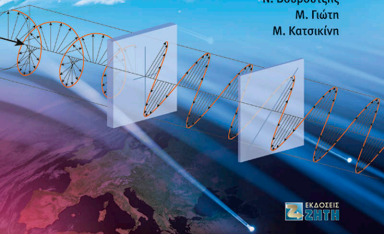


Εργαστηριακά Θέματα Οπτικής

Σ. Βες
Μ. Αγγελακέρης
Ι. Αρβανιτίδης
Ε. Βανίδης
Ε. Βίγκα
Ν. Βουρουτζής
Μ. Γιώτη
Μ. Κασικίνη



Πρόλογος

Το βιβλίο "Εργαστηριακά Θέματα Οπτικής" καλύπτει, από εργαστηριακή άποψη, τις βασικές έννοιες της Οπτικής, δηλαδή τη Συμβολή, την Περίθλαση, τη Γεωμετρική Οπτική, την Πόλωση και τον Διασκεδασμό - Απορρόφηση. Πέραν τούτου, αποτελεί και μια συνοπτική ανασκόπηση αυτών των εννοιών της Οπτικής, χωρίς βέβαια να μπορεί να θεωρηθεί ένα πλήρες σύγγραμμα Οπτικής.

Για καθεμιά από τις πέντε ενότητες, το βιβλίο παρέχει μια θεωρητική εισαγωγή με τις απαιτούμενες θεωρητικές γνώσεις για την κατανόηση των αντίστοιχων εννοιών, ένα πειραματικό μέρος στο οποίο μελετούνται αναλυτικά οι απαιτούμενες προϋποθέσεις για την εμφάνιση του φαινομένου και περιγράφονται οι κατάλληλες πειραματικές διατάξεις, οι οποίες αφενός μεν υλοποιούν τις εν λόγω προϋποθέσεις αφετέρου δε καθιστούν δυνατή την παρατήρηση σειράς σχετικών φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τις ως άνω βασικές ενότητες της Οπτικής. Τέλος παράγονται οι κατάλληλες μαθηματικές εκφράσεις για την ποσοτική μελέτη του φαινομένου.

Το βιβλίο "Εργαστηριακά Θέματα Οπτικής" καθοδηγεί επαγωγικά τους φοιτητές, να εκτελέσουν τα αντίστοιχα πειράματα, να αξιολογήσουν και να ερμηνεύσουν τα ληφθέντα πειραματικά αποτελέσματα και, τέλος, μετά την εκτέλεση της πλήρους πειραματικής άσκησης, να είναι σε θέση να απαντήσουν σε σειρά από κατάλληλα επιλεγμένες ερωτήσεις εμπέδωσης, ώστε να εξασφαλίζεται η εις βάθος κατανόηση των εκτελεσθέντων πειραμάτων. Επιπρόσθετα το βιβλίο περιέχει αναφορές και εικόνες από τεχνολογικές εφαρμογές και καθημερινά οπτικά φαινόμενα άμεσα αντιληπτά στον άνθρωπο.

Το βιβλίο αποτελεί συλλογική προσπάθεια των διδασκόντων του μαθήματος « Εργαστήριο Οπτικής», του Τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ, στην υποδομή του οποίου είναι προσαρμοσμένες οι παρατιθέμενες εργαστηριακές ενότητες. Οι διδάσκοντες παραχωρούν όλα τα έσοδα από το εν λόγω βιβλίο στο Εργαστήριο Οπτικής του Τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ, θέλοντας με τον τρόπο αυτό να εξασφαλίσουν μια, έστω και μικρή, συνεχή οικονομική ενίσχυση του Εργαστηρίου Οπτικής με στόχο τη διατήρηση και, ει δυνατόν, βελτίωση και επέκταση της υπάρχουσας εργαστηριακής υποδομής, όπως για παράδειγμα στο πεδίο της σύγχρονης Οπτικής.

Το βιβλίο είναι κατάλληλο διδακτικό εγχειρίδιο για τη μελέτη και την εκτέλεση εργαστηριακών ασκήσεων Οπτικής σε Τμήματα Φυσικής και Τμημάτων Πολυτεχνικών Σχολών των οποίων τα προγράμματα Σπουδών περιλαμβάνουν το μάθημα της Οπτικής ή της Τεχνικής Οπτικής.

Η έκδοση πραγματοποιήθηκε με τη συνεχή υποστήριξη των Εκδόσεων ΖΗΤΗ. Τους ευχαριστούμε από τη θέση αυτή.

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2012

Οι συγγραφείς

Σ. Βες (Συντονιστής)

Μ. Αγγελακέρης

Ε. Βανίδης

Ν. Βουρουτζής

Μ. Κατσικίνη

Ι. Αρβανιτίδης

Ε. Βίγκα

Μ. Γιώτη

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΣΥΜΒΟΛΗ	1
1.1. Εισαγωγή	1
1.2. Σκοπός	2
1.3. Απαιτούμενες γνώσεις	2
1.4. Συνθήκες συμβολής	4
1.4.1. Χρονική συμφωνία	4
1.4.2. Χωρική συμφωνία.....	8
1.5. Πειραματικές διατάξεις.....	9
1.6. Διατάξεις διαίρεσης μετώπου κύματος	10
1.6.1. Διάταξη Young	10
1.6.2. Κάτοπτρο του Lloyd	12
1.6.3. Πειραματική εργασία	13
1.6.4. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων	14
1.7. Διατάξεις διαίρεσης πλάτους κύματος	14
1.7.1. Διαίρεση πλάτους από επίπεδη πλάκα διηλεκτρικού	14
1.7.2. Διάταξη συμβολής του Νεύτωνα.....	16
1.7.3. Συμβολόμετρο Michelson.....	20
1.7.4. Συμβολή με γραμμικά πολωμένα σύμφωνα κύματα.....	25
1.8. Μέτρηση του μήκους συμφωνίας του φωτός	26
1.9. Εμπέδωση	27
2. ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ	29
2.1. Εισαγωγή	29
2.2. Σκοπός	30
2.3. Αρχή του Huygens και Huygens-Fresnel	30
2.4. Ολοκλήρωμα περίθλασης Fresnel- Kirchhoff	31
2.5. Η Αρχή του Babinet	33
2.6. Περίθλαση Fresnel και Περίθλαση Fraunhofer	34
2.7. Πειραματική διάταξη περίθλασης Fraunhofer	35
2.8. Περίθλαση Fraunhofer	36
2.8.1. Περίθλαση από Σχισμή	37
2.8.2. Περίθλαση από Ορθογώνιο Άνοιγμα	40
2.8.3. Περίθλαση από Κυκλική Οπή	42
2.8.4. Διακριτική Ικανότητα Συστημάτων Απεικόνισης – Κριτήριο Rayleigh	44
2.9. Περίθλαση από πολλά ανοίγματα.....	46
2.9.1. Γραμμική διάταξη N περιθλώντων ανοιγμάτων.....	47
2.10. Φράγματα περίθλασης	51
2.11. Δισδιάστατα φράγματα περίθλασης	53

2.12. Πειραματικές διατάξεις.....	54
2.12.1. Περίθλαση Fraunhofer μονοχρωματικού φωτός	54
2.12.2. Περίθλαση πολυχρωματικού φωτός με Φασματοσκόπιο	58
2.13. Εμπέδωση.....	61
3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ	63
3.1. Εισαγωγή.....	63
3.2. Σκοπός	63
3.3. Ευθύγραμμη πορεία των ακτίνων του φωτός.....	64
3.3.1. Ανάκλαση και Διάθλαση.....	65
3.3.2. Απεικόνιση	67
3.3.3. Τεχνολογικές Εφαρμογές.....	68
3.4. Απαιτούμενες Γνώσεις	69
3.4.1. Ακτίνες φωτός και διάδοση	69
3.4.2. Οπτικός δρόμος	69
3.4.3. Αρχή Fermat: Ελαχιστοποίηση του χρόνου	70
3.4.4. Αρχή της αντίστροφης πορείας του φωτός	71
3.4.5. Νόμοι της ανάκλασης και διάθλασης του φωτός	71
3.4.6. Διάθλαση του φωτός από οπτικό πρίσμα	73
3.4.7. Φακοί και Διάθλαση	75
3.4.8. Σφάλματα φακών	85
3.5. Πειραματικές διατάξεις.....	87
3.5.1. Γενικές Παρατηρήσεις-Σημεία Προσοχής.....	87
3.5.2. Οδηγός αναγνώρισης των στοιχείων των φακών	87
3.5.3. Μέτρηση του δείκτη διάθλασης υγρού με ολική ανάκλαση	87
3.5.4. Μέτρηση του δείκτη διάθλασης στερεού διαφανούς υλικού με ολική ανάκλαση	89
3.5.5. Μέτρηση της γωνίας ελάχιστης εκτροπής-Υπολογισμός δείκτη διάθλασης πρίσματος.	91
3.5.6. Μέτρηση εστιακής απόστασης φακού.....	93
3.5.7. Απεικόνιση αντικειμένου από φακό. Μεγέθυνση ειδώλου.....	97
3.6. Εμπέδωση.....	100
4. ΠΟΛΩΣΗ.....	103
4.1. Εισαγωγή.....	103
4.2. Σκοπός	105
4.3. Απαιτούμενες Γνώσεις	106
4.3.1. Παραγωγή του φωτός και καταστάσεις πόλωσης	106
4.3.2. Αναλυτική περιγραφή των καταστάσεων πόλωσης του φωτός	107
4.3.3. Ελλειπτικά πολωμένο φως	108
4.3.4. Κυκλικά πολωμένο φως.....	110
4.3.5. Γραμμικά πολωμένο φως	110
4.3.6. Φυσικό φως	111
4.3.7. Μερικά Πολωμένο Φως.....	112
4.3.8. Γραμμικοί πολωτές και Polaroid.....	112

4.3.9. Νόμος του Malus	113
4.3.10. Διπλή διάθλαση του φωτός.....	114
4.3.11. Πλακίδια καθυστέρησης (ή καθυστερητές)	123
4.3.12. Πόλωση του φωτός από ανάκλαση και διάθλαση σε διηλεκτρικά υλικά.....	125
4.3.13. Πόλωση του φωτός από ανάκλαση και διάθλαση.....	127
4.3.14. Ανακλαστικότητα των διηλεκτρικών επιφανειών	130
4.4. Πειραματικές διατάξεις και πειράματα	134
4.4.1. Πειράματα παραγωγής και ανίχνευσης των επιμέρους καταστάσεων πόλωσης του φωτός.	134
4.4.2. Πειράματα:	135
4.4.3. Πειράματα που αφορούν το φαινόμενο της διπλής διάθλασης του φωτός	137
4.4.4. Πείραμα μέτρησης του βαθμού πόλωσης μερικά γραμμικά πολωμένου φωτός	138
4.4.5. Πείραμα μέτρησης της ανακλαστικότητας.....	140
4.5. Εμπέδωση.....	141
5. ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΜΟΣ - ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ	143
5.1. Εισαγωγή.....	143
5.2. Σκοπός	148
5.3. Απαιτούμενες Γνώσεις	148
5.3.1. Διάδοση του φωτός σε διηλεκτρικό	149
5.3.2. Διασκεδασμός σε γυαλιά.....	152
5.3.3. Ταχύτητα του φωτός σε ένα διηλεκτρικό.....	158
5.3.4. Το οπτικό πρίσμα.....	161
5.3.5. Χρώμα των υλικών.....	164
5.4. Πειραματικές διατάξεις.....	166
5.4.1. Προσδιορισμός του δείκτη διάθλασης γυαλιών	166
5.4.2. Διάταξη μέτρησης σε συνθήκες ελάχιστης γωνίας εκτροπής	169
5.4.3. Καταγραφή της καμπύλης απορρόφησης έγχρωμων διαφανών υλικών	172
5.4.4. Αυτόματη διάταξη AnaSpec.....	174
5.4.5. Νόμος του Beer και υπολογισμός συντελεστή απορρόφησης	177
5.5. Εμπέδωση.....	178
6. Βιβλιογραφία	181
7. Ευρετήριο όρων	183

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.3-1	Δύο επίπεδα αρμονικά κύματα που επικαλύπτονται σε ένα σημείο του χώρου.....	2
Σχήμα 1.4-1	Χρονική συμβολή δύο κυμάτων διαφορετικών πλατών με <i>σταθερή διαφορά φάσεως</i> στο ίδιο σημείο του χώρου για χρόνους που κυμαίνονται από -3 έως 3 περιόδους. Παρατηρήστε ότι είναι εμφανής η δημιουργία κροσσών συμβολής. Επίσης παρατηρήστε ότι το μέγιστο άθροισμα των επιμέρους μεγίστων εντάσεων ($15^2+10^2=325$) είναι μικρότερο από τη συνολική ένταση ~ 610 , δηλαδή $2I_{12} \approx 285$	5
Σχήμα 1.4-2	Χρονική συμβολή δύο κυμάτων διαφορετικών πλατών με <i>τυχαία διαφορά φάσεως</i> που κυμαίνεται μεταξύ $-\pi/10$ έως $\pi/10$ στο ίδιο σημείο του χώρου για χρόνους που κυμαίνονται από -3 έως 3 περιόδους. Παρατηρήστε ότι και εδώ είναι εμφανής η δημιουργία κροσσών συμβολής. Βέβαια η ποιότητα των κροσσών συμβολής είναι αισθητά μειωμένη.	5
Σχήμα 1.4-3	Χρονική συμβολή δύο κυμάτων διαφορετικών πλατών με <i>τυχαία διαφορά φάσεως</i> που κυμαίνεται μεταξύ $-\pi/10$ έως $\pi/10$ στο ίδιο σημείο του χώρου για χρόνους που κυμαίνονται από -30 έως 30 περιόδους. Παρατηρήστε ότι εδώ οι κροσσοί εμφανίζονται μετά βίας. Αν δε η "καταγραφή" περιελάμβανε ακόμη μεγαλύτερο αριθμό περιόδων, τότε δεν θα εμφανιζόταν καθόλου κροσσοί.....	6
Σχήμα 1.4-4	Χρονική συμβολή δύο κυμάτων διαφορετικών πλατών με <i>τυχαία διαφορά φάσεως</i> που κυμαίνεται μεταξύ $-\pi/2$ έως $\pi/2$ στο ίδιο σημείο του χώρου για χρόνους που κυμαίνονται από -30 έως 30 περιόδους. Παρατηρήστε ότι εδώ δεν εμφανίζονται "χρονικοί" κροσσοί συμβολής. Παρατηρήστε επίσης ότι εδώ η διακύμανση είναι ακόμη μεγαλύτερη.	6
Σχήμα 1.4-5	Σχηματική παράσταση ενός κυματοσυρμού απείρου μήκους και το αντίστοιχο φάσμα συχνοτήτων για κυματοσυρμούς που εκπέμπονται (α) με την ίδια διαφορά φάσεως και (β) τα αντίστοιχα μεγέθη για κυματοσυρμούς που εκπέμπονται με τυχαία διαφορά φάσης μεταξύ τους.....	7
Σχήμα 1.4-6	(α) Ο γεωμετρικός τόπος μέγιστης έντασης είναι παραβολοειδή εκ περιστροφής περί των κοινό άξονα. (β) Η μορφή των κροσσών συμβολής στο επίπεδο που περιέχει τον άξονα των πηγών είναι υπερβολές εκ περιστροφής περί τον κοινό άξονα.....	9
Σχήμα 1.5-1	Διάδοση μετώπων κυμάτων. Η διαφορά φάσεως δύο σημείων του μετώπου π.χ. P_1 και P_2 παραμένει σταθερή (μηδενική).....	10
Σχήμα 1.6-1	Σχηματική παράσταση της διάταξης Young θεωρώντας σημειακή πηγή.....	10
Σχήμα 1.6-2	Σχηματική παράσταση της διατάξεως Lloyd	12

Σχήμα 1.6-3	Συμβολομετρική διάταξη κατόπτρου Lloyd	13
Σχήμα 1.7-1	Διάταξη διαίρεσης πλάτους μέσω διηλεκτρικής πλάκας με παράλληλες έδρες.	15
Σχήμα 1.7-2	Σχηματική παράσταση πορείας ακτίνων κατά τη διαίρεση πλάτους από ισοπαχή επίπεδη πλάκα.....	15
Σχήμα 1.7-3	Σχηματική παράσταση συμβολής του Νεύτωνα.	16
Σχήμα 1.7-4	Λεπτομερής πορεία ακτίνων στη διάταξη των δακτυλίων του Νεύτωνα.	17
Σχήμα 1.7-5	Κροσσοί συμβολής από σφήνα μικρής γωνίας (α) με παράλληλο φωτισμό.....	18
Σχήμα 1.7-6	Πειραματική συμβολομετρική διάταξη δακτυλίων του Νεύτωνα.....	18
Σχήμα 1.7-7	Σύστημα δακτυλίων Νεύτωνα.....	19
Σχήμα 1.7-8	Σχηματικό διάγραμμα του συμβολομέτρου Michelson.....	21
Σχήμα 1.7-9	Διαγραμματικό ισοδύναμο του συμβολομέτρου Michelson.....	22
Σχήμα 1.7-10	Σχηματική παράσταση δημιουργίας κροσσών στο συμβολόμετρο Michelson για φωτισμό με αποκλίνουσα δέσμη. (Διάταξη συμβολομέτρου Pohl).....	23
Σχήμα 1.7-11	Πειραματική διάταξη συμβολομέτρου Michelson με φωτισμό από αποκλίνουσα δέσμη συμφώνου φωτός.....	24
Σχήμα 1.7-12	Συμβολόμετρο Michelson.....	25
Σχήμα 1.8-1	Σχηματική παράσταση προσδιορισμού του μήκους συμφωνίας.	26
Σχήμα 1.8-2	Συμβολόμετρο Michelson για τον προσδιορισμό του μήκους συμφωνίας.....	26
Σχήμα 2.1-1	Περίθλαση Fresnel από ημιεπίπεδο. Παρατηρούμε την εμφάνιση κροσσών περίθλασης.	29
Σχήμα 2.2-1	Γραφική απεικόνιση της αρχής Huygens όταν ένα επίπεδο μέτωπο κύματος διέρχεται από ένα άνοιγμα.....	30
Σχήμα 2.3-2	Γραφική απεικόνιση της αρχής Huygens-Fresnel.....	30
Σχήμα 2.4-1	Γεωμετρία για τη μαθηματική επίλυση του φαινομένου της περίθλασης από άνοιγμα.	31
Σχήμα 2.4-2	Σχηματική παράσταση του στοιχειώδους ανοίγματος και του συστήματος συντεταγμένων	32
Σχήμα 2.5-1	Σχηματική αναπαράσταση της Αρχής του Babinet	33
Σχήμα 2.6-1	Σχηματική παράσταση της μεταβολής της έντασης από περίθλαση σχισμής με τη μεταβολή της απόστασης παρατήρησης.....	34
Σχήμα 2.6-2	Η εξέλιξη των εικόνων περίθλασης με την απόσταση από ορθογώνιο περιθλών άνοιγμα. Περίθλαση Fresnel → Περίθλαση Fraunhofer.	35
Σχήμα 2.7-1	Πειραματική διάταξη εφαρμογής περίθλασης Fraunhofer.	35
Σχήμα 2.8-1	Σχηματική παράσταση δημιουργίας εικόνας περίθλασης Fraunhofer από λεπτή σχισμή.....	37
Σχήμα 2.8-2	Γραφική παράσταση της κατανομής της έντασης για περίθλαση από σχισμή.....	39
Σχήμα 2.8-3	Εικόνες περίθλασης από α) σημειακή πηγή και β) από γραμμική φωτεινή πηγή.	39

Σχήμα 2.8-4	Πειραματική διάταξη περίθλασης Fraunhofer από σχισμή.....	40
Σχήμα 2.8-5	Σχηματική παράσταση πετάσματος ορθογώνιου περιθλώντος ανοίγματος.	40
Σχήμα 2.8-6	Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της περίθλασης από ορθογώνιο περιθλών άνοιγμα.	41
Σχήμα 2.8-7	α) Εικόνα περίθλασης από ορθογώνιο άνοιγμα, β) γραφική παράσταση της κατανομής της έντασης.	41
Σχήμα 2.8-8	Γεωμετρική αναπαράσταση της περίθλασης Fraunhofer από κυκλική οπή.	42
Σχήμα 2.8-9	Γραφική παράσταση της κατανομής της έντασης από κυκλική οπή του ηλεκτρικού πεδίου και της έντασης του φωτός.	43
Σχήμα 2.8-10	Κατανομή της έντασης των κροσσών περίθλασης από κυκλική οπή ακτίνας (α) 0.5mm, (β) 1mm και (γ) χαρακτηριστική 3-D κατανομή της περιθλαστικής έντασης από κυκλική οπή.....	43
Σχήμα 2.8-11	Εξάρτηση των κατανομών περίθλασης δύο πηγών από τη μεταξύ τους φαινομένη γωνία. (α) Σαφής διαχωρισμός των κατανομών για μεγάλες γωνίες. (β) Μόλις που ξεχωρίζουμε τα δύο είδωλα (Κριτήριο Rayleigh). (γ) Δεν υπάρχει δυνατότητα διάκρισης των δύο πηγών.....	44
Σχήμα 2.9-1	Περιθλών στοιχείο με πολλά ανοίγματα.....	46
Σχήμα 2.9-2	Το αποτέλεσμα του συνδυασμού της περιθλαστικής κατανομής με τον παράγοντα συμβολής στην περίπτωση της διπλής σχισμής.	49
Σχήμα 2.9-3	Στην πρώτη στήλη έχει σχεδιασθεί ο παράγοντας συμβολής για $N = 3, 4, 5, 10$ και 50 σχισμές και στη δεύτερη οι κατανομές έντασης που είναι η διαμόρφωση του παράγοντα συμβολής από τον παράγοντα περίθλασης.....	50
Σχήμα 2.9-4	Εικόνες περίθλασης από συστήματα σχισμών που απεικονίζονται στα αριστερά του σχήματος.	51
Σχήμα 2.10-1	Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ενός τμήματος από ένα φράγμα περίθλασης.	51
Σχήμα 2.10-2	(α) Ανάλυση του λευκού φωτός από ένα φράγμα περίθλασης. (β) Εικόνες περίθλασης που προκύπτουν από ένα φράγμα περίθλασης όταν προσπίπτει σε αυτό μονοχρωματική ακτινοβολία και λευκό φως.	52
Σχήμα 2.11-1	Δισδιάστατο φράγμα περίθλασης.....	54
Σχήμα 2.12-2	Το σύστημα λήψης προτύπων περίθλασης και συλλογής δεδομένων σε ψηφιακή μορφή με χρήση Η/Υ.....	56
Σχήμα 2.12-3	Η πειραματική διάταξης του φασματοσκοπίου πάνω στην οποία σημειώνονται τα επιμέρους τμήματα – εξαρτήματα.....	58
Σχήμα 2.12-4	Η ανάλυση του φωτός λυχνίας Cd με χρήση φράγματος περίθλασης.	60
Σχήμα 3.3-1	Δέσμες φωτός που δημιουργούνται από το φως του ηλίου όταν περνά ανάμεσα από τα ανοίγματα που αφήνουν τα σύννεφα.	64
Σχήμα 3.3-2	Δέσμες φωτός που δημιουργούνται από το φως του ηλίου όταν περνά μέσα από τα ανοίγματα που αφήνουν τα φυλλώματα.	64
Σχήμα 3.3-3	Σχηματική παράσταση των διαφόρων φάσεων της σελήνης.	64

Σχήμα 3.3-4	Σχηματική παράσταση του σχηματισμού της σκιάς και παρασκιάς.....	65
Σχήμα 3.3-5	Σχηματισμός ανεστραμμένου ειδώλου μέσω ανάκλασης.....	66
Σχήμα 3.3-6	"Σπάσιμο" αντικειμένου και φαινομένη ανύψωση λόγω διάθλασης	66
Σχήμα 3.3-7	Το φαινόμενο του αντικατοπτρισμού	67
Σχήμα 3.3-8	Απεικόνιση με το μάτι και με τη φωτογραφική μηχανή	67
Σχήμα 3.3-9	Διάδοση ακτίνας σε οπτική ίνα με διαδοχικές εσωτερικές ανακλάσεις.	68
Σχήμα 3.3-10	Επιφάνεια μικροσίπ μεγεθυμένη κατά 22×10^6 φορές.	68
Σχήμα 3.3-11	Οπτικό στερεοσκοπικό μικροσκόπιο.....	68
Σχήμα 3.4-1	Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.....	69
Σχήμα 3.4-2	Μέτωπο κύματος.....	69
Σχήμα 3.4-3	Νόμος ανάκλασης - διάθλασης.	71
Σχήμα 3.4-4	Ολική εσωτερική ανάκλαση. Η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η γωνία διάθλασης είναι 90° είναι η κρίσιμη γωνία (θ_c).....	72
Σχήμα 3.4-5	Διάθλαση στην ακμή πρίσματος και πορεία ακτίνων εντός ορθών οπτικών πρισμάτων.	73
Σχήμα 3.4-6	Η πορεία του φωτός μέσα σε ένα πρίσμα, με $n_1 < n_2$	73
Σχήμα 3.4-7	Μεταβολή της γωνίας Εκτροπής πρίσματος με τη γωνία πρόσπτωσης. Στα ένθετα σχήματα παρουσιάζεται η εξάρτηση της γωνίας εκτροπής από τη γωνία πρόσπτωσης για $\theta < \theta'$, $\theta = \theta'$ και $\theta > \theta'$	74
Σχήμα 3.4-8	Η πορεία του φωτός μέσα σε ένα πρίσμα όταν $n_1 > n_2$	75
Σχήμα 3.4-9	Οι κύριες (α , β) και δευτερεύουσες (γ , δ) εστιακές αποστάσεις κυρτών (α , γ) και κοίλων (β , δ) σφαιρικών διόπτρων.	75
Σχήμα 3.4-10	Διάθλαση πάνω σε μια σφαιρική επιφάνεια.	77
Σχήμα 3.4-11	Διάφορα είδη φακών.	78
Σχήμα 3.4-12	Πρωτεύουσες εστιακές αποστάσεις σε (α) θετικό φακό (συγκλίνων: $f > 0$), (β) Αρνητικό φακό (αποκλίνων: $f < 0$). Δευτερεύουσες εστιακές αποστάσεις σε (γ) συγκλίνοντα και (δ) αποκλίνοντα φακό, όταν $n_\phi > n_\mu$	78
Σχήμα 3.4-13	Στο σχήμα απεικονίζεται το εστιακό επίπεδο σ , καθώς και δέσμες ακτίνων παράλληλες (i) με τον κύριο άξονα και (ii) με δευτερεύοντα άξονα σε συγκλίνοντα (α) και αποκλίνοντα φακό (β).	79
Σχήμα 3.4-14	Δευτερεύουσες εστιακές αποστάσεις (α) σε αποκλίνοντα και (β) σε συγκλίνοντα φακό όταν $n_\phi < n_\mu$	80
Σχήμα 3.4-15	Χαρακτηριστικά στοιχεία παχύ φακού.....	80
Σχήμα 3.4-16	Σχηματική περιγραφή λεπτού συγκλίνοντος και αποκλίνοντος φακού.	81
Σχήμα 3.4-17	Σχηματισμός ειδώλου από λεπτό συγκλίνοντα φακό, όταν $s > f$. Οι κύριες ακτίνες είναι αριθμημένες.	82
Σχήμα 3.4-18	Σχηματισμός ειδώλου από λεπτό συγκλίνοντα φακό $s < f$. Οι κύριες ακτίνες είναι αριθμημένες.	82
Σχήμα 3.4-19	Σχηματισμός ειδώλου από λεπτό αποκλίνοντα φακό. Οι κύριες ακτίνες είναι αριθμημένες.	83

Σχήμα 3.4-20	Σχηματισμός ειδώλου από παχύ φακό. Οι κύριες ακτίνες είναι αριθμημένες.	83
Σχήμα 3.4-21	Συστήματα φακών	84
Σχήμα 3.4-22	Σύστημα δυο συγκλινόντων φακών.	84
Σχήμα 3.4-23	Σφάλμα σφαιρικής εκτροπής (α) μέσω σφαιρικού διόπτρου και (β) μέσω συγκλίνοντος φακού.	85
Σχήμα 3.4-24	Ανάλυση λευκού φωτός μέσα από ένα πρίσμα.	85
Σχήμα 3.4-25	Σφάλμα σφαιρικής και χρωματικής εκτροπής σε λεπτό συγκλίνοντα φακό.	86
Σχήμα 3.5-1	Χαρακτηριστικά στοιχεία ενός φακού.	87
Σχήμα 3.5-2	Πειραματική διάταξη μέτρηση δείκτη διάθλασης υγρού με ολική εσωτερική ανάκλαση.	88
Σχήμα 3.5-3	Σχηματική παράσταση πορείας ακτίνων σε συνθήκη ολικής ανάκλασης.	88
Σχήμα 3.5-4	Λεπτομερής απεικόνιση της εικόνας πίσω από τη γυάλινη πλάκα.	90
Σχήμα 3.5-5	Πειραματική διάταξη μέτρηση δείκτη διάθλασης πρίσματος.	91
Σχήμα 3.5-6	Λεπτομέρειες της γωνιομετρικής τράπεζας.	91
Σχήμα 3.5-7	Πειραματική διάταξη μέτρηση εστιακής απόστασης φακών.	93
Σχήμα 3.5-8	Παραλληλιστής φακός.	94
Σχήμα 3.5-9	Γραφική αναπαράσταση των οπτικών στοιχείων για τον υπολογισμό της εστιακής απόστασης των φακών μέσω της διαδικασίας επανεστίασης ή αντιστροφής απεικόνισης σημειακής πηγής.	95
Σχήμα 3.5-10	Μέτρηση εστιακής απόστασης φακών με την βοήθεια πετάσματος.	95
Σχήμα 3.5-11	Θετικός και αρνητικός φακός σε επαφή.	96
Σχήμα 3.5-12	Μέτρηση στοιχείων παχέος φακού με τη μέθοδο του κατόπτρου.	96
Σχήμα 3.5-13	Πειραματική διάταξη μέτρησης εστιακής απόστασης και μεγέθυνσης φακών.	97
Σχήμα 3.5-14	Μέτρηση των αποστάσεων s και s' στην περίπτωση ενός παχύ φακού.	99
Σχήμα 4.3-1	Τα συνιστώντα πλάτη κατά x, y που συνθέτουν έναν κυματοσυρμό ορισμένης κατάστασης πόλωσης.	107
Σχήμα 4.3-2	Γραφική παράσταση της οδογράφου του πέρατος του ανύσματος ελλειπτικά πολωμένου φωτός.	109
Σχήμα 4.3-3	(α) Δεξιόστροφο και (β) αριστερόστροφο ελλειπτικά πολωμένο φως.	109
Σχήμα 4.3-4	(α) Δεξιόστροφο και (β) αριστερόστροφο κυκλικά πολωμένο φως.	110
Σχήμα 4.3-5	(α) Γραμμικά πολωμένο φως για $\phi=0$ και (β) για $\phi = \pi$	111
Σχήμα 4.3-6	Το μόριο της πολυβινυλικής αλκοόλης.	112
Σχήμα 4.3-7	Καθορισμός του άξονα διέλευσης ενός γραμμικού πολωτή.	113
Σχήμα 4.3-8	Διάταξη για την ανάδειξη του νόμου του Malus.	114
Σχήμα 4.3-9	Τα δίπολα κατά Lorentz για ισότροπα υλικά, μονοάξονες και διάξονες κρυστάλλους.	115
Σχήμα 4.3-10	Οι κρύσταλλοι του Ασβεστίτη (Ισλανδική κρύσταλλος) και του Χαλαζία.	116
Σχήμα 4.3-11	Πλακίδια ασβεστίτη με παράλληλες έδρες.	117

Σχήμα 4.3-12	Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σχισμογενούς μορφής του ασβεστίτη και τα στοιχεία συμμετρίας της ομάδας συμμετρίας σημείου ($\bar{3}m$).	117
Σχήμα 4.3-13	Οι τρεις κύριες τομές του ασβεστίτη και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.....	118
Σχήμα 4.3-14	Η διάταξη των μορίων του ασβεστίτη στο χώρο και η ορθή προβολή των ατόμων του σε επίπεδο κάθετο στον οπτικό άξονα.	118
Σχήμα 4.3-15	Οι δομές του κρυσταλλικού και του άμορφου (ισοτρόπου) χαλαζία (ορθές προβολές).	119
Σχήμα 4.3-16	(α) Επίπεδο και (β) σφαιρικό μέτωπο κύματος.....	119
Σχήμα 4.3-17	Ανάπτυξη των επιφανειών ταχύτητας ακτίνας στον ασβεστίτη (κύρια τομή) και τον χαλαζία (σε επίπεδο που περιλαμβάνει τον οπτικό άξονα). Οι τελείες(•) παριστούν ταλαντώσεις κάθετα στο επίπεδο του σχήματος και τα αμφίπλευρα βέλη (\updownarrow) ταλαντώσεις στο επίπεδο.	120
Σχήμα 4.3-18	Διάδοση μετώπων κύματος στο εσωτερικό κρυστάλλου ασβεστίτη για διαφορετικούς τρόπους δόνησής του.....	122
Σχήμα 4.3-19	Πλακίδια ασβεστίτη με παράλληλες έδρες, που είναι παράλληλες ή κάθετες ως προς τον οπτικό του άξονα.	123
Σχήμα 4.3-20	Εκπομπή ηλεκτρικού διπόλου (μοντέλο δυναμικών γραμμών). Παρατηρήστε τη δημιουργία ενός αρμονικού H/M-κύματος κάθετα στο ταλαντούμενο δίπολο.....	126
Σχήμα 4.3-21	Διάγραμμα εκπομπής ενός ηλεκτρικού διπόλου στο χώρο, του πλάτους $E_o(r=\sigma\theta\phi, \theta, \phi)$ του ηλεκτρικού πεδίου και της έντασης $I(r=\sigma\theta\phi, \theta, \phi)$ του φωτός.	127
Σχήμα 4.3-22	Πρόσπτωση σε επιφάνεια διηλεκτρικού γραμμικά πολωμένου φωτός καθέτου στο επίπεδο πρόσπτωσης.	128
Σχήμα 4.3-23	Πρόσπτωση σε επιφάνεια διηλεκτρικού γραμμικά πολωμένου φωτός παράλληλου στο επίπεδο πρόσπτωσης.	128
Σχήμα 4.3-24	Πρόσπτωση στην επιφάνεια διηλεκτρικού φυσικού φωτός.....	129
Σχήμα 4.3-25	Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός κατά τη διάθλαση από συστοιχία παράλληλων γυάλινων πλακών.	130
Σχήμα 4.3-26	Ο βαθμός πόλωσης P συναρτήσει του αριθμού m των πλακών.	130
Σχήμα 4.3-27	Καμπύλες ανακλαστικότητας R συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης θ	131
Σχήμα 4.4-1	(α) Πολωτής Polaroid και (β) πλακίδιο καθυστέρησης $\lambda/4$	134
Σχήμα 4.4-2	Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και την ανίχνευση των επιμέρους καταστάσεων πόλωσης.	134
Σχήμα 4.4-3	Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης, που χρησιμοποιούνται για την επιβεβαίωση του νόμου του Malus.....	136
Σχήμα 4.4-4	Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης, που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των πειραμάτων που αφορούν τη διπλή διάθλαση του φωτός.....	138

Σχήμα 4.4-5	Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των ανακλαστικότητων διηλεκτρικής επιφάνειας.....	139
Σχήμα 4.4-6	Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του βαθμού πόλωσης μερικά γραμμικά πολωμένου φωτός.....	139
Σχήμα 5.1-1.	Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη και μακροσκοπικά οπτικά μετρήσιμα μεγέθη.....	143
Σχήμα 5.1-2	Ουράνιο τόξο και εξήγηση του σχηματισμού του από τις σταγόνες της βροχής.	145
Σχήμα 5.1-3	Σφάλμα χρωματικής εκτροπής (δεξιά). Ο φακός με τον οποίο γίνεται η απεικόνιση δεν εστιάζει εξίσου καλά όλα τα χρώματα και τα περιγράμματα των αντικειμένων δεν σχηματίζονται ευκρινώς αλλά με διαδοχή χρωμάτων.....	146
Σχήμα 5.1-4	Φάσμα διαπερατότητας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας της Γης. Η υπεριώδης (UV) ακτινοβολία απορροφάται κυρίως από το όζον (O_3) ενώ τμήμα του υπερύθρου φάσματος απορροφάται από το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό.	146
Σχήμα 5.1-5	Καμπύλη διαπερατότητας γυαλιών ηλίου, τα οποία λειτουργούν ως φίλτρα της υπεριώδους περιοχής του φάσματος, ενώ αποκόπτουν και σημαντική ένταση της ορατής ακτινοβολίας.....	147
Σχήμα 5.1-6	Συντελεστής απορρόφησης της οξυγονωμένης και μη-οξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης.....	147
Σχήμα 5.1-7	Φάσματα απορρόφησης δύο τύπων χλωροφύλλης, όπου φαίνεται η έντονη απορρόφηση στο μπλε και κόκκινο χρώμα και η πλήρης διαπερατότητα στο πράσινο.	147
Σχήμα 5.3-1	Ελάττωση του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός όταν διαδίδεται σε ένα διηλεκτρικό με φασματικές περιοχές ή συχνότητες απορρόφησης. Μέσα στο υλικό εκτός από το πλάτος αλλάζει και το μήκος κύματος.....	150
Σχήμα 5.3-2.	Σε ένα υλικό μπορούμε να θεωρήσουμε διάφορα είδη αρμονικών ταλαντωτών οι οποίοι εξαναγκάζονται, λόγω του φορτίου τους, σε ταλάντωση από το ηλεκτρικό πεδίο του φωτός. Ανάλογα με τις μάζες των δονούμενων (α) ηλεκτρονίων (β) ατόμων (γ) ιοντικών υποπλεγμάτων και την ισχύ της αλληλεπίδρασης λαμβάνει χώρα συντονισμός, δηλαδή απορρόφηση φωτός σε διαφορετικές συχνότητες.....	152
Σχήμα 5.3-3.	Συχνотική εξάρτηση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του δείκτη διάθλασης γύρω από μία συχνότητα στην οποία λαμβάνει χώρα έντονη απορρόφηση του φωτός.	154
Σχήμα 5.3-4	(α) Διαφορά φάσης μεταξύ ταλαντούμενου ηλεκτρονίου, ϕ , και του σκεδαζόμενου από αυτό κύματος, $\phi + \phi'$, ως προς το προσπίπτον, (β) πλάτος ταλάντωσης του ηλεκτρονίου – ταλαντωτή, του σκεδαζόμενου κύματος που αυτό εκπέμπει και του δευτερογενούς κύματος που προκύπτει από τη συμβολή όλων των σκεδαζόμενων κυμάτων, (γ) διανυσματικό άθροισμα του προσπίπτοντος και του	

	δευτερογενούς κύματος για χαρακτηριστικές περιπτώσεις της συχνότητας ω και (δ) εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από τη συχνότητα ω	156
Σχήμα 5.3-5	Καμπύλες κανονικού διασκεδασμού διαφορετικών γυαλιών: SF (πυριτύαλος), BK (στεφανύαλος), fused silica (τετηγμένη πυριτία).	157
Σχήμα 5.3-6	Σχηματισμός κυματοδεμάτων (μπλε γραμμή) από την επαλληλία δυο αρμονικών κυμάτων έντασης ηλεκτρικού πεδίου E_1 και E_2 με ίδιο πλάτος και λίγο διαφορετικές συχνότητες και μήκη κύματος. Η πράσινη γραμμή αναπαριστά ένα κυματοδεμα που αντιστοιχεί σε εύρος μηκών κύματος $\Delta\lambda$	159
Σχήμα 5.3-7	Στην περιοχή ανώμαλου διασκεδασμού ένα κυματοδεμα υφίσταται σημαντική παραμόρφωση και διασπορά.	160
Σχήμα 5.3-8	Γωνιακός διασκεδασμός πρίσματος διαθλαστικής γωνίας A.	162
Σχήμα 5.3-9	Γωνιακός διασκεδασμός πρίσματος που φωτίζεται από μη-μονοχρωματική δέσμη ευρέος μετώπου κύματος.....	163
Σχήμα 5.3-10	Προσθετικό και αφαιρετικό πρότυπο με τα οποία προκύπτουν τα χρώματα των υλικών.	165
Σχήμα 5.3-11	Φάσματα διαπερατότητας ενός κόκκινο φίλτρου κατασκευασμένου από έγχρωμη ζελατίνα και ενός πρασινωπού γυαλιού.	166
Σχήμα 5.4-1	Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης προσδιορισμού του δείκτη διάθλασης με μέτρηση της γωνίας εκτροπής από γυάλινο πρίσμα.	167
Σχήμα 5.4-2	Χρήση της ανακλώμενης στην επιφάνεια πρόσπτωσης για τον καθορισμό της γωνίας πρόσπτωσης. Εάν επιθυμούμε γωνία πρόσπτωσης ίση με θ , τότε η ένδειξη του γωνιομέτρου θα πρέπει να είναι $180^\circ + 2\theta$	168
Σχήμα 5.4-3	Μέτρηση της γωνίας εκτροπής με τη βοήθεια της διόπτρας.	168
Σχήμα 5.4-4	Επιμέρους στοιχεία της πειραματικής διάταξης μέτρησης του δείκτη διάθλασης γυάλινου πρίσματος με τη μέθοδο της γωνίας ελάχιστης εκτροπής.	170
Σχήμα 5.4-5	Γεωμετρία του πειράματος για τον υπολογισμό του δείκτη διάθλασης από τη γωνία ελάχιστης εκτροπής. Η E_{\min} μετριέται με πρόσπτωση στις δύο πλευρές του πρίσματος που βρίσκονται εκατέρωθεν της διαθλαστικής γωνίας. Η γωνία μετριέται με τη βοήθεια δύο κλιμάκων (A και B) με βερνιέρους.	171
Σχήμα 5.4-6	Φασματομετρική διάταξη μελέτης της απορρόφησης δειγμάτων τα οποία έχουν διαμορφωθεί με τη μορφή λεπτών φύλλων και φαίνονται στο ένθετο.	173
Σχήμα 5.4-7	Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του φασματομέτρου. Στο ένθετο φαίνεται η καμπύλη απόκρισής του.	173
Σχήμα 5.4-8	Φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πηγής αλογόνου-δευτερίου.	174
Σχήμα 5.4-9	Αυτόματη διάταξη AnaSpec για την καταγραφή της διαπερατότητας από διάφορα διαφανή πλακίδια.	175

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1.6-1	Απαιτούμενα πειραματικά δεδομένα για τη διάταξη Lloyd.	14
Πίνακας 1.7-1	Απαιτούμενα πειραματικά δεδομένα για τη διάταξη Newton.....	20
Πίνακας 1.7-2	Απαιτούμενα πειραματικά δεδομένα για τη διάταξη Michelson.	24
Πίνακας 3.4-1	Συμβάσεις προσήμων για σφαιρικά δίοπτρα	76
Πίνακας 3.5-1	Πειραματικά δεδομένα για τη μέτρηση του δείκτη διάθλασης υγρού.	89
Πίνακας 3.5-2	Πειραματικά δεδομένα για τη μέτρηση του δείκτη διάθλασης διαφανούς υλικού.	90
Πίνακας 3.5-3	Απαιτούμενα πειραματικά δεδομένα για την εύρεση της γωνίας εκτροπής πρίσματος.....	93
Πίνακας 3.5-4	Πίνακας εισαγωγής στοιχείων λεπτών φακών.....	95
Πίνακας 3.5-5	Πίνακας εισαγωγής στοιχείων παχέων φακών.	97
Πίνακας 3.5-6	Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων λεπτών φακών.	99
Πίνακας 3.5-7	Χαρακτηριστικά παχέων φακών.....	99
Πίνακας 3.5-8	Συγκεντρωτικός πίνακας παχέων φακών (πειραματικά και πραγματικά μεγέθη).	100
Πίνακας 3.5-9	Υπολογισμός μεταβολής της μεγέθυνσης για τον φακό Φ.11.....	100
Πίνακας 4.4-1	Πίνακας δεδομένων προσδιορισμού νόμου Malus.	137
Πίνακας 4.4-2	Πίνακας δεδομένων προσδιορισμού γωνίας Brewster.	140
Πίνακας 5.3-1	Περιοχές μηκών κύματος που αντιστοιχούν στο υπεριώδες, ορατό και υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.	164
Πίνακας 5.4-1	Γραμμές εκπομπής και αντίστοιχα μήκη κύματος της φασματικής λυχνίας Hg-Cd.	167
Πίνακας 5.4-2	Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού του διασκεδασμού του γυαλιού με τη διάταξη μέτρησης της γωνίας εκτροπής E . Να ληφθούν 3 μετρήσεις ($E_{1,2,3}$) για διαφορετική γωνία εισόδου $\theta=48^\circ$, 52° και 56°	169
Πίνακας 5.4-3	Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού του διασκεδασμού του γυαλιού με τη διάταξη μέτρησης της γωνίας ελάχιστης εκτροπής E_{\min} . θ_A και θ_B είναι οι ενδείξεις μέτρησης στο γωνιόμετρο των γωνιών ελάχιστης εκτροπής για τις δύο θέσεις του πρίσματος.	171
Πίνακας 5.4-4	Απαιτούμενα πειραματικά δεδομένα για την κατασκευή της καμπύλης διαπερατότητας με τη διάταξη του φασματομέτρου.....	174
Πίνακας 5.4-5	Απαιτούμενα πειραματικά δεδομένα για τον προσδιορισμό του συντελεστή απορρόφησης ζελατίνας για $\lambda=600$ nm σύμφωνα με το νόμο του Beer με τη βοήθεια της διάταξης φασματομέτρου με ανιχνευτή φωτοδίοδου.	177
Πίνακας 5.4-6	Απαιτούμενα πειραματικά δεδομένα για τον προσδιορισμό του συντελεστή απορρόφησης ζελατίνας για $\lambda=600$ nm σύμφωνα με το νόμο του Beer με τη βοήθεια της αυτόματης διάταξης AnaSpec.	178

1. ΣΥΜΒΟΛΗ

1.1. Εισαγωγή

Η έννοια της *συμβολής* είναι στενά συνδεδεμένη με την έννοια της *επαλληλίας*, δηλαδή την ταυτόχρονη επίδραση (διάδοση, παρουσία) δύο ή περισσότερων κυμάτων και παρατήρησης της (χρονικής ή χωρικής) συμπεριφοράς του συνολικού (συνισταμένου) κύματος. **Το βασικό χαρακτηριστικό της συμβολής είναι ότι η κατανομή έντασης του συνισταμένου κύματος είναι διαφορετική του αθροίσματος των εντάσεων των συνιστώντων κυμάτων.** Τα συμβαλλόμενα κύματα μπορούν να προέρχονται από ανεξάρτητες πηγές ή να προέρχονται από την ίδια πηγή και να "διαχωρίζονται" κατά τη διάδοσή τους με τεχνητό τρόπο.

Η συμβολή βασίζεται στη γραμμικότητα της κυματικής εξίσωσης:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi_1(x,t)}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi_1(x,t)}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \psi_2(x,t)}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi_2(x,t)}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\partial^2 [a\psi_1(x,t) + b\psi_2(x,t)]}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 [a\psi_1(x,t) + b\psi_2(x,t)]}{\partial t^2} \quad (1.1.1)$$

$\psi(x,t) = a\psi_1(x,t) + b\psi_2(x,t) \quad a, b \text{ σταθερές}$

Όπου

$$\psi(x,t) = f(x - vt) \quad (1.1.2)$$

δηλαδή ότι, αν δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες κυματομορφές είναι λύσεις της κυματικής εξίσωσης, τότε είναι λύση και κάθε γραμμικός συνδυασμός των. Βέβαια, επαλληλία των λύσεων μπορούμε να δημιουργήσουμε πάντα, αν όμως απουσίαζε η γραμμικότητα η συνισταμένη διαταραχή δεν θα ήταν κύμα, δηλαδή δεν θα ήταν της μορφής $\psi(x - vt)$.

Αποτέλεσμα της συμβολής είναι ότι το προκύπτον πεδίο εμπεριέχει την επίδραση καθενός από το συμβάλλοντα κύματα. Το αποτέλεσμα της επαλληλίας εξαρτάται από τις ειδικές συνθήκες που λαμβάνει χώρα η επαλληλία. Βέβαια δεν θα πρέπει να ξεχνάμε και το ρόλο του ανιχνευτή, καθόσον, όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω, δεν συμπίπτει πάντα αυτό που "παρατηρούμε" με αυτό που πραγματικά "συμβαίνει".

Το φαινόμενο της συμβολής εξαρτάται σημαντικά από τη μορφή των συμβαλλόντων κυμάτων, δηλαδή αν είναι βαθμωτά ή έχουν διανυσματικό χαρακτήρα.

Εμείς θα ασχοληθούμε κυρίως με το φαινόμενο της συμβολής σε *φωτεινά κύματα*, τα οποία ως γνωστόν έχουν διανυσματικό χαρακτήρα. Παρ' όλα αυτά θα αναφερόμαστε, για λόγους πληρότητας και αντιδιαστολής, και σε βαθμωτά πεδία.

Ειδικά για το φως το φαινόμενο της συμβολής έπαιξε σημαντικό ρόλο στη μελέτη και στη διευκρίνιση της φύσης του φωτός. Έτσι μαζί με το φαινόμενο της περίθλασης συνέβαλαν καθοριστικά στην εδραίωση της κυματικής φύσης του φωτός και εντάσσονται στις βασικές γνώσεις ενός φυσικού.

Πέραν τούτου, μας παρέχει ευέλικτα, αποτελεσματικά και ακριβή εργαλεία προσδιορισμού σημαντικών φυσικών μεγεθών, όπως π.χ. τον προσδιορισμό του μήκους κύματος που αντιστοιχεί σε κάθε χρώμα, τη μέτρηση μικρών αποστάσεων, τον προσδιορισμό χρηστικών ιδιοτήτων των υλικών, π.χ. δείκτης διάθλασης, πάχος υμενίων, επιτεδότητα επιφανειών, την παρουσία τάσεων σε διάφορα υλικά και πολλές άλλες. Για το λόγο αυτόν, το φαινόμενο της συμβολής έχει ενσωματωθεί και αξιοποιείται σε πολλές διατάξεις ευρύτατων εφαρμογών, π.χ. μείωση ή αύξηση ανακλαστικότητας επιστρώσεων, φίλτρων συμβολής κ.λπ.

Συνεπώς η σε βάθος κατανόηση του φαινομένου της συμβολής, ο πειραματικός τρόπος υλοποίησης των απαιτούμενων προϋποθέσεων, η σωστή αποτίμηση της παρατηρούμενης εικόνας συμβολής και τέλος η σύνδεσή της με τα στοιχεία του πειράματος θα μας επιτρέψει να ερμηνεύσουμε σωστά τα παρατηρούμενα αποτελέσματα και θα αυξήσει την αξιοπιστία των προσδιορισμένων παραμέτρων.

1.2. Σκοπός

Ο σκοπός του πειράματος είναι διττός:

- Αφενός μεν να κατανοήσετε τον τρόπο λειτουργίας των πειραματικών διατάξεων σχετικά με πώς υλοποιούν τις απαιτούμενες προϋποθέσεις, ώστε να εμφανίζεται το φαινόμενο της συμβολής.
- Αφετέρου δε να μελετήσετε ποσοτικά το φαινόμενο και να προσδιορίσετε ορισμένα μεγέθη που εμπλέκονται στη διαδικασία του πειράματος.

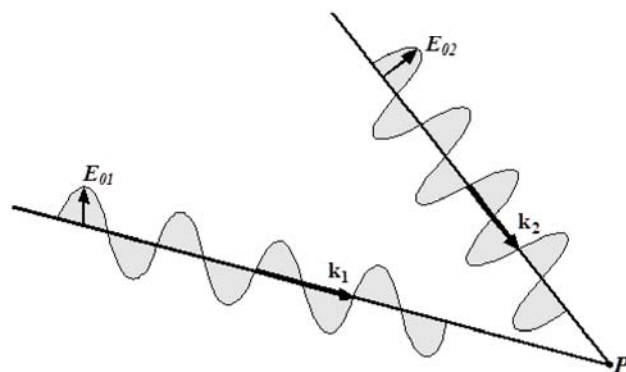
Στο πλαίσιο αυτό θα μελετήσετε διάφορες παραλλαγές πειραματικών διατάξεων και στο τέλος θα έχετε κάνει κτήμα σας τα εξής:

- Τις προϋποθέσεις για την παρατήρηση της συμβολής.
- Την έννοια της συμφωνίας των δεσμών και κατ' επέκταση των πηγών που τις παράγουν.
- Πώς, και σε ποιο βαθμό, μπορούμε να δημιουργήσουμε σύμφωνες δέσμες, αν δεν μπορούμε να κατασκευάσουμε απευθείας σύμφωνες πηγές.
- Τη σαφή διαφοροποίηση μεταξύ χωρικής και χρονικής συμφωνίας.
- Την έννοια των κροσσών συμβολής.
- Το προκύπτον σχήμα των κροσσών συμβολής και τη θέση τους στο χώρο.
- Πιθανόν θα μπορείτε να προτείνετε μια τροποποιημένη διάταξη για τη μελέτη του φαινομένου της συμβολής.

1.3. Απαιτούμενες γνώσεις

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθεί εν συντομία το αναγκαίο υπόβαθρο γνώσεων για τη κατανόηση του φαινομένου της συμβολής. Προφανώς αυτές δεν υποκαθιστούν τις απαιτούμενες γνώσεις οπτικής ή γενικότερα περί κυμάτων, απλά εξειδικεύουν τις εν λόγω γνώσεις για τη μελέτη του φαινομένου στις συγκεκριμένες διατάξεις.

Θα ξεκινήσουμε από τη βασική έννοια της συμβολής ως επαλληλία δύο ή περισσότερων δεσμών φωτός. Για λόγους απλοποίησης των αλγεβρικών πράξεων θα περιοριστούμε σε δύο δέσμες που συνίστανται από αρμονικά, επίπεδα κύματα, σταθερού πλάτους, της ίδιας συχνότητας και μάλιστα γραμμικά πολωμένα. Προς το παρόν αφήνουμε εκτός μελέτης τις πηγές που τα δημιουργήσαν, ως επίσης και το μαγνητικό πεδίο που συνοδεύει το ηλεκτρικό πεδίο.



Σχήμα 1.3-1 Δύο επίπεδα αρμονικά κύματα που επικαλύπτονται σε ένα σημείο του χώρου.

Με βάση την αρχή της επαλληλίας το συνιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο P θα δίνεται από την έκφραση

$$E = E_1 + E_2 \quad (1.3.1)$$

Όπου οι επιμέρους εντάσεις του ηλεκτρικού πεδίου E_1 και E_2 δίδονται από τις εκφράσεις

$$\begin{aligned} E_1(\mathbf{r}, t) &= E_{01} \cos[\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 - \omega t + \varphi_1(t)] \\ E_2(\mathbf{r}, t) &= E_{02} \cos[\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 - \omega t + \varphi_1(t)] \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

Όπου

$$|\mathbf{k}_1| = |\mathbf{k}_2| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{μέτρο κυματοδιανύσματος} \quad (1.3.3)$$

και $\varphi_1(t)$ και $\varphi_2(t)$ οι φάσεις των δεσμών κατά τη δημιουργία τους. Γι' αυτό και πολλές φορές τις ονομάζουμε **αρχικές φάσεις**, οι οποίες θεωρούμε ότι δεν μεταβάλλονται κατά τη διάδοση. Παρατηρήστε ότι αυτές εξαρτώνται από το χρόνο και μάλιστα κατά αυθαίρετο τρόπο. Βασικά ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι αρχικές φάσεις των δεσμών είναι χαρακτηριστικό των πηγών που παράγουν τις δέσμες και, όπως θα δούμε παρακάτω, αποτελούν μέτρο του βαθμού συμφωνίας μια δέσμης με τον εαυτό της ή με άλλες δέσμες.

Αν αντικαταστήσουμε τις (1.3.2) στην (1.3.1) μπορούμε να προσδιορίσουμε τη συνολική ένταση του πεδίου. Όμως, αυτό που κατ' ουσία είμαστε σε θέση να μετρήσουμε είναι η ένταση της ακτινοβολίας (ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου), $[I] = \text{Watt/m}^2$. Στο σημείο αυτό επεμβαίνουν δραστικά οι ιδιότητες του ανιχνευτή, δηλαδή η ικανότητά του να ανιχνεύει ταχύτατα μεταβαλλόμενα πεδία, όπως αυτά στην οπτική περιοχή όπου η κυκλική συχνότητα ω είναι της τάξης του $2,6 \cdot 10^{15} \text{ rad}$ (ή και ακόμη μεγαλύτερη στην υπεριώδη και περιοχή των ακτίνων Χ). Οι συνήθεις ανιχνευτές όπως φωτοπολλαπλασιαστές, βολόμετρα, γαλακτώματα, CCD, μάτι κλπ, δεν έχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται σε τόσο υψηλές συχνότητες και επομένως μετρούν σε ένα χρονικό διάστημα που κατά κανόνα είναι πολύ μεγαλύτερο από την περίοδο μεταβολής των επιμέρους εντάσεων ($\tau \gg 2\pi/\omega$).

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη μας ότι η **ένταση ακτινοβολίας** δίνεται από τη σχέση

$$I = \varepsilon \nu \langle E^2 \rangle, \quad \nu = 1/\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (\varepsilon = k_e \varepsilon_0, \mu = k_m \mu_0), \quad \langle \dots \rangle \quad \text{μέση χρονική τιμή} \quad (1.3.4)$$

θα έχουμε

$$\begin{aligned} I &= \varepsilon \nu \langle E^2 \rangle = \varepsilon \nu \langle \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \rangle = \varepsilon \nu \langle (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \rangle \\ &= I_1 + I_2 + 2I_{12} \end{aligned} \quad (1.3.5)$$

Με

$$I_1 = \varepsilon \nu \langle E_1^2 \rangle \quad I_2 = \varepsilon \nu \langle E_2^2 \rangle \quad I_{12} = 2\varepsilon \nu \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle \quad (1.3.6)$$

Επίσης

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle &= E_{01} \cdot E_{02} \langle \cos[\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi_1(t)] \cos[\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi_1(t)] \rangle \\ &= E_{01} \cdot E_{02} \left\langle \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) - \varphi_2(t))] + \right. \\ &\quad \left. \cos[2\omega t - (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) + \varphi_2(t))] \right\rangle \\ &= \frac{E_{01} \cdot E_{02}}{2} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) - \varphi_2(t))] \end{aligned} \quad (1.3.7)$$

Όπου έχει ληφθεί υπόψη ότι

$$\langle \sin^2 \omega t \rangle \equiv \frac{1}{\tau} \int_{\tau}^{2\pi/\omega + \tau} \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{\tau} \int_{\tau}^{\tau + 2\pi/\omega} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{1}{2} = \langle \cos^2 \omega t \rangle \quad (1.3.8)$$

$$\langle \cos(\omega t + (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) + \varphi_2(t))) \rangle = 0$$

Οπότε η (1.3.5) με τη βοήθεια των (1.3.6) και (1.3.8) δίδει:

$$I = \varepsilon \nu \frac{E_{01}^2}{2} + \varepsilon \nu \frac{E_{02}^2}{2} + \varepsilon \nu E_{01} \cdot E_{02} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) - \varphi_2(t))] \quad (1.3.9)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) - \varphi_2(t))]$$

Η (1.3.9) ονομάζεται **εξίσωση συμβολής**. Δεδομένου το συνημίτονο μεταβάλλεται μεταξύ +1 και -1 προκύπτει ότι η συνολική ένταση κυμαίνεται μεταξύ

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (1.3.10)$$

Και

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (1.3.11)$$

Μια ακόμη χρήσιμη έννοια είναι η **ευκρίνεια**, η οποία ορίζεται από την έκφραση

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \xrightarrow{I_1 = I_2} 1 \quad (1.3.12)$$

Η οποία λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν οι επιμέρους συμβάλλουσες εντάσεις γίνονται ίσες. Δεδομένου ότι οι μεταβολές της συνολικής εντάσεως εκφράζουν το βαθμό της ποιότητας της συμβολής, η ευκρίνεια αποτελεί κατά κάποιο τρόπο μέτρο του βαθμού συμβολής και κυμαίνεται μεταξύ μηδέν και 1.

1.4. Συνθήκες συμβολής

Η (1.3.9) είναι μια πολύ σημαντική έκφραση. Ουσιαστικά μας δίνει πότε η συνισταμένη ένταση δεν ισούται με το αριθμητικό άθροισμα των επιμέρους εντάσεων, δηλαδή εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να ισχύουν οι τρεις προϋποθέσεις:

1. Το $E_{01} \cdot E_{02} \neq 0$ δηλαδή τα συμβάλλοντα κύματα να μην είναι κάθετα πολωμένα.
2. Ειδικά για τα φωτεινά κύματα θα πρέπει να έχουν την ίδια ή σχεδόν την ίδια συχνότητα για να παράγουν "σταθερή" εικόνα συμβολής.
 - α. Διαφορετικά δημιουργούνται **διακροτήματα**
3. Το $\cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) - \varphi_2(t))] \neq 0$. Εδώ διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:
 - β. Η διαφορά φάσεως $\varphi(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t)$ να είναι χρονικά σταθερή.
 - α. $(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) - \varphi_2(t)) \neq m\pi$. (1.4.1)

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι αν η διαφορά φάσεως $\varphi(t)$ μεταβάλλεται τυχαία, τότε ότι και να συμβαίνει με τον όρο $(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r}$ η μέση τιμή του συνημίτονου θα είναι μηδέν. Στα επόμενα, θα προσπαθήσουμε να κάνουμε πιο κατανοητό το ρόλο κάθε μιας από τις παραπάνω προϋποθέσεις.

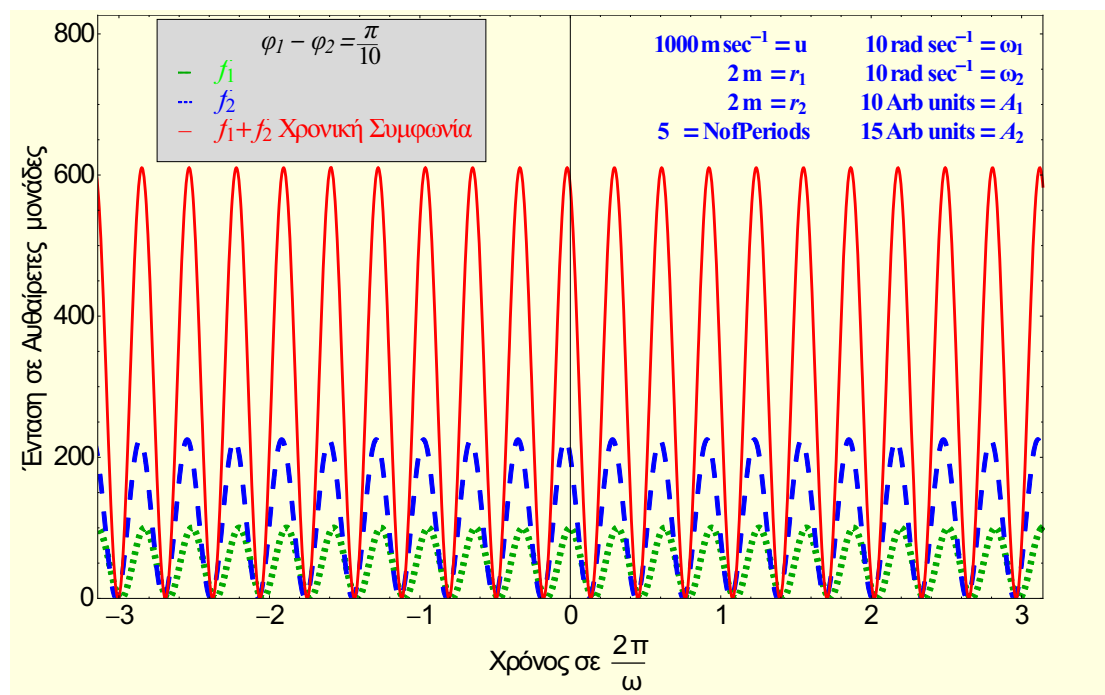
Επεκτείνοντας τις παραπάνω σκέψεις σε ένα κύμα που δεν είναι γραμμικά πολωμένο, μπορούμε να πούμε ότι αφού οιοδήποτε κύμα μπορεί να αναλυθεί σε μία κάθετη και μία παράλληλη συνιστώσα ως προς το επίπεδο πόλωσης (αναφοράς), θα συμβάλλουν μόνο εκείνες οι συνιστώσες που πληρούν τη συνθήκη $E_{01} \cdot E_{02} \neq 0$. (Νόμος **Arago**).

1.4.1. Χρονική συμφωνία

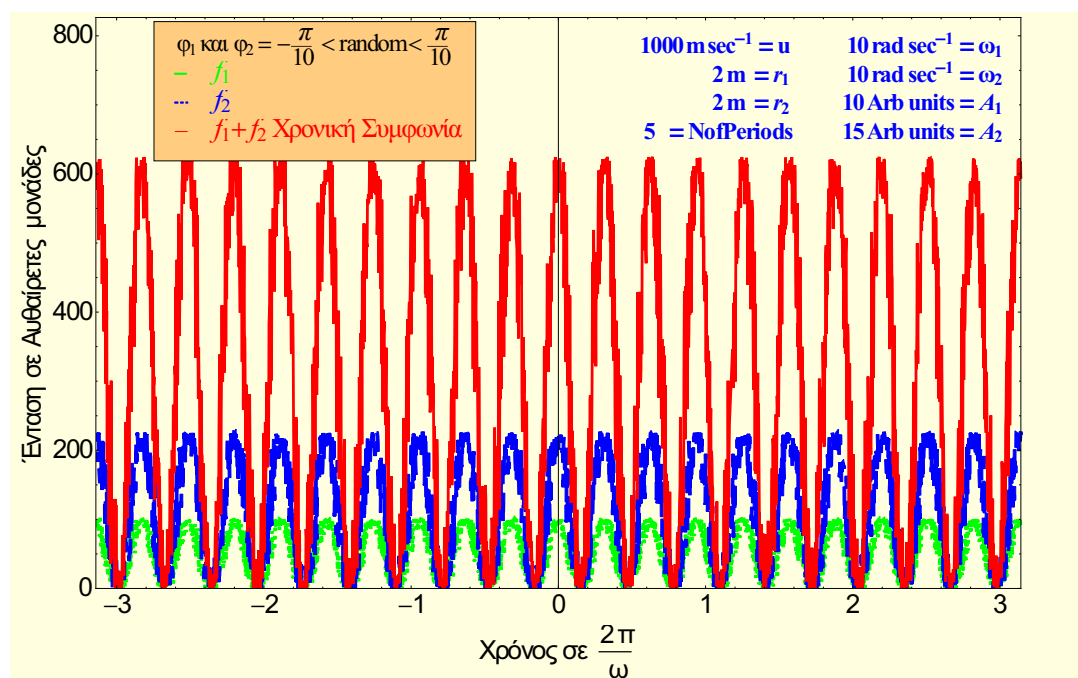
Θα ξεκινήσουμε με την επίδραση της χρονικής εξάρτησης της διαφοράς φάσεων ως και του χρόνου παρατήρησης στη χρονική συμφωνία. Για το σκοπό παριστάνουμε την εξίσωση

$$I(t) \approx E^2 = (E_1 + E_2)^2 \quad (1.4.2)$$

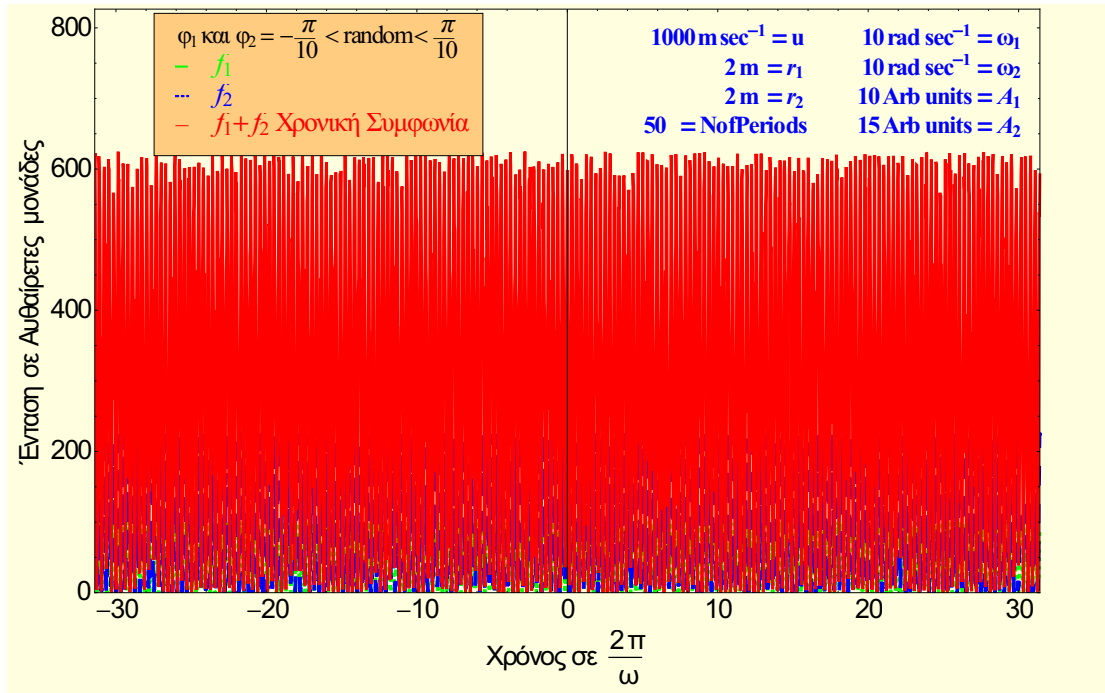
για έναν ορισμένο αριθμό περιόδων θεωρώντας ότι τα κύματα έχουν ίδια συχνότητα.



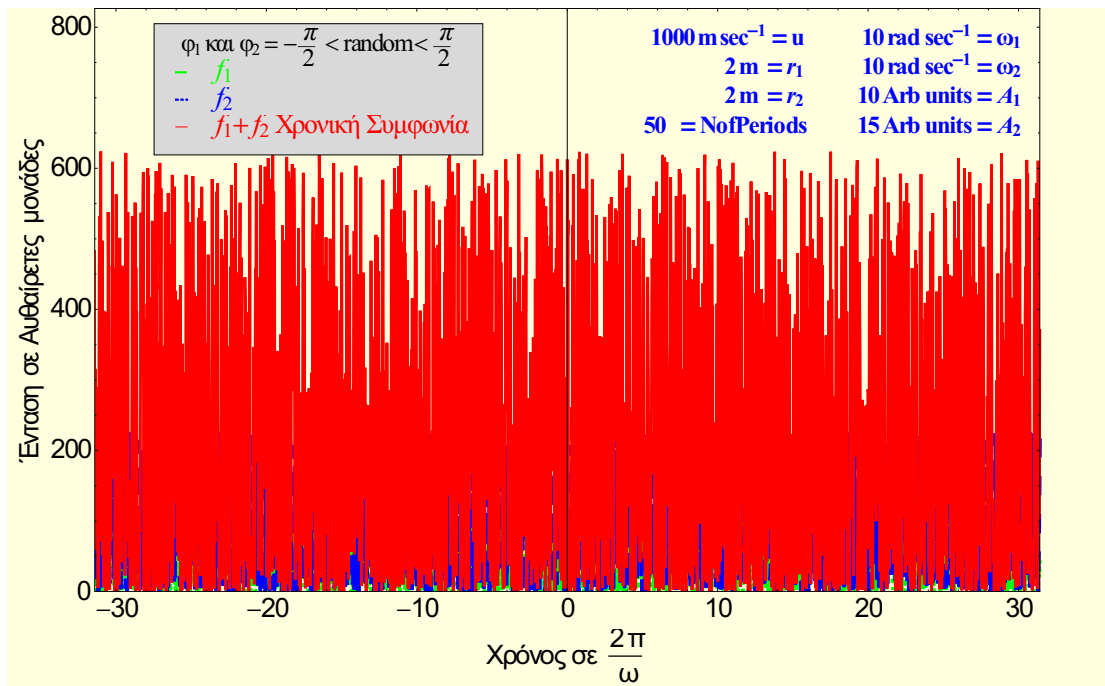
Σχήμα 1.4-1 Χρονική συμβολή δύο κυμάτων διαφορετικών πλατών με σταθερή διαφορά φάσεως στο ίδιο σημείο του χώρου για χρόνους που κυμαίνονται από -3 έως 3 περιόδους. Παρατηρήστε ότι είναι εμφανής η δημιουργία κροσσών συμβολής. Επίσης παρατηρήστε ότι το μέγιστο άθροισμα των επιμέρους μεγίστων εντάσεων ($15^2 + 10^2 = 325$) είναι μικρότερο από τη συνολική ένταση ~ 610 , δηλαδή $2I_{12} \approx 285$.



Σχήμα 1.4-2 Χρονική συμβολή δύο κυμάτων διαφορετικών πλατών με τυχαία διαφορά φάσεως που κυμαίνεται μεταξύ $-\pi/10$ έως $\pi/10$ στο ίδιο σημείο του χώρου για χρόνους που κυμαίνονται από -3 έως 3 περιόδους. Παρατηρήστε ότι και εδώ είναι εμφανής η δημιουργία κροσσών συμβολής. Βέβαια η ποιότητα των κροσσών συμβολής είναι αισθητά μειωμένη.



Σχήμα 1.4-3 Χρονική συμβολή δύο κυμάτων διαφορετικών πλατών με τυχαία διαφορά φάσεως που κυμαίνεται μεταξύ $-\pi/10$ έως $\pi/10$ στο ίδιο σημείο του χώρου για χρόνους που κυμαίνονται από -30 έως 30 περιόδους. Παρατηρήστε ότι εδώ οι κροσσοί εμφανίζονται μετά βίας. Αν δε η "καταγραφή" περιελάμβανε ακόμη μεγαλύτερο αριθμό περιόδων, τότε δεν θα εμφανιζόνταν καθόλου κροσσοί.

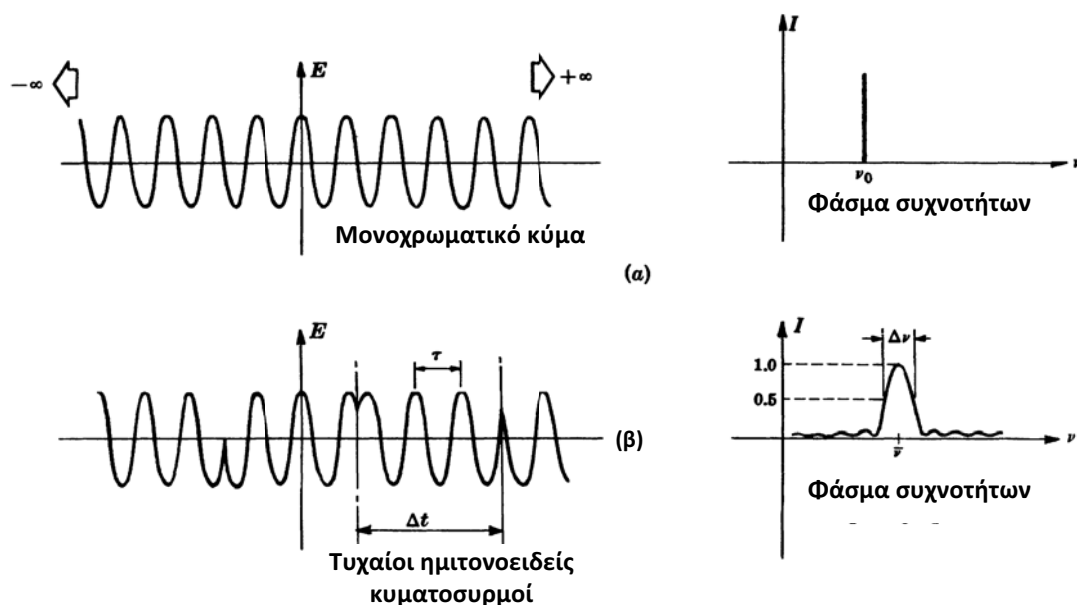


Σχήμα 1.4-4 Χρονική συμβολή δύο κυμάτων διαφορετικών πλατών με τυχαία διαφορά φάσεως που κυμαίνεται μεταξύ $-\pi/2$ έως $\pi/2$ στο ίδιο σημείο του χώρου για χρόνους που κυμαίνονται από -30 έως 30 περιόδους. Παρατηρήστε ότι εδώ δεν εμφανίζονται "χρονικοί" κροσσοί συμβολής. Παρατηρήστε επίσης ότι εδώ η διακύμανση είναι ακόμη μεγαλύτερη.

Από τα παραπάνω σχήματα συνάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι αν η διαφορά φάσεως δεν είναι σταθερή με το χρόνο και ο χρόνος παρατήρησης $\tau \gg 2\pi/\omega$, τότε η συνολική ένταση δεν παρουσιάζει διαφοροποίηση αναφορικά με το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων των συμβαλλόντων φωτεινών κυμάτων, δηλαδή δεν εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής.

Αναφορικά με το ρόλο της σταθερότητας της αρχικής διαφοράς φάσεων θα πρέπει να σημειώσουμε ότι αν είχαμε αρκούντως ταχείς ανιχνευτές, τότε θα ήμασταν σε θέση να παρατηρήσουμε τις ταχείες αυτές διακυμάνσεις. Αυτό συμβαίνει στις ακουστικές συχνότητες ($< 20 \text{ KHz}$, $T > 5 \cdot 10^{-5} \text{ sec}$, $\lambda > 1,7 \text{ cm}$) όπου διαθέτουμε ταχύτερους και καλύτερους ανιχνευτές, το αυτί μας ¹. Από άποψης ηλεκτρονικής ανίχνευσης π.χ. φωτοπολλαπλασιαστές, CCD, υπάρχουν εκδόσεις με χρόνο απόκρισης μικρότερο των μερικών nsec !

Στο Σχήμα 1.4-5 παριστάνεται η δημιουργία των φωτεινών κυμάτων, θεωρώντας ότι αυτά προέρχονται από μεταπτώσεις ηλεκτρονίων. Αν οι κυματοσυρμοί εκπέμπονται με σταθερή διαφορά φάσεως (**συσχετισμένοι ή σύμφωνοι κυματοσυρμοί**), τότε έχουμε μια συχνότητα και μηδενικό φασματικό εύρος. Ενώ αν εκπέμπονται με τυχαία διαφορά φάσεως η προκύπτουσα δέσμη έχει πεπερασμένο φασματικό εύρος



Σχήμα 1.4-5 Σχηματική παράσταση ενός κυματοσυρμού απείρου μήκους και το αντίστοιχο φάσμα συχνοτήτων για κυματοσυρμούς που εκπέμπονται (α) με την ίδια διαφορά φάσεως και (β) τα αντίστοιχα μεγέθη για κυματοσυρμούς που εκπέμπονται με τυχαία διαφορά φάσης μεταξύ τους.

Ο χρόνος που παραμένει χρονικά σταθερά η διαφορά φάσεως ονομάζεται **χρόνος συμφωνίας τ_c** . Ο χρόνος συμφωνίας είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της πηγής και εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργία της πηγής. Το βασικό χαρακτηριστικό που ελέγχεται από το χρόνο συμφωνίας είναι η μονοχρωματικότητα της πηγής, δηλαδή αν η εκπεμπόμενη δέσμη περιέχει μόνο μια στενή ή ευρεία περιοχή μηκών κύματος. Διευκρινίζεται ότι ακόμη και αν μια πηγή είναι σχεδόν μονοχρωματική και συνεπώς χαρακτηρίζεται από έναν σχετικά μεγάλο

¹ Το εμβαδόν του τυμπάνου του αυτιού μας είναι περίπου $42 \text{ mm}^2 \ll \lambda^2$ και η "διακριτική ικανότητά" του από απόψεως μεταβολής της πίεσης αντιστοιχεί σε διαμήκεις μεταβολές μετατόπισης περίπου $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 120 \text{ \AA} \ll \lambda$. Σημειώνεται ότι η χρονική διακριτική ικανότητα του αυτιού είναι $> 0,1 \text{ sec}$, πολύ μεγαλύτερη της περιόδου του ηχητικού κύματος. Όμως η ανίχνευση του ήχου από το αυτί γίνεται μέσω της ανίχνευσης της μεταβολής της πίεσης και όχι χρονικά.

χρόνο συμφωνίας, αυτό δεν συνεπάγεται αυτόματα ότι δέσμες που παράγονται από δύο ίδιες αλλά **ανεξάρτητες πηγές** είναι " χρονικά σύμφωνες" μεταξύ τους. Π.χ. δύο **ίδιοι** αλλά **ανεξάρτητοι** Lasers δεν είναι γενικά χρονικά σύμφωνοι μεταξύ τους, παρά μόνο για ένα πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα (της τάξης της περιόδου ταλαντώσεως).

Οι ηλεκτρονικές μεταπτώσεις, υπεύθυνες για την εκπομπή φωτός, έχουν διάρκεια (**χρόνο ζωής**) περίπου 10^{-8} sec. Πέραν όμως της πεπερασμένης πιθανότητας εκπομπής των ατόμων από μόνα τους (**αυθόρμητη εκπομπή**), τα εκπέμποντα άτομα αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους μέσω κρούσεων αλλά και λόγω του φαινομένου Doppler, αν βρίσκονται σε αέρια φάση εντός της πηγής, είτε λόγω αλληλεπιδράσεως με το πλέγμα ή άλλα άτομα αν βρίσκονται σε στερεά κατάσταση, με αποτέλεσμα να τροποποιείται σημαντικά η συνολική πιθανότητα εκπομπής. Συνεπώς στην πράξη η συχνοτική διεύρυνση που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4-5 αποτελεί τη συνολική διεύρυνση. Όμως με βάση την αρχή της απροσδιοριστίας είτε από τη θεωρία Fourier, μεταξύ του φασματικού εύρους και της χρονικής διάρκειας υφίσταται η σχέση

$$\Delta E \Delta t = \hbar \Rightarrow \hbar \Delta \nu \Delta t \approx \hbar \Rightarrow \Delta \nu \Delta t \approx 1 \quad (1.4.3)$$

Και αντίστοιχα το μήκος που "διανύει" ο κυματοσυρμός σε χρόνο Δt θα ισούται με

$$\ell_t \equiv \Delta x = c \Delta t = \frac{c}{\Delta \nu} = \left| \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta \lambda} \right| \quad \text{μήκος χρονικής συμφωνίας} \quad (1.4.4)$$

και ονομάζεται **μήκος χρονικής συμφωνίας** ℓ_t . Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο είναι το $\Delta \lambda$, τόσο μικρότερο είναι το μήκος συμφωνίας. Έτσι για το φως ενός λαμπτήρα πυράκτωσης ως το μήκος συμφωνίας είναι $\ell_c \sim 1 \mu m$ (περίπου 2 μέσα μήκη κύματος), για το φως μιας φασματικής λυχνίας χαμηλής πίεσης είναι $\ell_c \sim 1 m$ (περίπου 10^6 μέσα μήκη κύματος), ενώ για φως Laser μπορεί να ανέρχεται έως και $\ell_c \sim 10^2 m$ (περίπου 10^8 μέσα μήκη κύματος).

1.4.2. Χωρική συμφωνία

Η έννοια της χωρικής συμφωνίας προέρχεται από τη συνεισφορά της **διαφοράς δρόμου** (πορείας) που ακολουθούν οι διάφορες κυμάνσεις μέχρι το κοινό σημείο συμβολής στη δημιουργία της συνολικής φάσης. Αυτό στην εξίσωση (1.3.9), εκφράζεται από τον όρο $(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r}$. Ο όρος αυτός είναι γνωστός και ως **όρος φάσης λόγω διαφοράς οπτικού δρόμου** $n \Delta s$, καθόσον

$$(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} = n |\mathbf{k}| (\hat{\mathbf{k}}_1 - \hat{\mathbf{k}}_2) \cdot \mathbf{r} = n |\mathbf{k}_\theta| (s_1 - s_2) = \frac{2\pi n \Delta s}{\lambda_0} \quad (1.4.5)$$

Δηλαδή, κατά τη μελέτη της χωρικής συμφωνίας θεωρούμε ότι διαφορά φάσεως $\varphi(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t)$ είναι χρονικά σταθερή.

Υπό αυτές τις προϋποθέσεις και με τη βοήθεια της (1.3.9) συνάγεται ότι υπάρχουν περιοχές του χώρου όπου η συνολική ένταση παραμένει σταθερή και ότι η αριθμητική τιμή της εξαρτάται από την τιμή που παίρνει ο όρος

$$\cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_1(t) - \varphi_2(t))] = \text{σταθερό} \quad (1.4.6)$$

Από την (1.4.6), αν λάβουμε υπόψη μας ότι, $|\mathbf{k}_1| = |\mathbf{k}_2| = |\mathbf{k}| \Rightarrow (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} = k(s_1 - s_2)$ προκύπτει ότι αν

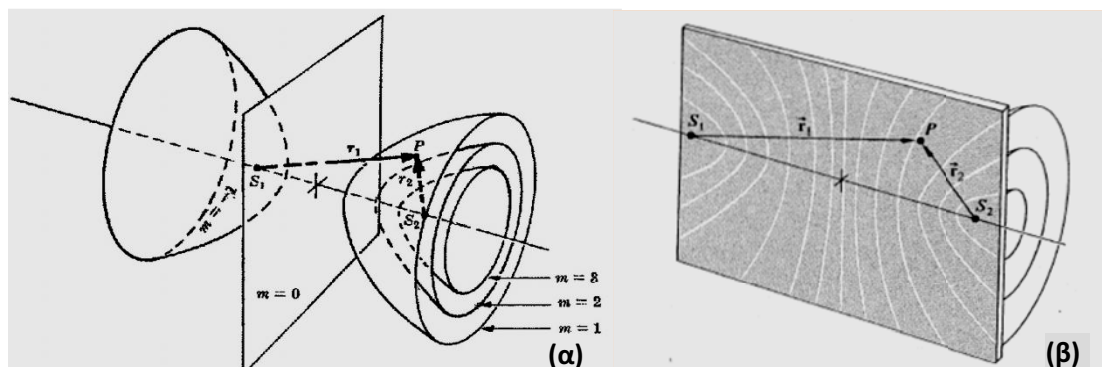
$$\Delta s = s_1 - s_2 = \frac{2\pi m + (\varphi_2 - \varphi_1)}{k} \quad (1.4.7)$$

τότε η συνολική ένταση παίρνει τη μέγιστη τιμή της.

Αντίστοιχα αν

$$\Delta s = s_1 - s_2 = \frac{(2m+1)\pi + (\varphi_2 - \varphi_1)}{k} \quad (1.4.8)$$

παίρνει την ελάχιστη τιμή της.



Σχήμα 1.4-6 (α) Ο γεωμετρικός τόπος μέγιστης έντασης είναι παραβολοειδή εκ περιστροφής περί των κοινό άξονα. (β) Η μορφή των κροσσών συμβολής στο επίπεδο που περιέχει τον άξονα των πηγών είναι υπερβολές εκ περιστροφής περί τον κοινό άξονα

Οι εξισώσεις (1.4.7) και (1.4.8) παριστούν γεωμετρικούς τόπους. Η μορφή των γεωμετρικών τόπων είναι υπερβολοειδή εκ περιστροφής περί τον κοινό άξονα που ενώνει τις πηγές. **Οι φωτεινές (μέγιστη ένταση) και οι σκοτεινές (ελάχιστη ένταση) περιοχές ονομάζονται κροσσοί συμβολής** και απεικονίζονται γενικά στο σχήμα Σχήμα 1.4-6 (α), ενώ στο (β) απεικονίζονται για το επίπεδο που περιέχει τον άξονα των πηγών. Αν το επίπεδο είναι κάθετο στον κοινό άξονα οι κροσσοί συμβολής θα ήταν ομόκεντροι κύκλοι (α), ενώ αν είναι παράλληλο με τον κοινό άξονα, αλλά δεν τον περιέχει, είναι ισοπαχείς ευθείες παράλληλες (υπερβολές) με τη μεσοκάθετο. Συνεπώς, η μορφή των κροσσών συμβολής εξαρτάται από τις ιδιότητες (μορφή) του γεωμετρικού τόπου.

1.5. Πειραματικές διατάξεις

Πριν προχωρήσουμε στην αναλυτική μελέτη συγκεκριμένων διατάξεων, θα θέλαμε να επανέλθουμε για ορισμένες, επιπλέον, διευκρινήσεις αναφορικά με την πειραματική υλοποίηση των απαιτούμενων συνθηκών συμβολής.

Όμως είδαμε αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά, ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων των κυμάτων. Ιδιαίτερα προβληματική είναι η υλοποίηση της απαίτησης της σταθερότητας της διαφοράς των αρχικών φάσεων, η οποία μάλιστα καθίσταται τόσο πιο δύσκολη, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, δηλαδή στην οπτική ή ακόμη και σε υψηλότερες συχνότητες (ακτίνες Χ).

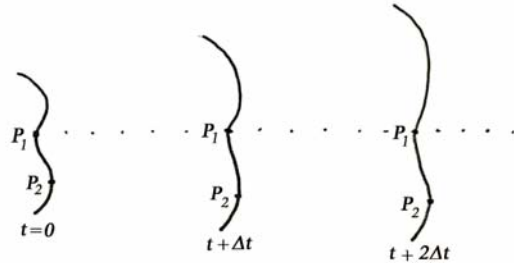
Συνεπώς, εφόσον η δημιουργία και η χρήση **ανεξαρτήτων** συμφώνων πηγών είναι σχεδόν ανέφικτη σε αυτές τις υψηλές συχνότητες, η προσπάθεια επικεντρώνεται στη δημιουργία σύμφωνων δεσμών. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, προφανώς απαιτείται, κατά κάποιον τρόπο, τεχνητός "διπλασιασμός" της πηγής. Το τελευταίο προφανώς θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της δημιουργίας ενός "ειδώλου" της πηγής και τη χρησιμοποίηση των δύο δεσμών. Από την αρχική πηγή και από το είδωλό της. Αυτό βέβαια μπορεί να το υλοποιήσει ένας πολύ μεγάλος αριθμός οπτικών διατάξεων. Δεν αρκεί όμως αυτό. Θα πρέπει να διασφαλίσουμε ότι **οι συμβάλλουσες δέσμες προέρχονται από το ίδιο αρχικό μέτωπο κύματος**. Την τελευταία απαίτηση την υλοποιούν μόνο δύο μεγάλες κατηγορίες διατάξεων.

- Οι διατάξεις διαίρεσης μετώπου κύματος.

- Οι διατάξεις διαίρεσης πλάτους.

Το βασικό χαρακτηριστικό της κατηγορίας των διατάξεων διαίρεσης μετώπου κύματος είναι ότι μέρη του **ιδίου μετώπου** κύματος είτε χρησιμοποιούνται απευθείας ως πηγές συμφώνων δευτερευόντων κυμάτων (π.χ. διάταξη Young) είτε, μέσω διατάξεων, για τη δημιουργία πηγών ειδώλων δευτερευουσών κυμάτων (κάτοπτρο Lloyd, διπλό κάτοπτρο του Fresnel, δίπρισμα Fresnel). Προφανώς, το ότι οι δευτερεύουσες πηγές πληρούν την απαίτηση της σταθερότητας της διαφοράς φάσης εδράζεται στο γεγονός ότι ως μέρη του ίδιου μετώπου κύματος έχουν την ίδια φάση και συνεπώς μηδενική διαφορά.

Και η κατηγορία της διαίρεσης του πλάτους υλοποιεί την απαίτηση της σταθερότητας της διαφοράς φάσεως, καθόσον διαιρείται μόνο το πλάτος, ενώ το μέτωπο του κύματος (φάση) διέρχεται **ολόκληρο** αν και οι προκύπτουσες δύο δέσμες μπορεί να ακολουθούν διαφορετικές πορείες. (Παράλληλη πλάκα, Συμβολόμετρο Michelson, Δακτύλιοι του Newton κ.λπ.). Βέβαια και εδώ εννοείται ότι η διαφορά φάσεως που εισάγεται από τις διαφορετικές πορείες κατά τη διαίρεση του πλάτους δεν θα πρέπει να ξεπερνά το χρονικό μήκος συμφωνίας ℓ_t της πηγής.

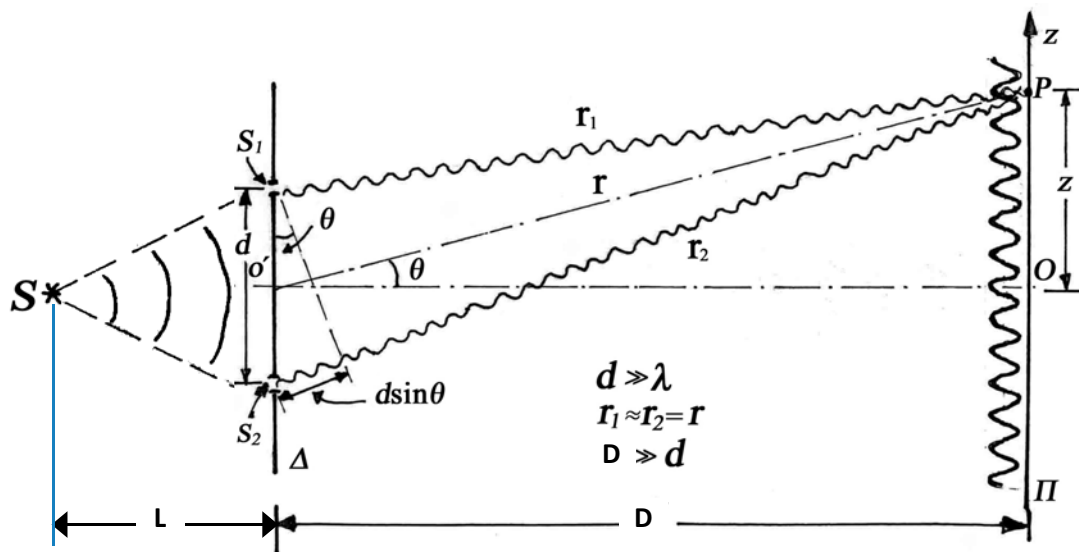


Σχήμα 1.5-1 Διάδοση μετώπων κυμάτων. Η διαφορά φάσεως δύο σημείων του μετώπου π.χ. P_1 και P_2 παραμένει σταθερή (μηδενική).

1.6. Διατάξεις διαίρεσης μετώπου κύματος

1.6.1. Διάταξη Young

Η απλούστερη και η βασικότερη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για να επιδειχθεί και μελετηθεί το φαινόμενο της συμβολής είναι η διάταξη του Young. Αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6-1. Υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις αναφορικά με το είδος της χρησιμοποιούμενης πηγής. Στο Σχήμα 1.6-1 η πηγή θεωρείται ότι είναι σημειακή και σχεδόν μονοχρωματική. Τα μέτωπα κύματος θεωρούνται σφαιρικά και προσπίπτουν σε δύο πολύ μικρά ανοιγμάτα S_1 και S_2 . Προφανώς αν η πηγή είχε τοποθετηθεί στην εστία ενός φακού τα κύματα θα ήταν επίπεδα. Η μορφή και το μέγεθος των ανοιγμάτων επηρεάζουν τη μορφή (λόγω περίθλασης) και το βαθμό συμφωνίας (χωρικό) των δευτερευουσών δεσμών. Ο ρόλος των ανοιγμάτων περιορίζεται σημαντικά, αν το μέγεθός τους είναι σχετικά μικρό. Αν το μέτωπο



Σχήμα 1.6-1 Σχηματική παράσταση της διάταξης Young θεωρώντας σημειακή πηγή.

του προσπίπτοντος κύματος είναι σφαιρικό θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι οι σχισμές S_1 και S_2 θα κείνται πάνω στο ίδιο μέτωπο κύματος, το οποίο εξασφαλίζεται αν η απόσταση d μεταξύ των S_1 και S_2 είναι πολύ μικρή. (Να περιλαμβάνονται στο κοινό εφαπτομενικό επίπεδο). Εξίσου όμως σημαντικός είναι και ο ρόλος της θέσης του πετάσματος (Π). Αυτός προκύπτει από το γεγονός ότι και οι δευτερεύουσες πηγές (ανοίγματα S_1 και S_2 θα πρέπει να θεωρούνται σημειακές ως προς τα σημεία του πετάσματος. Στην υλοποίηση αυτή, πλην των γεωμετρικών αποστάσεων, σημαντικό ρόλο παίζει και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Αυτό εμπλέκεται στη σύγκριση του μήκους κύματος λ με το μέγεθος α των ανοιγμάτων (θεωρούνται ίδια). Όπως θα δούμε στην περίθλαση ένα άνοιγμα με $\alpha/\lambda \ll 1$, δίνει εικόνα περίθλασης που περιλαμβάνει όλο το χώρο μετά το άνοιγμα, δηλαδή λειτουργεί ως σημειακή πηγή μετά το άνοιγμα. Συνοψίζοντας τα παραπάνω οι απαιτήσεις περί διαίρεσης του μετώπου κύματος υλοποιούνται αν

$$\frac{d}{D} \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \ll 1 \quad (1.6.1)$$

Παρατηρήστε ότι, ακόμη και στη περίπτωση που το προσπίπτον κύμα στις S_1 και S_2 ήταν επίπεδο (μετά από χρήση φακού), πάλι η απόσταση και το μέγεθος των ανοιγμάτων θα πρέπει να υλοποιεί την (1.6.1).

Από τη γεωμετρία της διάταξης προκύπτει ότι τα δύο αυτά σύμφωνα σφαιρικά κύματα φθάνουν σε ένα σημείο P του πετάσματος παρατήρησης με διαφορά φάσεων:

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{k}, \mathbf{r}) &= (\varphi_2 - \varphi_1) + \mathbf{k} \cdot (S_2 \mathbf{P} - S_1 \mathbf{P}) = (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \\ &\simeq (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad \tan \theta = \frac{OP}{D} = \frac{z}{D} \xrightarrow{\theta \ll} \simeq \sin \theta \quad (1.6.2) \\ \varphi(\mathbf{k}, \mathbf{r}) &= (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{z}{D} \end{aligned}$$

Όπου, $(\varphi_2 - \varphi_1)$ είναι η αρχική διαφορά φάσεων, z είναι η τετμημένη του P, λ το μήκος κύματος του φωτός που προσπίπτει. Η κατανομή της έντασης προκύπτει με τη βοήθεια της (1.3.9) και (1.6.2) και δίνεται από την:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_2(t) - \varphi_1(t))] \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi dz}{\lambda D} + (\varphi_2 - \varphi_1)\right] \quad (1.6.3) \end{aligned}$$

Για την περίπτωση ίδιων σχισμών ($I_1 = I_2 = I_0$) και μηδενικής αρχικής διαφοράς φάσεων $(\varphi_2 - \varphi_1)$ παίρνουμε:

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos \frac{2\pi dz}{\lambda D}\right) = 4I_0 \cos^2 \frac{\pi dz}{\lambda D} \quad (1.6.4)$$

Οι θέσεις μέγιστης έντασης² (φωτεινοί κροσσοί) και η μεταξύ τους απόσταση Δz προσδιορίζονται από τη συνθήκη (1.4.7) και είναι:

$$z = m \frac{\lambda D}{d} \quad \Delta z = z_{m+1} - z_m = \frac{\lambda D}{d} \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (1.6.5)$$

² Παρατηρήστε ότι για $z = 0$ δεν έχουμε μέγιστο αν $(\varphi_1 - \varphi_2) \neq 0$.

ενώ οι θέσεις ελάχιστης (μηδενικής) έντασης (σκοτεινοί κροσσοί) προσδιορίζονται από τη συνθήκη $\varphi = (2m+1)\pi$. Οι θέσεις των ελαχίστων και η μεταξύ τους απόσταση δίνονται από:

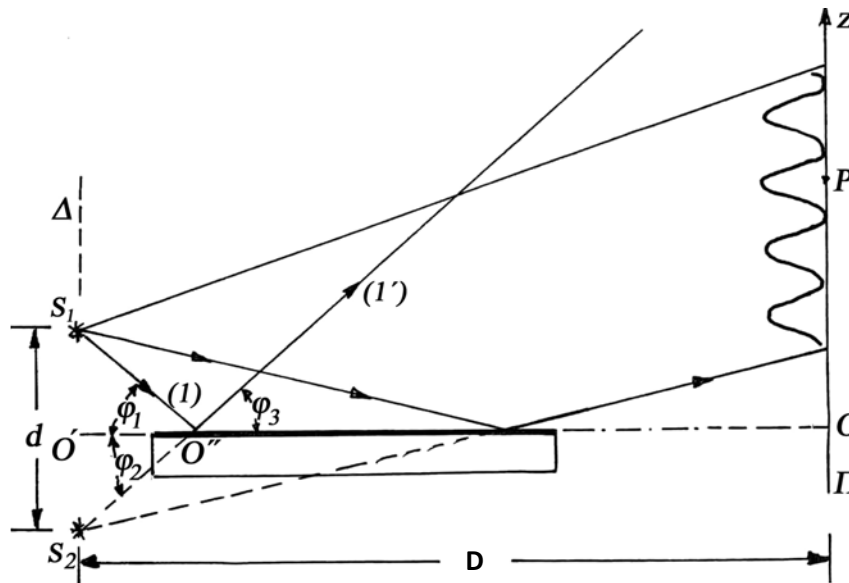
$$z = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda D}{d} \quad \Delta z = z_{m+1} - z_m = \frac{\lambda D}{d} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1.6.6)$$

Παρατηρήστε ότι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σκοτεινών κροσσών ισούται με την απόσταση μεταξύ διαδοχικών φωτεινών. Επομένως η εικόνα που παρατηρείται στο πέτασμα είναι παράλληλοι και εναλλάξ φωτεινοί-σκοτεινοί κροσσοί.

Αναφορικά με τη μορφή (σχήμα) των κροσσών συμβολής, όπως είπαμε στην παράγραφο 1.4.2 και αποτυπώνεται μαθηματικά από τις σχέσεις (1.4.7) και (1.4.8) και οι οποίες παριστάνονται γραφικά στο Σχήμα 1.4-6, οι κροσσοί συμβολής είναι υπερβολοειδή εκ περιστροφής περί τον κοινό των άξονα S_1 και S_2 . Αν όμως η απόσταση μεταξύ των πηγών είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση παρατήρησης (όπως στο Σχήμα 1.6-1), τότε τα υπερβολοειδή εκφυλίζονται σε επίπεδα κάθετα τον κοινό άξονα S_1S_2 . Αυτό άλλωστε φαίνεται και από το ότι και στον τύπο (1.6.3) η ένταση εξαρτάται μόνο από την κάθετη απόσταση παράλληλα προς τον κοινό άξονα S_1S_2 . Συνεπώς πάνω στο πέτασμα του Σχήμα 1.6-1 θα εμφανίζονται ευθείες εναλλάξ φωτεινές και σκοτεινές που θα απέχουν μεταξύ τους (φωτεινές-σκοτεινές) απόσταση ίση με $\Delta z / 2$. Αναφορικά με τη ευκρίνειά τους, αν θεωρήσουμε ότι οι επιμέρους δέσμες είναι χρονικά (μονοχρωματικές) και χωρικά (μικρά ανοίγματα σε μικρή απόσταση) σύμφωνες, γίνεται μέγιστη αν τα ανοίγματα είναι ίδια.

1.6.2. Κάτοπτρο του Lloyd

Μια από τις παραλλαγές της διάταξης Young είναι η διάταξη του κατόπτρου του Lloyd, που παριστάνεται στο Σχήμα 1.6-2. Η δημιουργία των δύο πηγών είναι εμφανής. Προφανώς



Σχήμα 1.6-2 Σχηματική παράσταση της διάταξης Lloyd

για να παρατηρήσουμε τους κροσσούς συμβολής εκ μέρους των δύο αυτών πηγών S_1 και S_2 θα πρέπει να υλοποιούνται όσα είπαμε παραπάνω, δηλαδή η απόσταση S_1S_2 να είναι μικρή ή ισοδύναμα η γωνία πρόσπτωσης ϕ_1 να είναι πολύ μικρή, που με τη σειρά τους υλοποιούν την απαίτηση να διαιρούμε το ίδιο μέτωπο κύματος.

Η μόνη διαφοροποίηση της διάταξης Lloyd από τη διάταξη του Young συνίσταται στο γεγονός ότι τα κύματα που προέρχονται από την πηγή S_2 υφίστανται μια διαφορά φάσης κατά π ($=180^\circ$) σε σχέση με αυτά που προέρχονται από την S_1 , λόγω της ανακλάσης σε οπτικά πυκνότερο υλικό, δηλαδή:

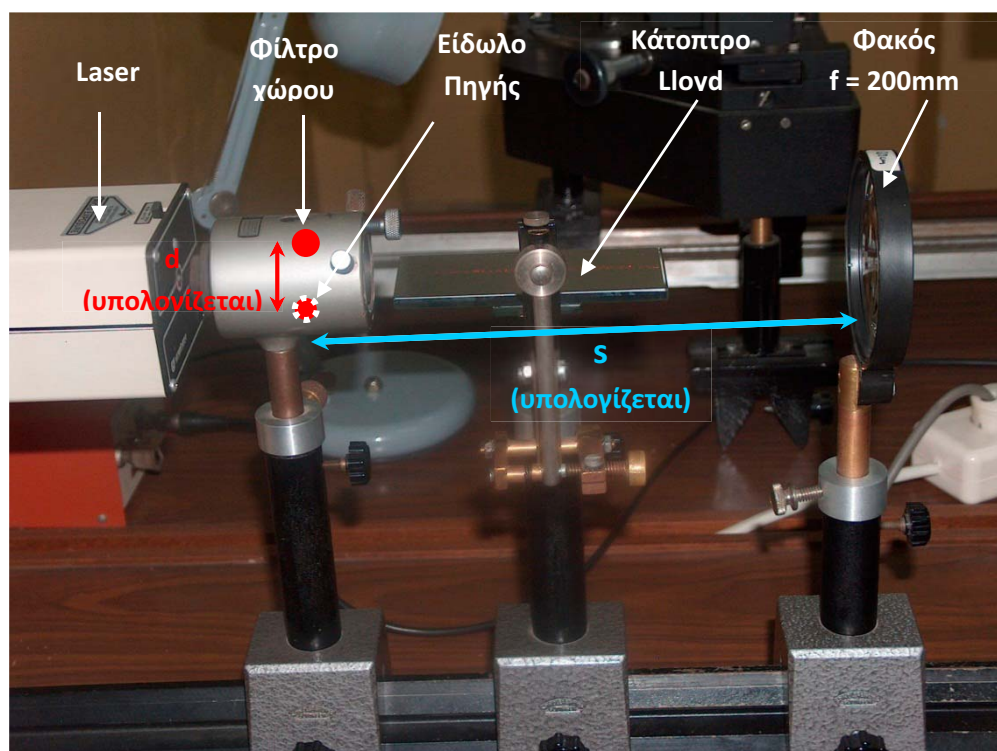
$$\varphi(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{z}{D} + \pi \quad (1.6.7)$$

και η κατανομή έντασης από την

$$I = 2I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi dz}{\lambda D} + \pi\right) \right] = 4I_0 \sin^2 \frac{\pi dz}{\lambda D} \quad (1.6.8)$$

Προφανώς λόγω του άλματος φάσεως κατά π στο κάτοπτρο του Lloyd, οι θέσεις των φωτεινών (σκοτεινών) αντιστοιχούν στις θέσεις των σκοτεινών (φωτεινών) στη διάταξη Young και αντίστροφα.

Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6-3. Αποτελείται από μια πηγή Laser He-Ne, η οποία παράγει λεπτή παράλληλη δέσμη φωτός, ένα φίλτρο χώρου το οποίο είναι



Σχήμα 1.6-3 Συμβολομετρική διάταξη κατόπτρου Lloyd

ουσιαστικά ένας σύνθετος φακός πολύ μικρής εστιακής απόστασης. Αυτό μετατρέπει την παράλληλη δέσμη του Laser σε αποκλίνουσα. Μετά από το φίλτρο χώρου και κοντά σε αυτό τοποθετείται το κάτοπτρο Lloyd, το οποίο είναι μια επίπεδη μεταλλική κατοπτρική επιφάνεια που μπορεί να στραφεί περί οριζόντιο άξονα. Σε μεγάλη απόσταση, στον απέναντι τοίχο, βρίσκεται ένα λευκό πέτασμα, επάνω στο οποίο σχηματίζονται οι κροσσοί συμβολής. Επίσης στη διάταξη περιλαμβάνεται και ο φακός, ο οποίος τοποθετείται μετά το κάτοπτρο Lloyd, όταν χρειάζεται να προσδιορίσουμε την απόσταση d των δύο σύμφωνων πηγών.

1.6.3. Πειραματική εργασία

Αφαιρούμε από τη διάταξη τον φακό και ρυθμίζουμε το κάτοπτρο Lloyd καθ' ύψος και κλίση, έτσι ώστε να παρατηρούμε στο πέτασμα ευθύγραμμους και ισαπέχοντες κροσσούς συμβολής. Με τη βοήθεια ενός χάρακα μετρούμε την απόσταση ανάμεσα σε 10 ή περισσότερους φωτεινούς ή σκοτεινούς κροσσούς και διαιρώντας προσδιορίζουμε τη μέση απόσταση Δx ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς φωτεινούς ή σκοτεινούς κροσσούς. Χωρίς να αγγίξουμε το κάτοπτρο Lloyd, τοποθετούμε το φακό μεταξύ κατόπτρου και πετάσματος και τον

μετακινούμε **προσεκτικά** εμπρός-πίσω, μέχρις ότου η εικόνα συμβολής επάνω στο πέτασμα να περισταλεί σε δύο φωτεινές κηλίδες. Οι κηλίδες αυτές είναι ουσιαστικά τα είδωλα των δύο σύμφωνων πηγών. Μετρούμε την απόσταση d' ανάμεσα στα δύο αυτά είδωλα καθώς και την απόσταση s' φακού-πετάσματος.

Επαναλαμβάνουμε την ίδια εργασία τουλάχιστον για 5 έως 10 διαφορετικές κλίσεις του κατόπτρου Lloyd, συνεπώς συμπληρώνοντας τον Πίνακα 1.6-1 έχουμε αντίστοιχες διαφορετικές αποστάσεις d των σύμφωνων πηγών.

Πίνακας 1.6-1 Απαιτούμενα πειραματικά δεδομένα για τη διάταξη Lloyd.

α/α	Αρ. Κροσσών (n)	$\Delta\chi n$ (mm)	$\Delta\chi$ (mm)	d' (mm)	s' (mm)	$s =$ $f \cdot s' / (s' - f)$	$D =$ $s + s'$	$d =$ $d's/s'$	$1/d$
1									
2									
...									

1.6.4. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Η απόσταση s φακού-σύμφωνων πηγών υπολογίζεται από τη σχέση απεικόνισης φακού:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (1.6.9)$$

όπου f είναι η εστιακή απόσταση του φακού η οποία αναγράφεται επάνω του και s' η απόσταση φακού-πετάσματος.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την απόσταση d ανάμεσα στις δύο σύμφωνες πηγές από τη σχέση μεγέθυνσης του φακού:

$$\frac{d}{d'} = \frac{s}{s'} \quad (1.6.10)$$

Η απόσταση σύμφωνων πηγών-πετάσματος είναι:

$$D = s + s' \quad (1.6.11)$$

Από τα ζεύγη τιμών των d και $\Delta\chi$ που έχουμε μετρήσει, κατασκευάζουμε την ευθεία μεταβολής του $\Delta\chi$ συναρτήσεως του $1/d$. Η ευθύγραμμη προσαρμογή των πειραματικών σημείων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων μας δίνει την κλίση, η οποία σύμφωνα με τις σχέσεις (1.6.5) και (1.6.6) είναι ίση με λD . Συνεπώς αφού γνωρίζουμε το D μπορούμε να υπολογίσουμε το μ.κ. της ακτινοβολίας λ .

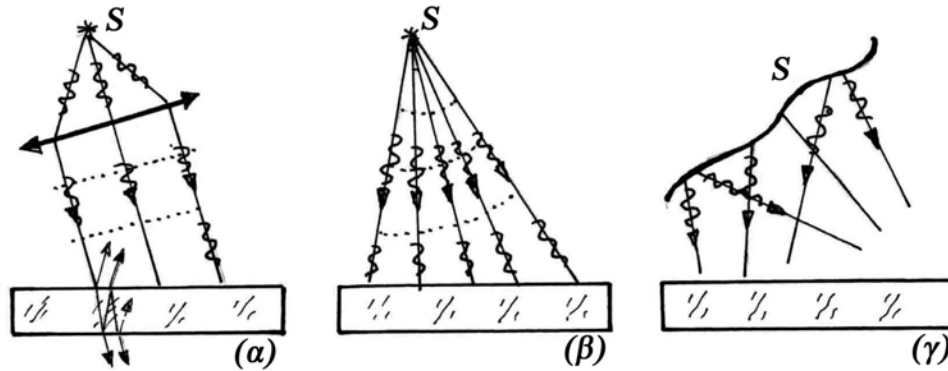
1.7. Διατάξεις διαίρεσης πλάτους κύματος

1.7.1. Διαίρεση πλάτους από επίπεδη πλάκα διηλεκτρικού

Στην ενότητα 1.5 είχε αναφερθεί ότι οι διατάξεις διαίρεσης πλάτους υλοποιούν την απαραίτητη προϋπόθεση της χρονικής σταθερότητας της διαφοράς φάσεως των επιμέρους πηγών (αρχική και ειδώλων). Βασικό στοιχείο του μηχανισμού διαίρεσης αποτελεί ένα διαφανές πλακίδιο από διηλεκτρικό (ορισμένης ανακλαστικότητας και διαπερατότητας), για το οποίο απαιτούμε να μην απορροφά το φως³.

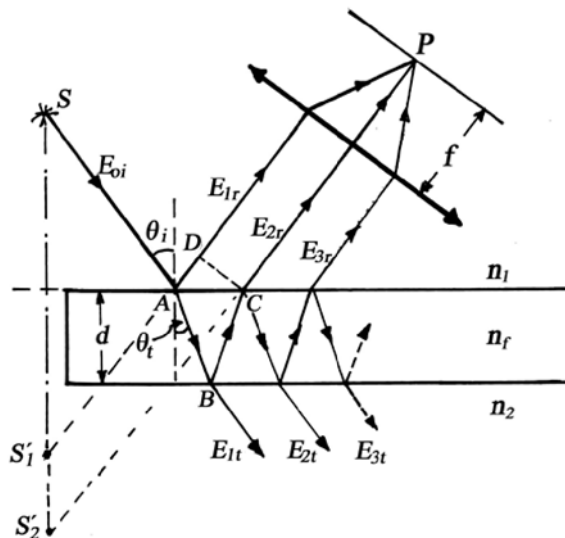
³ Αν το πλακίδιο απορροφά την προσπίπτουσα δέσμη, τότε μεταξύ της προσπίπτουσας και των ανακλωμένων και διερχομένων δεσμών δημιουργείται διαφορά φάσεως που εξαρτάται από το μήκος

Η βασικότερη διάταξη διαίρεσης πλάτους είναι μια παράλληλη πλάκα διηλεκτρικού με παράλληλες έδρες, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 1.7-1 για τους τρεις βασικότερους τρόπους λειτουργίας της από σημειακή και εκτεταμένη πηγή.



Σχήμα 1.7-1 Διάταξη διαίρεσης πλάτους μέσω διηλεκτρικής πλάκας με παράλληλες έδρες.

Ο τρόπος δημιουργίας των δευτερευουσών πηγών για παράλληλη προσπίπτουσα δέσμη (περίπτωση (α) στο Σχήμα 1.7-1) παριστάνεται αναλυτικά στο Σχήμα 1.7-2. Παρατηρήστε ότι για τη δημιουργία των κροσσών συμβολής απαιτείται η παρουσία ενός συγκλίνοντος φακού και ότι οι κροσσοί σχηματίζονται στο εστικό επίπεδο του φακού (στο άπειρο χωρίς φακό).



Σχήμα 1.7-2 Σχηματική παράσταση πορείας ακτίνων κατά τη διαίρεση πλάτους από ισοπαχή επίπεδη πλάκα

Από τη διάταξη του σχήματος προκύπτει ότι η διαφορά φάσης, η οποία δίνεται από την έκφραση (1.4.5), για την περίπτωση $n_i = n_2$, ισούται με:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{2\pi}{\lambda} [n_f(AB + BC) - n_i AD] - \pi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[n_f \frac{2d}{\cos \theta_t} - n_i 2d \sin \theta_t \tan \theta_t \right] - \pi \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_f 2d \cos \theta_t - \pi = \frac{4\pi n_f d}{\lambda} \cdot \cos \theta_t - \pi = \frac{4\pi d}{\lambda} \cdot \sqrt{n_f^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_t} - \pi \end{aligned} \quad (1.7.1)$$

κύματος και την κατάσταση πόλωσης. Επιπλέον μεταβάλλεται και η αντίστοιχη κατάσταση πόλωσης. Συνεπώς ο προσδιορισμός τόσο της μορφής όσο και της θέσης των κροσσών συμβολής δεν είναι εύκολη υπόθεση. Όμως μέσα σε ορισμένα πλαίσια, π.χ. μικρή περιοχή μ.κ., μορφή προσπίπτουσας δέσμης, κ.ά. ισχύουν απλές εκφράσεις.

όπου η διαφορά φάσεως π οφείλεται ότι οι ακτίνες που ανακλώνται στο πάνω μέρος της πλάκας προηγούνται κατά π αυτών που ανακλώνται στην οπίσθια επιφάνεια.

Από την (1.7.1) και για δύο⁴ συμβάλλουσες δέσμες ίσης έντασης προκύπτει ότι η συνολική ένταση, τα μέγιστα και τα ελάχιστα θα δίνονται από τις εκφράσεις:

$$I = 2I_0(1 + \cos \varphi) = 4I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2} = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{2\pi n_f d}{\lambda} \cdot \cos \theta_i - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.7.2)$$

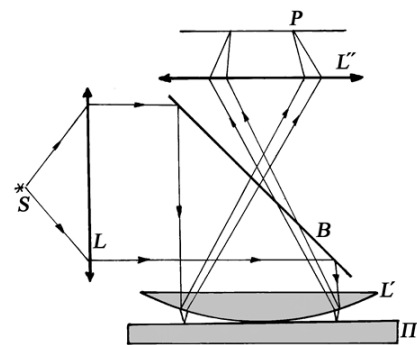
$$= 4I_0 \cos^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sqrt{n_f^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i} - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\varphi = \begin{cases} 2m\pi & \text{Μέγιστα} \\ (2m-1)\pi & \text{Ελάχιστα} \end{cases} \quad \text{ή} \quad \begin{cases} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sqrt{n_f^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i} - \frac{\pi}{2} \right) = m\pi \\ \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sqrt{n_f^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i} - \frac{\pi}{2} \right) = (m-1/2)\pi \end{cases} \quad (1.7.3)$$

Από τις (1.7.2) και (1.7.3) συνάγεται ότι η διαφορά φάσεως λόγω χωρικών διαδρομών **ΔΕΝ** εξαρτάται από τη θέση της πηγής S αλλά εξαρτάται μόνο από την κλίση (γωνία θ_i). Γι' αυτό και έχει επικρατήσει να ονομάζονται **κροσσοί συμβολής ίσης κλίσεως**. Αφού η διαφορά φάσεως δεν εξαρτάται από την πηγή, όλα τα σημεία μιας εκτεταμένης, αλλά σύμφωνης πηγής, θα μπορούσαν να πληρούν την απαίτηση της ίσης κλίσης και συνεπώς να παράγουν το ίδιο σύστημα κροσσών συμβολής. Αυτό φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 1.7-1 (γ). Να σημειωθεί ότι κροσσοί συμβολής ίσης κλίσης **ΔΕΝ** συνδέονται με καθορισμένο σχήμα. Το σχήμα τους εξαρτάται από τη μορφή του γεωμετρικού τόπου όπου η συνολική διαφορά πορείας $n_f d \cdot \cos \theta_i$ είναι περιττό πολλαπλάσιο του $\lambda/4$. [βλέπε (1.7.2) ή (1.7.3)].

1.7.2. Διάταξη συμβολής του Νεύτωνα

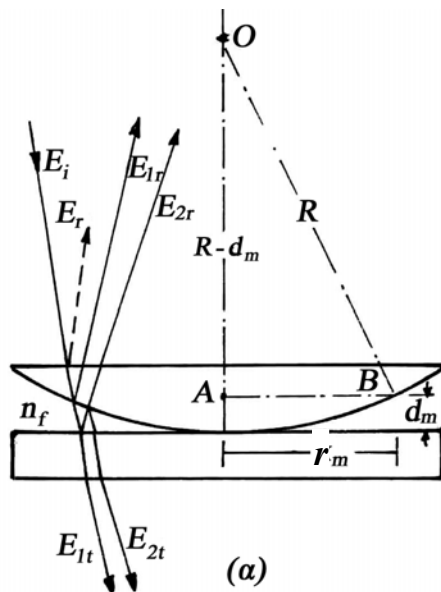
Πρόκειται για διάταξη συμβολής ανάλογη εκείνης του λεπτού πλακιδίου, μόνο που εδώ το ενεργό στοιχείο της συμβολής είναι πλέον ένα λεπτό στρώμα αέρα που σχηματίζεται ανάμεσα στην άνω επίπεδη επιφάνεια μιας γυάλινης πλάκας και τη σφαιρική επιφάνεια ενός επιπεδόκυρτου γυάλινου φακού L' μεγάλης –της τάξης μερικών μέτρων– ακτινότητας. Η διαίρεση του πλάτους πραγματοποιείται στην οπίσθια επιφάνεια του φακού L'. Παρατηρήστε ότι το μέγεθος του φακού είναι μεγαλύτερο από το εύρος της δέσμης (= περιλαμβάνει όλο το μέτωπο). Επίσης, ότι η προσπίπτουσα δέσμη καθίσταται παράλληλη μέσω της χρήσης του φακού L, ενώ η υπό κλίση 45° διαχωριστική πλάκα B εξασφαλίζει κάθετη πρόσπτωση στο φακό L'. Τέλος οι κροσσοί σχηματίζονται με τη βοήθεια του συγκλινόντος φακού L". Χωρίς τη χρήση του φακού οι κροσσοί θα σχηματιζόταν στο άπειρο λόγω



Σχήμα 1.7-3 Σχηματική παράσταση συμβολής του Νεύτωνα.

⁴ Η θεώρηση μόνο δύο δεσμών αν και δεν είναι απόλυτα σωστή ανταποκρίνεται με μεγάλη προσέγγιση στην πραγματικότητα, καθόσον π.χ. για μια πλάκα από γυαλί ($n_f = 1,5$) σε αέρα η E_{3r} και E_{3t} είναι αντίστοιχα το 5,7% και 0,15% της προσπίπτουσας δέσμης. Η μεγάλη διαφορά στις επιμέρους εντάσεις των συμβαλλουσών δεσμών οδηγεί στο αποτέλεσμα να είναι μειωμένη η ευκρίνεια των κροσσών (βλέπε εξίσωση (1.3.12)).

της σχεδόν παράλληλης πορείας των ακτίνων. Η λεπτομερής πορεία των ακτίνων παριστάνεται στο Σχήμα 1.7-4. Η δημιουργούμενη διαφορά οπτικού δρόμου και οι αντίστοιχες συνθήκες δημιουργίας μεγίστων (ελαχίστων) θα δίνονται από τις σχέσεις



Σχήμα 1.7-4 Λεπτομερής πορεία ακτίνων στη διάταξη των δακτυλίων του Νεύτωνα.

$$\Delta s = 2n_f d_m$$

$$d_m \approx \frac{x_m^2}{2R}$$

Καθόσον

$$x_m^2 = R^2 - (R - d_m)^2 \approx 2Rd - d_m^2 \approx 2Rd_m$$

$$\left. \begin{aligned} I &= 4I_o \cos^2 \frac{\varphi}{2} \\ \varphi &= 2n_f d_m \frac{2\pi}{\lambda} - \pi \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (1.7.4)$$

$$\left. \begin{aligned} 2n_f d_m &= (m + \frac{1}{2})\lambda \\ 2n_f d_m &= m\lambda, \quad m = 0, 1, 2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \text{Μέγιστο} \\ m = 0, 1, 2 \\ \text{Ελάχιστο} \end{cases}$$

Από τις σχέσεις (1.7.4) συνάγεται ότι η διαφορά του οπτικού δρόμου εξαρτάται μόνο από το πάχος d_m της "σφαιρικής σφήνας" μεταξύ φακού και πλάκας. Συνεπώς, επειδή η διάταξη εμφανίζει συμμετρία περί τον άξονα ΟΑ του φακού, (ίσες ακτίνες r_m αντιστοιχούν σε ίσα πάχη d_m) ο γεωμετρικός τόπος των κροσσών συμβολής θα εμφανίζει την ίδια συμμετρία, δηλαδή θα είναι κυκλικές περιφέρειες περί τον ίδιο άξονα. Επίσης από τις ίδιες σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε τις ακτίνες των κροσσών συμβολής.

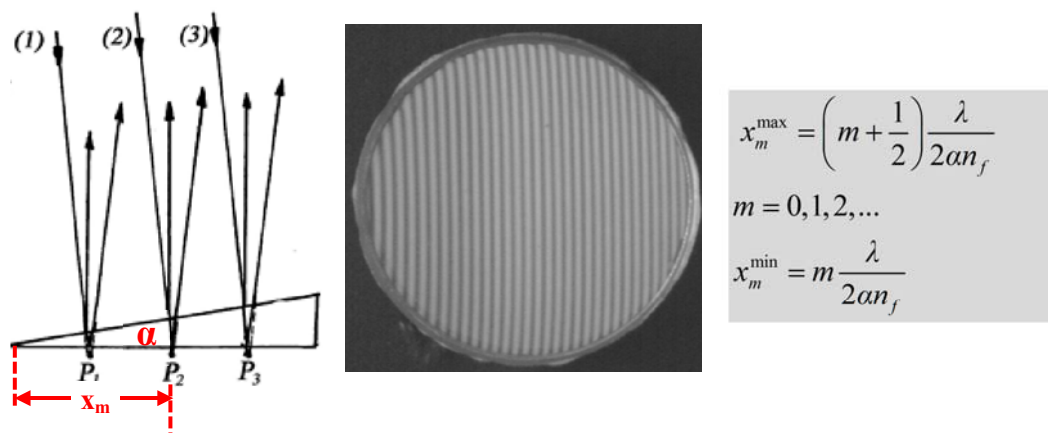
$$\left. \begin{aligned} r_m &= \sqrt{(m + \frac{1}{2}) \frac{\lambda R}{n_f}} \\ r_m &= \sqrt{m \frac{\lambda R}{n_f}} \end{aligned} \right\} m = 0, 1, 2 \Rightarrow \begin{cases} \text{Μέγιστο} \\ \\ \text{Ελάχιστο} \end{cases} \quad (1.7.5)$$

Από την (1.7.5) συνάγεται ότι το κέντρο ($r \rightarrow 0$, $m \rightarrow 0$) του συστήματος των κροσσών είναι σκοτεινό⁵. Επίσης αν η εικόνα συμβολής δημιουργούνταν όχι από τις ανακλώμενες ακτίνες, αλλά από τις διερχόμενες (διαθλόμενες), τότε δεν θα υπήρχε το άλμα φάσεως κατά π στη σχέση (1.7.4) και συνεπώς ο κεντρικός θα ήταν φωτεινός και γενικά οι δύο εικόνες συμβολής θα ήταν συμπληρωματικές (εναλλαγή φωτεινών με σκοτεινούς κροσσούς).

Κλείνοντας τη σύντομη θεώρηση της συμβολομετρικής διάταξης των δακτυλίων του Νεύτωνα, είδαμε ότι η διαφορά φάσεως προερχόταν αποκλειστικά από το διαφορετικό πάχος αέρα που διένυαν οι δύο ακτίνες. Αυτού του είδους οι κροσσοί ονομάζονται **κροσσοί ίσου πάχους**. Και εδώ η μορφή των (κύκλοι) δεν οφείλονται στο ότι είναι μόνον ίσου πάχους,

⁵ Μερικές φορές στο πείραμα ο κεντρικός εμφανίζεται φωτεινός. Αυτό οφείλεται στο ότι ο φακός δεν εφάπτεται στη διηλεκτρική πλάκα. Συνεπώς παρεμβάλλεται και ένα λεπτό στρώμα αέρος d_0 . Αν το $2n_f d_0$ αντιστοιχεί σε περιττό πολλαπλάσιο του $\lambda/2$, τότε η συνολική διαφορά φάσεως αντιστοιχεί με μέγιστο. Βέβαια και πάλι η εμφάνιση σκοτεινού κεντρικού δεν "εγγυάται" την απουσία λεπτού στρώματος. (Γιατί ;)

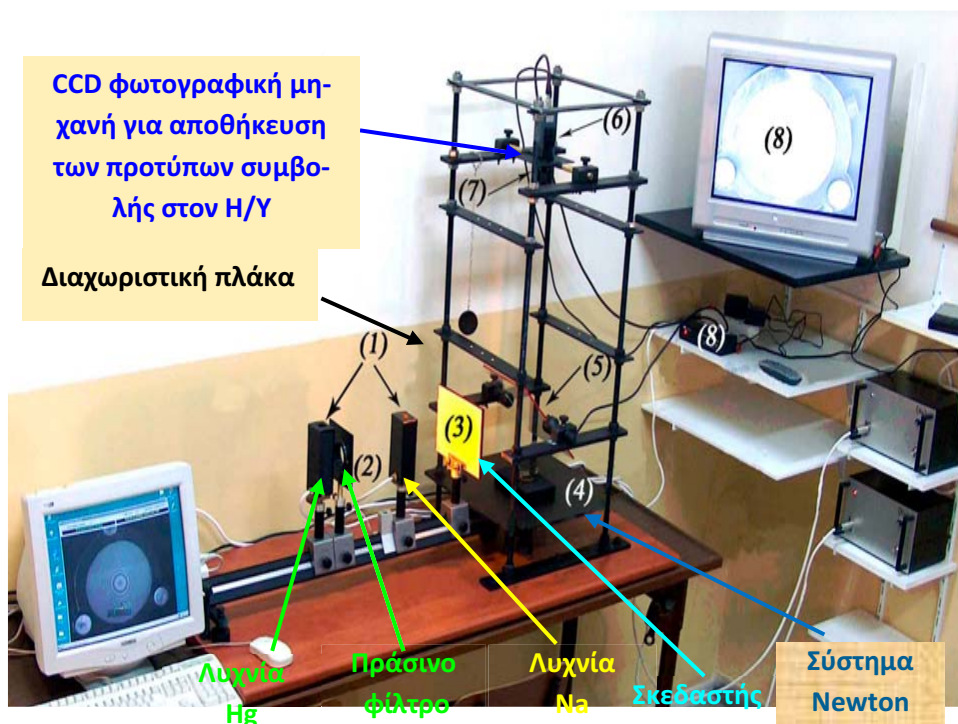
αλλά στη συμμετρία του "ίσου πάχους". Δηλαδή αν είχαμε μια σφήνα, τότε επειδή το πάχος είναι σταθερό παράλληλα προς την ακμή της σφήνας, οι κροσσοί ίσου πάχους θα ήταν "ευθείες" παράλληλες προς την ακμή, όπως πολύ χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 1.7-5.



Σχήμα 1.7-5 Κροσσοί συμβολής από σφήνα μικρής γωνίας (α) με παράλληλο φωτισμό.

Παρατηρήστε ότι οι κροσσοί είναι ισοπαχείς και ισαπέχοντες. Επίσης παρατηρήστε ότι η θέση των κροσσών (φωτεινών ή σκοτεινών) εξαρτάται από τη γωνία της σφήνας (πάχος = $d_m = x_m \cdot \alpha$) και από τον δείκτη διάθλασης του υλικού της σφήνας. Γενικά, όπως ήδη είπαμε και στην ενότητα 1.4.2 η μορφή των κροσσών συμβολής καθορίζεται αποκλειστικά από τη μορφή του γεωμετρικού τόπου, όπου η **συνολική διαφορά φάσεως** διατηρείται σταθερά. Προφανώς τα μέγιστα είναι ο γεωμετρικός τόπος όπου η συνολική διαφορά φάσεως ισούται με $m(2\pi)$ ή $m\lambda$.

Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 1.7-6. Αποτελείται από δύο φασματικές λυχνίες, μία Na και μία Hg, με τα τροφοδοτικά τους. Από ένα φίλτρο συμβολής που επιτρέπει τη διέλευση μόνο της πράσινης γραμμής του Hg και έναν σκεδαστή. Πρακτικά ο σκεδαστής δημιουργεί μια εκτεταμένη πηγή (περίπου αυτό που θα έκανε ένας παραλληλιστής



Σχήμα 1.7-6 Πειραματική συμβολομετρική διάταξη δακτυλίων του Νεύτωνα.

φακός). Μια διαχωριστική πλάκα υπό γωνία 45° εξασφαλίζει την κάθετη πρόσπτωση και το σύστημα του φακού (Σχήμα 1.7-7) και της διηλεκτρικής πλάκας, εξοπλισμένου με τρεις κοχλίες για την οριζοντιοποίηση του φακού και την επίτευξη επαφής με την πλάκα.



Σχήμα 1.7-7 Σύστημα δακτυλίων Νεύτωνα

Η καταγραφή των επιμέρους εικόνων συμβολής γίνεται μέσω μιας φωτογραφικής μηχανής CCD, εφοδιασμένης με έναν φωτογραφικό φακό, ο οποίος διαθέτει δακτύλιο εστίασης των κροσσών συμβολής (επίπεδο του αντικειμένου) και δακτύλιο που αυξομειώνει το διάφραγμά του. Το τελευταίο καθορίζει τελικά το εισερχόμενο φως δηλαδή το επίπεδο φωτισμού (λαμπρότητα) του ειδώλου στο φωτοευαίσθητο στοιχείο της CCD-φωτογραφικής μηχανής (επίπεδο ειδώλου). Οι εικόνες συμβολής απεικονίζονται σε οθόνη τηλεόρασης και αποθηκεύονται σε Η/Υ για περαιτέρω επεξεργασία.

1.7.2.1. Πειραματική εργασία

- Τοποθετούμε τη λυχνία Na στην οπτική ράβδο και την ανάβουμε.
- Αφαιρούμε το πράσινο φίλτρο (αν ήδη είναι τοποθετημένο στη ράβδο).
- Ανάβουμε τα τροφοδοτικά των φασματικών λυχνιών. (Για να σταθεροποιηθεί ο φωτισμός τους χρειάζονται περίπου 10-15 min.)

ΠΡΟΣΟΧΗ. Αν κατά κάποιο τρόπο σβήσουμε μια λυχνία, τότε για να την ξανανάψουμε θα πρέπει οπωσδήποτε να μεσολαβήσει ένα διάστημα 20 min για να κρυώσει. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της.

- Τροφοδοτούμε με τάση τη CCD φωτογραφική μηχανή καθώς και τον ενισχυτή σημάτων. (Πολύμπριζο που βρίσκεται κάτω από την οθόνη τηλεόρασης.)
- Ανάβουμε την οθόνη της τηλεόρασης. ("Q" και στο κουμπί "-" του μενού κάνουμε δύο κλικ. Αρχικά στο πάνω αριστερό τμήμα της οθόνης εμφανίζεται ο αριθμός 1 (αριθμός καναλιού), με το πρώτο κλικ το 0 και με το δεύτερο το AV. Το τελευταίο ι-δεόγραμμα (Audio-Video) σημαίνει ότι στην οθόνη της τηλεόρασης μπορούμε να δούμε το σήμα Video (πρότυπο συμβολής) που μας στέλνει η CCD φωτογραφική μηχανή.
- Βγάζουμε προσεκτικά το προστατευτικό κάλυμμα από το φακό της CCD.
- Φροντίζουμε ώστε το σύστημα φακού-πλάκας στη βάση του συμβολομέτρου να φωτίζεται μέσω του διαχωριστή δέσμης από την εκτεταμένη πηγή (σκεδαστής).
- Μετακινούμε ελαφρά το δείγμα στη βάση του συμβολομέτρου, προκειμένου το πρότυπο συμβολής να εμφανίζεται στο κέντρο της οθόνης της τηλεόρασης.
- Ανοίγουμε τον Η/Υ.
- Ακολουθούμε τις αναλυτικές οδηγίες που παρέχονται για την εμφάνιση της εικόνας συμβολής στην οθόνη του υπολογιστή.
- Κάνουμε τις μετρήσεις των διαμέτρων των σκοτεινών κροσσών συμβολής με τη βοήθεια του παρεχόμενου λογισμικού.
- Συμπληρώνουμε τον παρακάτω πίνακα μετρώντας τις διαμέτρους των πρώτων 6 έως 10 σκοτεινών κροσσών συμβολής.