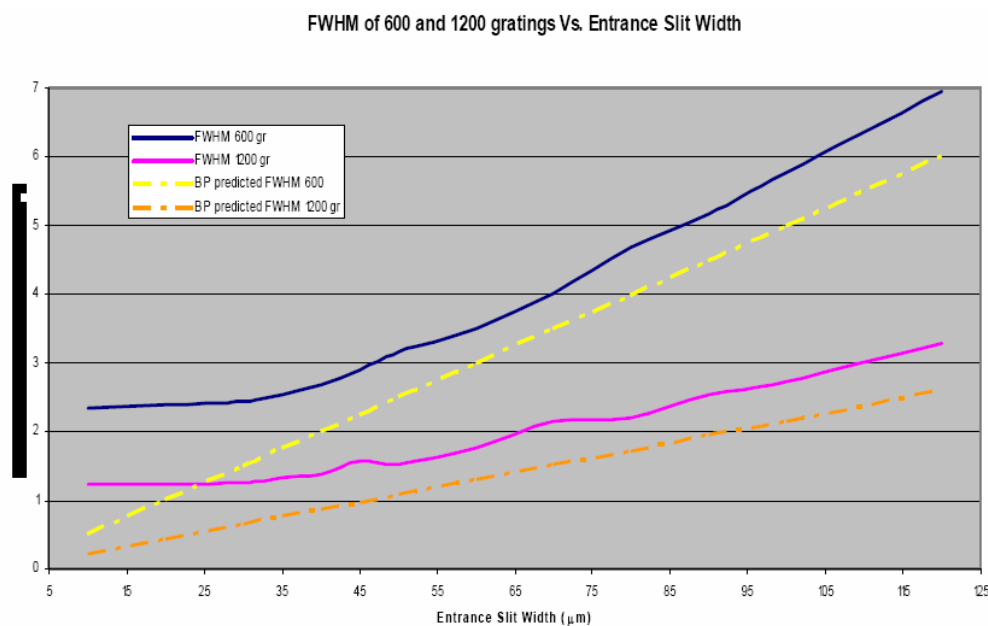
Επομένως, οφειλόμενη στην εξίσωση (1)

$$BP = WmFN(2\cos\theta_{\text{diff}}) \quad (2)$$

Έτσι, αν θέλουμε να πετύχουμε μια συγκεκριμένη δίοδο δακτυλίου, μπορούμε να διαλέξουμε την κατάλληλη αξία του πλάτους της σχισμής, W , δίνοντας και τις άλλες τιμές του m, F, N και $\cos\theta_{\text{diff}}$.

ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΗΣ ΣΧΙΣΜΗΣ W:

Θα μπορούμε να τονίσουμε, ότι έχουμε 2 σχισμές, τη σχισμή εισόδου και τη σχισμή εξόδου σε ένα μονοχρωμάτορα. Φυσιολογικά, οι δυο σχισμές πρέπει να συζευγνύονται, έτσι ώστε η σχισμή εξόδου να είναι η απεικόνιση της σχισμής εισόδου. Ωστόσο, αυτή η διαπίστωση δεν αποτελεί πάντα κάθε περίπτωση. Έτσι, προτείνουμε ότι η τιμή W τοποθετούμενη στον τύπο (2) πιο πάνω, είναι η μικρότερη από τις δύο σχισμές στην περίπτωση που είναι συζευγμένες. Εάν δεν συζευγνύονται, τιμή W πρέπει να είναι το μέρος της μικρότερης σε πλάτος σχισμής, το οποίο απεικονίζεται πάνω στην μεγαλύτερη σχισμή.



Παρουσιάζουμε στο διάγραμμα 3 ,μια βιβλιογραφική περίπτωση στην οποία το εύρος ζώνης είναι υπολογισμένο σε σχέση με την είσοδο του εύρους της σχισμής.

Στην περίπτωση που μελετάμε, στην εργαστηριακή μας άσκηση, όπου ο αριθμός συστάδων ανά χιλιοστόμετρο είναι 3600, υπολογίζουμε ότι μπορούμε να πετύχουμε 3 φορές πάνω καλύτερη δίοδο δακτυλίου από ότι σε εκείνη που αντιστοιχεί στην περίπτωση 1200 συστάδων ανά χιλιοστόμετρο, με δεδομένο ότι οι άλλοι παράγοντες είναι ίσοι.

Για να πετύχουμε το καλύτερο αποτέλεσμα που μπορεί να επιτευχθεί με ένα ccd βασισμένο σε μονοχρωματική δέσμη, πρέπει να προσέξουμε ότι κάθε ccd pixel,είναι ισομεγέθες με το ενεργό μέγεθος της σχισμής. Επομένως, πρέπει να έχουμε πάντα στο νου μας το μέγεθος του pixel.

ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΘΟΡΥΒΟ

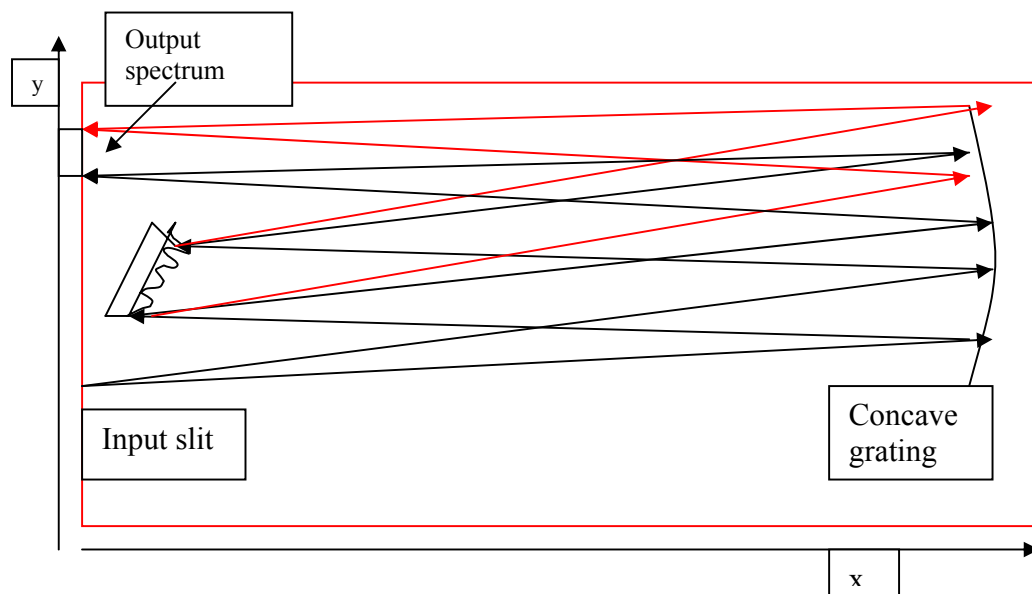
Πρέπει να έχουμε υπόψιν μας ότι συχνά η περιοχή ccd είναι πολύ μικρή αφού συνήθως το ccd έχει εμβαδόν $20\text{ }\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ ή ακόμα μικρότερο. Αυτό σημαίνει ότι το ολικό σήμα πρέπει να συγκριθεί με τον οπτικό θόρυβο, που είναι ανεξάρτητος από το προς μέτρηση οπτικό σήμα. Αυτό περιγράφεται με την λεγόμενη αναλογία σήματος με θόρυβο ή απλά S/N. Αυτό μπορεί να προσθέσει μια ακόμη αβεβαιότητα στο προς μέτρηση μήκος κύματος και επομένως έχουμε την σχέση:

$$\text{FWHM} = (d\lambda^2_{(\text{σχισμής})} + d\lambda^2_{(\text{ανάλυσης})} + d\lambda^2_{(\text{γραμμής})} + d\lambda^2_{(\text{S/N})})^{1/2}$$

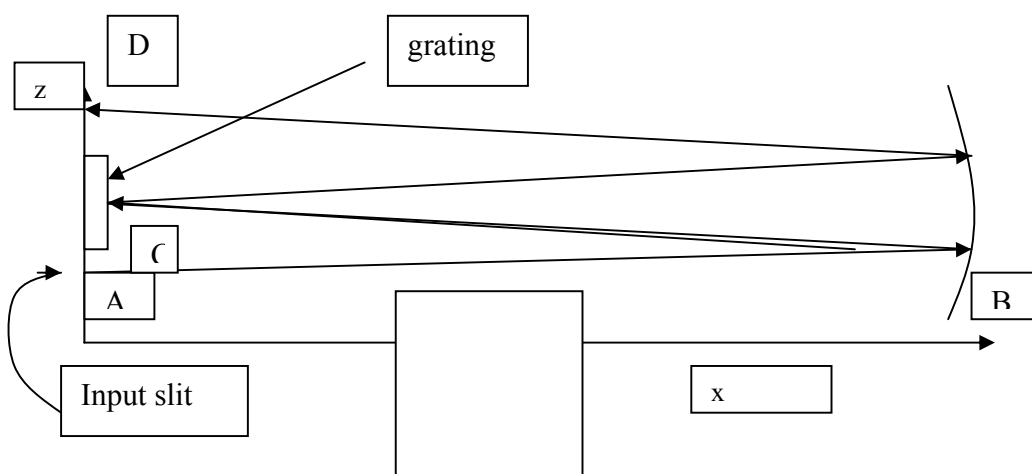
Η τελευταία σχέση είναι κατάλληλη όταν έχουμε να κάνουμε με αδύναμες γραμμές πηγών ή γραμμές με την παρουσία υπολογίσιμου οπτικού βάθους.

Εφαρμογή Θεωρίας Μονοχρωμάτορα στη σχεδίαση φασματογράφου 1 μέτρου.

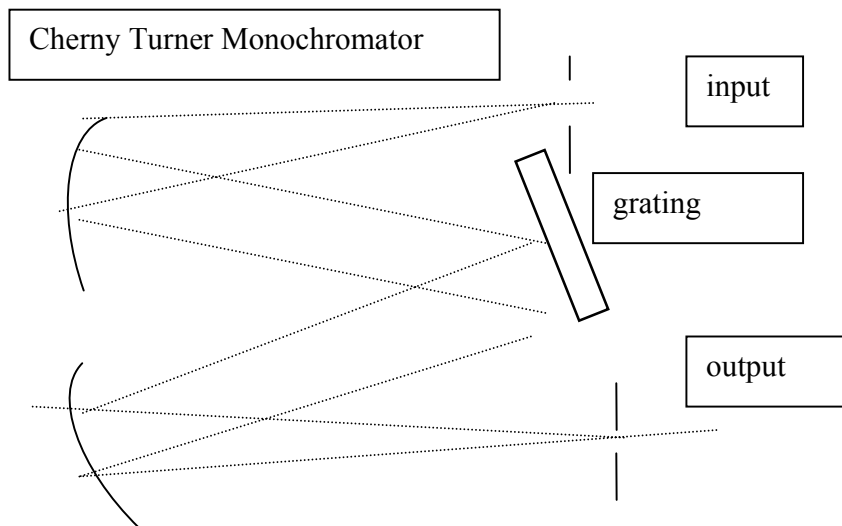
Έχοντας συζητήσει με κάποιες λεπτομέρειες τη σχεδίαση μονοχρωμάτορα, εστιάζουμε τώρα σε συγκεκριμένη υλοποίηση της ώστε να έχουμε επαρκή προσέγγιση στο θεωρητικό όριο. Έχουμε διαθέσιμο κοίλο κάτοπτρο αλουμινίου ανακλαστικότητας περίπου 93%, εστιακή απόσταση 914 mm, και διάμετρο 152 mm. Η κατάσταση αυτή φαίνεται στο σχήμα 2, στο επίπεδο xy.



Στο επίπεδο xz , η όψη μπορεί να περιγραφεί όπως φαίνεται στο σχήμα :



Σχήμα : A: input slit, B: Concave Mirror, C : Grating , D Spectrum image



Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα φράγματος

Η αποδοτικότητα εξαρτάται από:

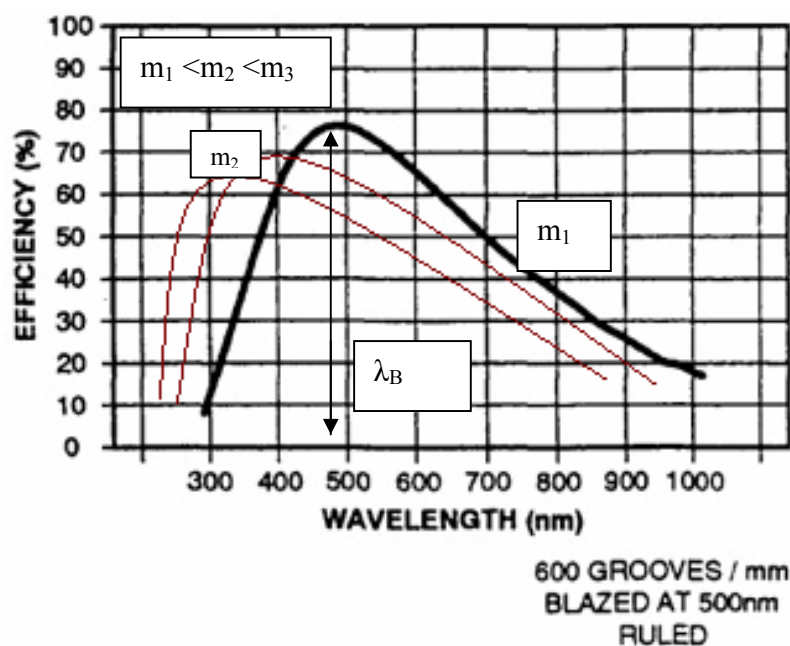
- m (τάξη περίθλασης)
- γωνίες πρόσπτωσης και περίθλασης
- λ/d
- πόλωση

P- Plane => δεν παρουσιάζει ανωμαλίες

S- Plane => παρουσιάζει ανωμαλίες

P-επίπεδο είναι φως TE πολωμένο

S- επίπεδο είναι φως TM πολωμένο



Το ως άνω γράφημα δείχνει την αποδοτικότητα, δηλαδή το ποσοστό της έντασης που κατευθύνεται, λόγω περίθλασης, προς ορισμένη γωνία, εξαρτάται από το μήκος κύματος.

Άσκηση:

Θεωρείστε το φράγμα με τις ακόλουθες παραμέτρους:

Εστιακή απόστ.(mm)	Αριθμός χαραγ./mm	λ φωτοβολ.	Γων. Φωτοβολ.	Διαστάσεις χάραξης (Hx W)
998.8	2400	580 nm	44.2°	30mm x 80mm

(α) Να προσδιορίζετε τη διακριτική ικανότητα για το φράγμα αυτό. (β) Ένας μονοχρωμάτορας κατασκευάζεται με χρήση του φράγματος αυτού, με σχισμές εισόδου και εξόδου των 50μm. Να προσδιορίσετε στην έξοδο του μονοχρωμάτορα τον παράγοντα πλακός, δηλαδή το μέγεθος $\delta\lambda/\delta x$, όπου δx είναι το εύρος της σχισμής (γ) Να προσδιορίσετε τη διακριτική ικανότητα σε μονοχρωμάτορα για τα ως άνω εύρη σχισμών. Εξετάστε την περίπτωση με μεγέθη σχισμών 20 μm, και 10 μm

Λύση:

(α) Είναι $\lambda/\Delta\lambda = \Delta\rho$. χαραγών $s \times m = 192\,000$. Έτσι, για $\lambda=580\text{ nm}$, έχουμε $\Delta\lambda = 3 \times 10^{-3}\text{ nm}$

(β)

Παράγων πλακός:

$$d\lambda/dx = d(2 \cos\theta_{\text{diff}}) / (m f) = (2 \cos\theta_{\text{diff}}) / (N m f) \approx 2 / (2400\text{mm}^{-1} \times 1000\text{mm}) = 2\text{ nm} / (2400 \times 1000 \times 10^{-6}\text{ mm}) = 0.83\text{ nm/mm}$$

(γ) Το καλύτερο που αναμένουμε είναι, ως προς την ακρίβεια, $\Delta\lambda_{\text{slit}} = (0.83\text{ nm/mm}) \times 50\text{ }\mu\text{m} = 0.04\text{ nm}$.

Για την περίπτωση των $10\text{ }\mu\text{m}$, παίρνουμε, $\Delta\lambda \approx 0.008\text{ nm}$. Να προσέχεται, ωστόσο, για φαινόμενα περίθλασης στις σχισμές, αφού σε αυτά τα μεγέθη σχισμής είμαστε σε 20 (10) φορές μικρότερη διάσταση του μήκους κύματος για ορατό φάσμα (υπέρυθρο $1\text{ }\mu\text{m}$).

1. Φράγματα διάδοσης

Στην περίπτωση αυτή, έχουμε την απλοποιημένη έκφραση,

$$d \sin \theta_{m,i} = m \lambda_i$$

όπου i είναι ο δείκτης για το μήκος κύματος υπό θεώρηση, υποθέτοντας ότι η δέσμη φωτός είναι κάθετη προς την επιφάνεια του φράγματος. Στην πραγματικότητα, έχουμε κάποια, έστω και πολύ μικρό, απόκλιση από την εντελώς κάθετη πρόσπτωση, και έτσι η ακριβής έκφραση είναι:

$$\pm d \sin\theta_{\text{in}} + d \sin \theta_{m,i} = m \lambda_i$$

με θ_{in} πολύ κοντά στο μηδέν, και έτσι $\sin\theta_{\text{in}} \approx \theta_{\text{in}}$. Για συμμετρικές τάξεις For symmetrical orders, we have :

$$d \theta_{\text{in}} - (-d \theta_{\text{in}}) + d \sin \theta_{m,i} - d \sin \theta_{-m,i} = 2 m \lambda_i$$

or

$$\theta_{\text{in}} + \sin \theta_{m,i} = m \lambda_i / d \quad (1)$$

etc.

and

$$\theta_{\text{in}} = m \lambda_i / d - |\sin \theta_{m,i}|$$

Αυτό μας δίνει μια εκτίμηση του θ_{in} . Αλλάζοντας με πολύ μικρά βήματα την γωνία (κλίση - προσανατολισμό) του grating, μπορούμε να μειώσουμε πάρα πολύ την απόλυτη τιμή της θ_{in} μέχρι να μηδενιστεί εντός των πειραματικών σφαλμάτων. Σε αυτή την περίπτωση οι γωνίες $\theta_{m,i}$ και $\theta_{-m,i}$ θα πρέπει να είναι ίσες και με αυτό τον τρόπο μπορεί

να απαλλαχθούμε από ένα συστηματικό σφάλμα. Αυτό το συστηματικό σφάλμα μπορεί να είναι το σημαντικότερο σε σφάλματα μήκους κύματος της τάξης 5-20nm!! αν δεν δώσουμε αρκετή σημασία για να εξασφαλίσουμε την καθετότητα της δέσμης προς το grating.

Από την άλλη μεριά, με τη χρήση μιας πρότυπης (καλιμπραρισμένης- calibrated) φασματικής γραμμής λ_{calib} , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (1) για να προσδιορίσουμε την τιμή της θ_{in} , και η οποία μπορεί να μας δώσει τις άγνωστες φασματικές γραμμές σε σχέση με την γραμμή λ_{calib} . Για πρότυπη γραμμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μια γραμμή από το φάσμα του Hg και συγκεκριμένα αυτή στα 586 nm, και έτσι να καθοριστεί η τιμή του μήκους κύματος στα 588nm, σε σχέση με την πρότυπη γραμμή. Αν εργαστούμε στη 4^η τάξη, τότε η πειραματική απόκλιση από την αναμενόμενη διαφορά των 2 nm είναι φυσιολογικά περίπου 1nm, που υποδεικνύει το αναμενόμενο στατιστικό σφάλμα στον καθορισμό της κορυφής που αντιστοιχεί στα 588 nm - κίτρινη γραμμή. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι το σφάλμα αυτό δεν περιλαμβάνεται σε αυτά που συζητήθηκαν παραπάνω και το οποίο οφείλεται στην μη καθετότητα της δέσμης αλλά και ίσως σε άλλους παράγοντες.

This gives us an estimate of θ_{in} . By changing in very small steps the orientation of the grating, we may reduce very much the absolute value of θ_{in} until it is zero within errors. In this case, the angles $\theta_{\text{m,i}}$ and $\theta_{\text{-m,l}}$ should be equal, and in this way, we may get rid of one important systematic error. This systematic error may lead to wavelength errors of the order of 5-20 nm!! If we do not pay enough attention to assure a perpendicular to the grating beam.

On the other hand, by using a calibrated spectral line λ_{calib} , we may use equation (1) to determine the value of θ_{in} , which we may use to determine unknown spectral lines with respect to the line λ_{calib} . Thus, we may use as calibration line the one at 586 nm of the Hg spectrum, and therefore determine the value of wavelength of the line at 588 nm with respect to the calibration line. If we work with the 4th order, then the experimental deviation from the expected 2 nm difference is normally around 1 nm, which indicates the expected statistical error in determining the peak corresponding to the 588 nm yellow line. Remember, that this error does not include the systematic error discussed above, which is due to the non perpendicular beam and perhaps to other reasons.

Vibrational spectroscopy. Atom spectroscopy:

<http://www.tau.ac.il/~phchlab/Spect2005/Spectroscopy2005-6.pdf>

Grating theory files:

1. GratingTheory-joa4_5_026

2. <http://www.stsci.edu/stsci/meetings/nhst/talks/ErikWilkinson.pdf>

3. http://www.physics.arizona.edu/~haar/ADV_LAB/ROWLAND.pdf
ROWLAND. PDF

4. **Optical grating fabrication:**

4.1 http://snl.mit.edu/papers/papers/2002/cc_SPIE2002.pdf

αρχείο:NanometerAccurateGrating....

4.2 GratingFabricationInterferenceLaserBeams

