

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



026000265466



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΟΡΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

175
ΜΠΛΕ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΕΛΕΥΣΕΩΣ

Βασίλειος Ν. Μόκας

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Εκπονήθηκε στα πλαίσια
του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
στο Εργαστήριο Φωτονικής του Τμήματος Φυσικής

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2004

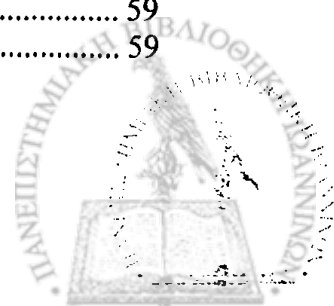


**Αφιερώνεται στους γονείς μου
Νίκο και Παναγιώτα
και
Στην Αδερφή μου Βαΐα**



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1	Ιστορική Αναδρομή	4
1.2	Γενικότητες Ολογραφίας	6
1.3	Ταξινόμηση Ολογραφικών Μεθόδων και Τύποι Ολογραμμάτων	8
2	ΣΥΜΒΟΛΗ Η/Μ ΚΥΜΑΤΩΝ	10
2.1	Συμβολή.....	10
2.2	Βασικές κατηγορίες συμβολής	11
2.3	Μελέτη Συμβολής Δυο Η/Μ Κυμάτων.....	12
2.3.1	Προϋποθέσεις για την επίτευξη άμεσα παρατηρήσιμης συμβολής	12
2.3.2	Συμφωνία-μονοχρωματικότητα πηγών	12
2.4	Πόλωση κυμάτων.....	15
2.5	Ένταση ακτινοβολίας I ενός Η/Μ κύματος	16
2.6	Προσδιορισμός της έντασης ακτινοβολίας από συμβολή	18
2.7	Προσδιορισμός και διερεύνηση του παράγοντα συμβολής.....	21
2.8	Ορατότητα ή ευκρίνεια των κροσσών	24
3	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	28
3.1	Ολόγραμμα Τρισδιάστατου Αντικειμένου.....	28
3.2	Παραγωγή Ολογράμματος.....	28
3.3	Αναπαραγωγή Αντικειμένου.....	30
4	ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ: ΤΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	33
4.1	Εισαγωγή.....	33
4.2	Φωτογράφιση Των Σχεδίων Συμβολής.....	34
4.3	Οι Κροσσοί Ως Απεικονίσεις Των Επιφανειών	36
4.4	Το Ολόγραμμα Ενός Σημειακού Αντικειμένου	38
4.5	Ολόγραμμα Μιας Εκτεταμένης Σκηνης	41
5	ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ.....	44
5.1	Εισαγωγή.....	44
5.2	Πραγματική Και Φανταστική Εικόνα.....	44
5.3	Πως Παράγεται Η Πραγματική Εικόνα	46
5.4	Βάθος Εστίασης	47
5.5	Μεγέθυνση	49
5.6	Πλεονασμός: Κάθε Κομμάτι Από Ένα Ολόγραμμα Είναι Ένα Ολόγραμμα....	50
6	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	52
6.1	Οπτική Τράπεζα.....	52
6.2	Όργανα Και Υλικά	54
6.3	LASER	54
6.4	Πολωτές	56
6.5	Φακοί	56
6.6	Διαχωριστές Δέσμης (Beamsplitters)	57
6.7	Κάτοπτρα	57
6.8	Φωτόμετρο	58
6.9	Φίλτρα	58
6.10	Βάσεις	59
6.11	Αντικείμενα	59



6.12	Φίλμ	60
6.13	Χημικά	63
7	ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΕΛΕΥΣΕΩΣ	64
	A. Απλή Ολογραφική Τεχνική.....	64
7.1	Βασική Πειραματική Διάταξη	64
7.1.1	Εξοπλισμός	64
7.1.2	Πειραματική Διαδικασία.....	68
7.1.3	Εμφάνιση Του Φίλμ.....	69
7.1.4	Απεικόνιση Του Φίλμ.....	71
	B. Ανώτερη Ολογραφική Τεχνική Με Διαχωριστή Δέσμης.....	72
7.2	Βασική Πειραματική Διάταξη	72
7.2.1	Εξοπλισμός	72
7.2.2	Πειραματική Διαδικασία	75
7.3	Βασική Πειραματική Διάταξη Με Τον Διαχωριστή Δέσμης Να Διαφοροποιεί Τις Εντάσεις Αναφοράς Και Αντικείμενου.....	78
7.3.1	Εξοπλισμός	78
7.3.2	Πειραματική Διαδικασία.....	81
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	82
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία είναι μια προσπάθεια για τη μελέτη, τον σχεδιασμό και την κατασκευή βασικών οπτικών ολογραμμάτων, καθώς και έναν οδηγό βελτιστοποίησης των συγκεκριμένων εφαρμογών. Για την επίτευξη απεικόνισης τρισδιάστατων αντικειμένων σε φωτοευαίσθητη διαφάνεια (φιλμ) χρησιμοποιήσαμε συνεχή μονοχρωματική ακτινοβολία ερυθρού χρώματος laser He:Ne, οπτικά εξαρτήματα καθώς και χημικά διαλύματα. Το συγκεκριμένο εργαστηριακό εξοπλισμό μας τον παρείχε το Εργαστήριο Φωτονικής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Τα αποτελέσματα που πήραμε μπορούμε να τα χαρακτηρίσουμε ικανοποιητικά καθώς στα φιλμ που επεξεργαστήκαμε εμφανίζονται ευδιάκριτα τα τρισδιάστατα αντικείμενα τα οποία χρησιμοποιήσαμε, τόσο στην κατασκευή ολογραμμάτων ανάκλασης όσο και στην κατασκευή ολογραμμάτων διέλευσης.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν άφησαν προοπτικές για περαιτέρω μελέτη των τεχνικών που αναπτύχθηκαν παραπάνω κυρίως όσον αφορά την τεχνική βελτίωσης της ποιότητας και της καθαρότητας των αντικειμένων που απεικονίζονται στα οπτικά ολογράμματα.



1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ολογραφία (Holography) είναι η τεχνική για την αποθήκευση και για την αναπαραγωγή (reconstruction) ενός τρισδιάστατου «ειδώλου» (image) από ένα τρισδιάστατο αντικείμενο (object), με τη βοήθεια μιας σύμφωνης (coherent) μονοχρωματικής δέσμης Laser. Η Ολογραφία επινοήθηκε το 1947 από τον Άγγλο ερευνητή Dennis Gabor, ξεκινώντας όμως από ένα διαφορετικό θέμα και έχοντας ως βασική επιδίωξη του την καλύτερευση της διακριτικής ικανότητας του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου. Η Αγγλική ονομασία δόθηκε από τον Gabor και προέρχεται από τις Ελληνικές λέξεις «όλος» (holos) και «γράμμα» (gramma).

Η επιτυχία της Ολογραφίας στο πρώτο αυτό στάδιο ήταν αρκετά περιορισμένη, ίσως γι αυτόν τον λόγο το βραβείο Nobel δόθηκε στον Gabor ύστερα από 23 χρόνια. Η ουσιαστική επιτυχία της Ολογραφίας άρχισε μετά το 1960, οπότε έγινε η κατασκευή της πρώτης φωτεινής πηγής Laser Ρουβιδίου (Ruby Laser) από τον T. H. Maiman. Μέχρι τότε, δεν υπήρχε μία πολύ καλή μονοχρωματική και σύμφωνη φωτεινή πηγή, απαραίτητη για τα φαινόμενα Συμβολής της Ολογραφίας.

Η πραγματική αξία της τεχνικής της Ολογραφίας με Παγκόσμιο ενδιαφέρον και με ευρείες πρακτικές εφαρμογές σε διάφορα ερευνητικά πεδία αναδείχθηκε μετά το 1962. Κατά το έτος αυτό, οι ερευνητές E. N. Leith και J. Upatnieks του Πανεπιστημίου του Michigan, επινόησαν μία νέα ολογραφική διάταξη «εκτός-άξονα» (off-axis), βοηθούμενοι προς τούτο από τις νεοεμφανισθείσες πηγές Laser. Με τον τρόπο αυτό έγιναν, στην ουσία, οι θεμελιωτές της σύγχρονης Ολογραφικής Τεχνολογίας. Στα μετέπειτα έτη, τα επιστημονικά περιοδικά γέμισαν με άρθρα, καθώς πολυάριθμα εργαστήρια



στράφηκαν σε αυτό που θεωρήθηκε ως μια από τις πιο συναρπαστικές εφευρέσεις του αιώνα. Εκατοντάδες διπλώματα ευρεσιτεχνίας εκδόθηκαν δεδομένου ότι τα μεγάλα εργαστήρια ανταγωνίστηκαν για να αναπτύξουν τα πάντα, από την ολογραφική τηλεόραση ως την ολογραφική δοκιμή των φτερών των αεροπλάνων κάτω από πίεση. Συγχρόνως, ο καθένας συνέχιζε να θαυμάζει το μαγικό των ανύπαρκτων τρισδιάστατων σκηνών που εμφανίζονται από ένα επίπεδο κομμάτι φιλμ ή γυαλιού.

Για την ανάπτυξη της ολογραφίας, σημαντικό ρόλο έπαιξε η κατασκευή των Lasers , ενώ πιο πρόσφατες σημαντικές ανακαλύψεις επιτρέπουν τη χρήση και του συνηθισμένου φωτός για την ανακατασκευή των ολογραμμάτων. Πραγματικά, δύο διαφορετικοί τύποι ολογραμμάτων, τα ορατά με laser ολογράμματα διέλευσης και τα ορατά με λευκό φως ολογράμματα ανάκλασης, αναπτύχθηκαν σχεδόν ταυτόχρονα, αν και είναι τόσο διαφορετικά. Στις ΗΠΑ, το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας ήταν με τα ολογράμματα διέλευσης στην αρχή, αφού αυτά εμφανίστηκαν τα καταλληλότερα για ποικίλες εργαστηριακές εφαρμογές. Αργότερα, τα ολογράμματα ανάκλασης κέρδισαν στη δημοτικότητα, δεδομένου ότι οι τεχνικές για αποτελέσματα καλύτερης ποιότητας τελειοποιήθηκαν.

Έτσι σήμερα, μπορούμε να μιλάμε για Ολογραφικές Μνήμες, Ολογραφικά Οπτικά Στοιχεία, Ολογραφική Συμβολομετρία, Ολογραφικά Μικροσκόπια, τρισδιάστατη απεικόνιση Ακτινογραφιών, τρισδιάστατα Υπερηχογραφήματα, κ.λπ.

Η Γεωμετρική Οπτική ερμήνευε επαρκώς ορισμένα φαινόμενα της συμπεριφοράς του φωτός όπως η ανάκλαση και η διάθλαση του από φακούς, πρίσματα, κάτοπτρο, κτλ. Δεν μπορούσε όμως να δώσει ικανοποιητική ερμηνεία σε κάποια άλλα φαινόμενα τα οποία είναι συνέπεια της κυματικής φύσης του φωτός. Ένα τέτοιο φαινόμενο είναι και η



δημιουργία χρωμάτων όταν το φως προσπέσει σε λεπτά υμένα, το οποίο οφείλεται στη συμβολή του φωτός, και παρατηρήθηκε πρώτη φορά από τον Robert Hook το 1665.

Η διατύπωση της κυματικής θεωρίας του φωτός το 1678 από τον Ολλανδό φυσικό Christian Huygens (1629-1695), παρά τις ατέλειες της, αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία στηρίχθηκε η ερμηνεία φαινομένων συμβολής και περίθλασης. Η πειραματική επιβεβαίωση όμως ήρθε αρκετά χρόνια αργότερα, το 1801, από τον Thomas Young (1773-1829) με μια πολύ έξυπνη πειραματική διάταξη η οποία έμεινε γνωστή και ως «πείραμα του Young». Θεωρείται η πρώτη πειραματική απόδειξη του φαινομένου της συμβολής δύο ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και βοήθησε σημαντικά στην αποδοχή της κυματικής θεωρίας του φωτός. Ένας από τους λόγους για τους οποίους η πειραματική επαλήθευση ήρθε αρκετά αργότερα από την παρατήρηση των φαινομένων και την πρώτη διατύπωση της βασικής θεωρίας, ήταν και η έλλειψη «σύμφωνων» φωτεινών πηγών. Η έννοια της συμφωνίας αποτελεί σημαντική παράμετρο στη θεώρηση της συμβολής.

Η Ολογραφία όμως δεν αφορά μόνο τα φωτεινά κύματα, αφού επιτυγχάνεται με οποιαδήποτε είδη κυμάτων : ΗΜ-κυμάτων (φωτεινά, ακτίνες-Χ, Μικροκύματα), Ακουστικά κύματα, «κύματα» Δέσμης Ηλεκτρονίων, κ.λπ.

1.2 Γενικότητες Ολογραφίας

Σε γενικές γραμμές, για την λήψη ενός ολογράμματος στην ορατή περιοχή του ΗΜ-φάσματος απαιτούνται:

- α) μία σύμφωνη, μονοχρωματική φωτεινή δέσμη
- β) ένα κατάλληλο αντικείμενο (διαφανές ή όχι)



γ) ένας τρόπος διαχωρισμού της αρχικής προσπίπτουσας δέσμης σε μία δέσμη ή κύμα αναφοράς (reference beam) και σε μία δέσμη ή κύμα αντικειμένου (object beam), οι οποίες διατηρούν την συμφωνία

δ) μία κατάλληλη καταγραφική διάταξη των αποτελεσμάτων της συμβολής των δύο αυτών δεσμών, π.χ. ένα φιλμ.

Για την αναπαραγωγή ή ανακατασκευή (reconstruction) του ληφθέντος ολογράμματος, ύστερα από την εμφάνιση του, απαιτούνται, χωρίς την παρουσία του αντικειμένου, τα ακόλουθα:

α) μια σύμφωνη, μονοχρωματική φωτεινή δέσμη Laser

β) το ολόγραμμα, με τον ίδιο προσανατολισμό (θέση φωτογραφικής πλάκας), όπως κατά την λήψη του.

Επειδή η Ολογραφία είναι μία κατηγορία Συμβολομετρίας, γι' αυτό εφαρμόζονται τεχνικές, σχετιζόμενες με το φαινόμενο Συμβολής και, επομένως, με διαφορές φάσεως συμβαλλόντων φωτεινών κυμάτων.

Πάνω στο ολόγραμμα είναι αποτυπωμένες πληροφορίες, υπό μορφή κροσσών Συμβολής, οι οποίες σχετίζονται:

α) με την ένταση του φωτεινού κύματος

β) το μήκος κύματος του

γ) την φάση του

δ) με την μορφή, στις τρεις διαστάσεις του υπό εξέταση αντικειμένου.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα με την Ολογραφία είναι το γεγονός ότι κάθε κομμάτι από το ληφθέν ολόγραμμα, όσο μικρό και να είναι, περιέχει όλες τις πληροφορίες για το σύνολο του αρχικού αντικειμένου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε την δυνατότητα ανακατασκευής ολόκληρου του ολογράμματος, έστω και από ένα μικρό του κομμάτι. Σε αντίθεση, στην φωτογραφία αν καταστραφεί ένα μέρος του «αρνητικού» φιλμ, τότε η απώλεια θεωρείται ολική.



1.3 Ταξινόμηση Ολογραφικών Μεθόδων και Τύποι Ολογραμμάτων

Οι πειραματικές διατάξεις Ολογραφίας, όπως και τα αντίστοιχα Ολογράμματα μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς και διάφορους τρόπους.

Στη συνέχεια θα αναφέρουμε μερικές τέτοιες ταξινομήσεις. Διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες Ολογραφίας, βασιζόμενες στο χωρισμό ή όχι της αρχικής προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης:

α) Ολογραφία Απλής Δέσμης (Single-Beam Holography), όπου η δέσμη αναφοράς και η δέσμη αντικειμένου αποτελούν μία δέσμη, προτού προσπέσουν πάνω στο υπό εξέταση αντικείμενο.

β) Ολογραφία Διαχωρισμένης Δέσμης (Split-Beam Holography), όπου μόνο η δέσμη αντικειμένου προσπίπτει στο υπό εξέταση αντικείμενο, οπότε απαιτείται φωτεινή πηγή με πολύ μεγάλο βαθμό συμφωνίας, όπως π.χ. η πηγή Laser.

Μία άλλη ταξινόμηση αναφέρεται στη θέση του αντικειμένου ως προς τη δέσμη αναφοράς και τη δέσμη αντικειμένου:

α) Ολογραφία Στον Άξονα (On-Axis Holography), όπου το αντικείμενο είναι διαφανές και «περικλείεται» από την αρχική προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη. Αυτή ήταν και η πρωτοποριακή διάταξη του Gabor το 1947, χωρίς βεβαίως πηγή Laser και με πολλά μειονεκτήματα.

β) Ολογραφία Εκτός Άξονα (Off-Axis Holography) όπου το αντικείμενο βρίσκεται εκτός της αρχικής δέσμης και φωτίζεται από ένα μόνο μέρος της. Αυτή ήταν και η προηγμένη πειραματική διάταξη των Leith και J. Upatnieks το 1962



Μία γενικότερη ταξινόμηση της Ολογραφίας, βασιζόμενη στη φασματική περιοχή του Η.Μ. κύματος ή του Ακουστικού κύματος, είναι η ακόλουθη:

- i. - Οπτική Ολογραφία (Optical)
- ii. Ολογραφία Ακτίνων-Χ (X-Rays)
- iii. Ακουστική Ολογραφία (Acoustical-Ultrasound)
- iv. Ολογραφία Ηλεκτρονίων (Electron-Beam)
- v. Υπολογιστική Ολογραφία με Μετασχηματισμούς Fourier (Fourier-Transforms)

Μία πολύ μεγάλη ταξινόμηση αναφέρεται στο είδος των λαμβανομένων Ολογραμμάτων, όπως είναι τα ολογράμματα:

- α) Ανακλάσεως και Διελεύσεως (Reflection, Transmission)
- β) Πλάτους και Φάσεως (Amplitude, Phase)
- γ) Απλής, Διπλής και Πολλαπλής Εκτυπώσεως ή Αποτυπώσεως (Multi-Exposure)
- δ) Λεπτά και Παχέα (Thin, Thick ή Volume)
- ε) Επίπεδα και Κυλινδρικά (Plane, Cylindrical)
- στ) Οπτικών Στοιχείων (Optical Elements)
- ζ) Λευκού Φωτός και Ουρανίου Τόξου (Rainbow)
- η) Μετασχηματισμών Fourier (Fourier-Transforms) κ.λπ.



2 ΣΥΜΒΟΛΗ Η/Μ ΚΥΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με την Αρχή της Γραμμικής Υπέρθεσης ή αλλιώς Αρχή της Επαλληλίας, «Η ολική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου $\vec{E}(\vec{r}, t)$ σε δεδομένο χρόνο t και σε δεδομένη θέση \vec{r} στο κενό, είναι ίση με το ανυσματικό άθροισμα των επιμέρους εντάσεων $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots$ »

Οι εντάσεις αυτές προέρχονται από αντίστοιχες πηγές εκπομπής Η-Μ κυμάτων με ανύσματα θέσεως $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \dots$ και τα οποία συναντώνται σε ένα κοινό σημείο \vec{r} του χώρου τη χρονική στιγμή t . Τότε ισχύει:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t) + \vec{E}_3(\vec{r}, t) + \dots \quad \text{Σχέση (2.1)}$$

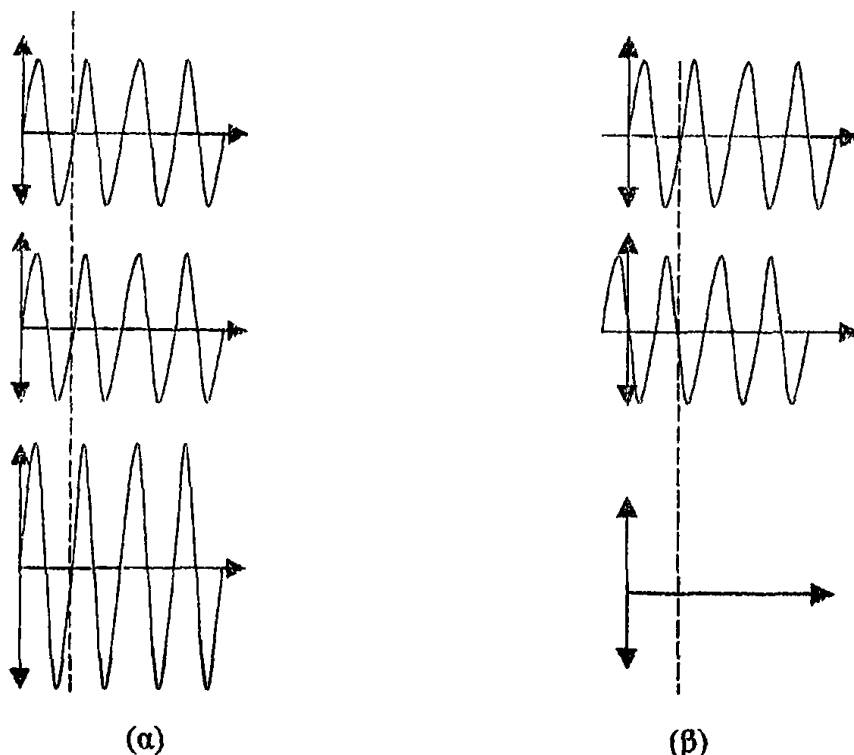
Η αρχή της επαλληλίας είναι απόρροια του γεγονότος ότι οι εξισώσεις του Maxwell στο κενό είναι γραμμικές ως προς το πεδίο διαφορικές εξισώσεις. Όταν όμως η διάδοση των κυμάτων γίνεται σε υλικά μέσα, π.χ. στον αέρα, και οι εντάσεις των ηλεκτρικών πεδίων των Η/Μ κυμάτων είναι πολύ μεγάλες, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με ισχυρές πηγές Laser, τότε η διάδοση του κύματος εμφανίζει αποκλίσεις από τη γραμμική άθροιση οι οποίες οφείλονται στα μη γραμμικά φαινόμενα που επάγει η αλληλεπίδραση υψηλής έντασης φωτός και ύλης.

2.1 Συμβολή

Το φαινόμενο της Συμβολής παρατηρείται όταν δύο ή περισσότερες δέσμες με μεγάλο βαθμό συμφωνίας, προσπίπτουν σε ένα σημείο του χώρου. Η συμβολή έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο συμβολής και κατ' επέκταση και της φωτεινής έντασης, ανάλογα με τη διαφορά φάσης των κυμάτων (φωτεινών δεσμών). Το παρατηρούμενο αποτέλεσμα είναι η δημιουργία φωτεινών και



σκοτεινών περιοχών, ανάλογα με τη διαφορά φάσης σε κάθε σημείο, οι οποίες είναι γνωστές ως κροσσοί συμβολής. Στις φωτεινές περιοχές η συμβολή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι ενισχυτική, ενώ στις σκοτεινές αποσβεστική (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Ενισχυτική (α) και αποσβεστική (β) συμβολή Η/Μ κυμάτων

2.2 Βασικές κατηγορίες συμβολής.

Συμβολή μπορεί να υπάρξει μεταξύ δύο η και περισσότερων Η/Μ κυμάτων. Στην παρούσα εργασία θα περιοριστούμε στην ανάλυση του φαινομένου της συμβολής μεταξύ δύο μόνο κυμάτων. Έτσι από εδώ και στο εξής όταν αναφερόμαστε σε συμβολή θα εννοούμε συμβολή δύο μόνο κυμάτων.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες συμβολής. Η συμβολή με διαίρεση του κυματομετώπου (wavefront division) όπως π.χ. συμβαίνει στο



συμβολόμετρο του Young. Και η συμβολή με διαίρεση του πλάτους του κύματος (amplitude division) όπως στην περίπτωση του συμβολόμετρου Michelson. Η πρώτη κατηγορία συμβολής, αν και διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην ερμηνεία του φαινομένου (πείραμα του Young), δε θα αναλυθεί. Θα περιοριστούμε στην ανάλυση της συμβολής με διαίρεση πλάτους

2.3 Μελέτη Συμβολής Δυο Η/Μ Κυμάτων

2.3.1 Προϋποθέσεις για την επίτευξη άμεσα παρατηρήσιμης συμβολής.

Η ύπαρξη του φαινομένου της συμβολής Η/Μ κυμάτων εξαρτάται από μερικούς βασικούς παράγοντες των πηγών εκπομπής αυτών των κυμάτων. Αυτοί οι παράγοντες είναι:

- α) Η συμφωνία-μονοχρωματικότητα τους
- β) Η πόλωση τους

2.3.2 Συμφωνία-μονοχρωματικότητα πηγών.

Η έννοια της «συμφωνίας» (coherence) ή της «ασυμφωνίας» (incoherence) των πηγών εκπομπής Η/Μ κυμάτων είναι πολύ σημαντική στο φαινόμενο της συμβολής. Έχει να κάνει με την σταθερότητα ή τη μεταβολή της σχετικής διαφοράς φάσης μεταξύ των κυμάτων, όπως επίσης και με τη σταθερότητα της συχνότητας των κυμάτων. Όταν δύο πηγές εκπομπής κυμάτων έχουν την ίδια συχνότητα και διατηρούν σταθερή διαφορά φάσης τότε λέμε ότι είναι σύμφωνες πηγές και επομένως υπάρχει δυνατότητα συμβολής. Αν όμως ένα από τα παραπάνω δεν ισχύει τότε οι πηγές είναι ασύμφωνες και δεν υπάρχει δυνατότητα συμβολής.

Όπως θα δούμε και παρακάτω, η ολική διαφορά φάσης δ των δύο κυμάτων είναι το άθροισμα δύο όρων:



$$\delta = (k_1 r_1 - k_2 r_2) + (\varphi_1 - \varphi_2) \equiv \Delta L + \Delta \varphi \quad \text{Σχέση (2.2)}$$

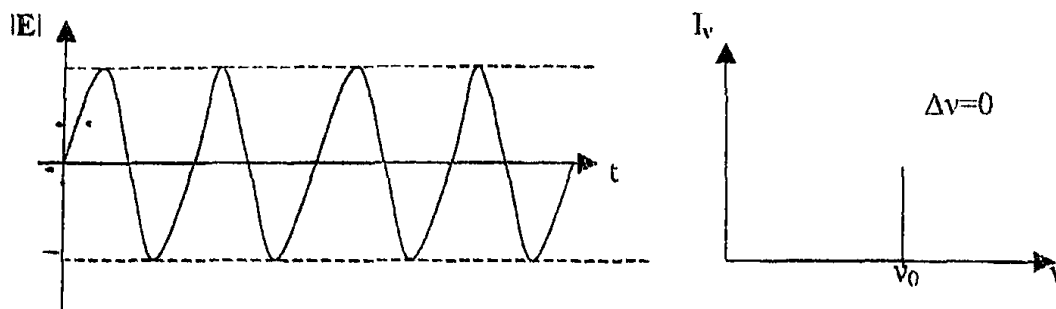
Ο πρώτος όρος οφείλεται στη διαφορά των δύο οπτικών δρόμων που ακολουθούν τα κύματα από τη θέση των σημειακών πηγών τους μέχρι και το σημείο συμβολής τους. Ο δεύτερος όρος οφείλεται στην διαφορά φάσης που μπορεί να υπάρχει αν τα κύματα δεν ξεκίνησαν να εκπέμπονται ταυτόχρονα. Αν η $\Delta\varphi$ δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο τότε οι δύο πηγές θεωρούνται σύμφωνες.

Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι σε οποιαδήποτε ασύμφωνη φωτεινή πηγή, π.χ. λυχνίες εκκένωσης αερίου, παρατηρούνται τυχαίες διακυμάνσεις της φάσης των εκπεμπόμενων κυμάτων δεδομένου ότι η πηγή αποτελείται από ένα τεράστιο αριθμό διεγερμένων ατόμων, κάθε ένα από τα οποία εκπέμπει ένα φωτόνιο. Ο χρόνος εκπομπής υπολογιζόμενος στατιστικά είναι περίπου 10^{-8} sec.

Επομένως δύο ξεχωριστές πηγές θα μπορούσαν να διατηρήσουν σταθερές τις σχετικές τους φάσεις στην καλύτερη περίπτωση για χρόνο μικρότερο από 10^{-8} sec.

Η έννοια της συμφωνίας έχει άμεση σχέση με τη μονοχρωματικότητα της πηγής εκπομπής των κυμάτων. Η μονοχρωματική πηγή είναι ιδανική περίπτωση και θεωρείται ότι το κύμα που εκπέμπει έχει μια και μόνη συχνότητα ν_0 με μηδενικό εύρος ζώνης $\Delta\nu$. Ένα τέτοιο κύμα είναι για παράδειγμα ένα τέλεια ημιτονοειδές κύμα, η ανάλυση Fourier του οποίου θα μας έδινε μόνο την ν_0 και $\Delta\nu = 0$ όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2. Τότε, όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω, η χρονική διάρκεια συμφωνίας κατά την οποία η φάση είναι σταθερή είναι άπειρη.





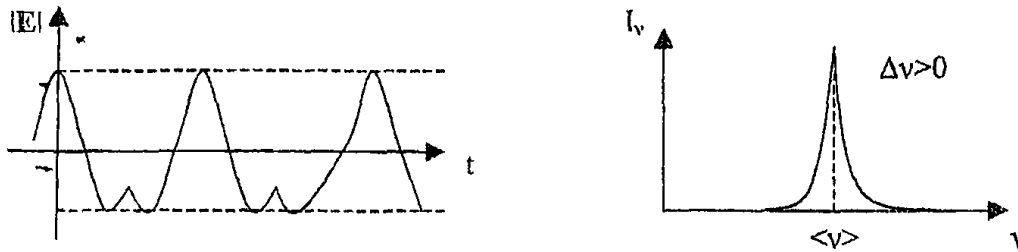
Σχήμα 2.2: Τέλεια μονοχρωματικό, ημιτονοειδές κύμα και φασματική κατανομή της συχνότητας του

Όμως μια πραγματική πηγή εκπομπής κυμάτων δεν μπορεί να εκπέμπει καθαρά ημιτονοειδή κύματα. Το γεγονός και μόνο ότι τα πραγματικά κύματα έχουν κάποια πεπερασμένη χρονική διάρκεια και δεν εκτείνονται άπειρα στον άξονα του χρόνου καθιστά αδύνατη την ύπαρξη καθαρά ημιτονοειδών κυμάτων. Έτσι η ανάλυση Fourier σε ένα πραγματικό κύμα, εκτός από την κύρια συχνότητα ν_0 θα έδινε και άλλες συχνότητες, μικρότερες και μεγαλύτερες της ν_0 . Θα έδινε δηλαδή ένα εύρος συχνοτήτων $\Delta\nu \neq 0$ (Σχήμα 2.3). Το κύμα επομένως, θα είναι λίγο πολύ πολυχρωματικό. Αντίστοιχα ο χρόνος συμφωνίας δεν θα είναι άπειρος αλλά πεπερασμένος.

Από την Κυματική προκύπτει ότι $\Delta\nu \cdot \Delta t = 1$ οπότε μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο συμφωνίας. Αν $\Delta\nu = 0$ (ημιτονοειδές κύμα) τότε πρέπει το Δt να είναι άπειρο, οπότε έχουμε πλήρη συμφωνία. Αν το $\Delta\nu$ είναι άπειρο, τότε πρέπει $\Delta t = 0$ οπότε έχουμε πλήρη ασυμφωνία.

Στην πραγματικότητα το $\Delta\nu$ έχει ενδιάμεσες τιμές, οπότε και ο χρόνος συμφωνίας Δt δεν είναι ούτε άπειρος ούτε μηδενικός (ακόμη και για το

ορατό, λευκό φως, είναι $\Delta t = 2,64 \cdot 10^{-15} \text{sec}$). Έχουμε δηλαδή μερική συμφωνία.



Σχήμα 2.3: Πραγματικό, πολυχρωματικό κύμα και η φασματική κατανομή των συχνοτήτων του, εύρους $\Delta\nu > 0$

2.4 Πόλωση κυμάτων

Ο τρόπος πόλωσης δύο αρμονικών, μονοχρωματικών και επίπεδων κυμάτων \vec{E}_1 και \vec{E}_2 έχει άμεση επίδραση στο βαθμό συμβολής, ή αλλιώς παράγοντα συμβολής I_{12} . Όπως θα δούμε παρακάτω, ο παράγων αυτός είναι ίσος με :

$$I_{12} = \left[\vec{E}_{01}(\vec{r}) \cdot \vec{E}_{02}(\vec{r}) \right] \cos \delta \quad \text{Σχέση (2.3)}$$

όπου \vec{E}_{01} και \vec{E}_{02} είναι τα πλάτη των δύο κυμάτων \vec{E}_1 και \vec{E}_2 που συμβάλλουν, ενώ δ είναι η ολική διαφορά φάσης (σχέση 3.2) στο σημείο συμβολής τους.

Η παραπάνω σχέση αναφέρεται σε δύο γραμμικά πολωμένα κύματα με τυχαίο προσανατολισμό των επιπέδων ταλάντωσης. Αν τα επίπεδα ταλάντωσης των δύο αυτών κυμάτων είναι κάθετα μεταξύ τους, τότε $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} = 0$ οπότε και $I_{12} = 0$ και επομένως υπάρχει μια σταθερή ολική φωτεινή ένταση $I = I_1 + I_2$ με πόλωση όμως η οποία μπορεί να μεταβάλλεται. Αν τα επίπεδα ταλάντωσης, αντίθετα, είναι παράλληλα

μεταξύ τους, τότε $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \neq 0$ άρα και $I_{12} \neq 0$ και επομένως θα παρατηρείται άμεσα φαινόμενο συμβολής. Βέβαια, ακόμα και όταν οι πολώσεις των δύο κυμάτων είναι κάθετες μεταξύ τους, μπορούμε να μιλάμε για σύμβολή. Μόνο που το αποτέλεσμα της συμβολής αυτής είναι μια εικόνα κατανομής πόλωσης και μια εικόνα κατανομής έντασης. Αυτό που μεταβάλλεται δηλαδή είναι η πόλωση και όχι η ένταση η οποία παραμένει σταθερή, γι' αυτό φυσικά και δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε το φαινόμενο.

Εάν τα κύματα δεν είναι γραμμικά πολωμένα αλλά κυκλικά ή ελλειπτικά ή ακόμα και μη πολωμένα, θα ισχύουν παρόμοιες σχέσεις για την ένταση I της ακτινοβολίας και για τον παράγοντα συμβολής I_{12} . Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος ότι οποιοδήποτε επίπεδο κύμα ανεξαρτήτως της πολωτικής του κατάστασης πάντοτε μπορεί να αναλυθεί σε δύο κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες E_{\perp} και E_{\parallel} έτσι ώστε η ολική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος να είναι $E = E_{\perp} + E_{\parallel}$ επομένως μπορούμε να ορίσουμε αντίστοιχα τους παράγοντες συμβολής $I_{21\perp}$ και $I_{12\parallel}$ για τις κάθετες και τις παράλληλες συνιστώσες της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

2.5 Ένταση ακτινοβολίας I ενός Η/Μ κύματος.

Πριν προχωρήσουμε στη μελέτη της συμβολής δύο Η/Μ κυμάτων είναι σκόπιμο να αναφερθούμε στην έννοια της έντασης ακτινοβολίας του κύματος I , και στη σχέση που αυτή έχει με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E . Ως ένταση ακτινοβολίας ορίζουμε το ποσό ενέργειας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια, ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας. Ταυτίζεται με τη μέση τιμή του μέτρου του διανύσματος



Poynting $\langle \vec{S} \rangle$. Θυμίζουμε ότι το διάνυσμα Poynting εκφράζει τη ροή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας κατά τη διεύθυνση k διάδοσης του κύματος, και ισούται με $\vec{S} \equiv (\vec{E} \otimes \vec{H})$ στο σύστημα S.I. Ξεκινώντας από τον ορισμό του S και κάνοντας αρκετές πράξεις καταλήγουμε στο ότι:

$$\langle \vec{S} \rangle \equiv I = \frac{1}{2} c \epsilon E_0^2 \quad \text{Σχέση (2.4)}$$

Η ένταση ακτινοβολίας έχει μονάδα μέτρησης στο σύστημα S.I. το Watt/m^2 και είναι το φυσικό μέγεθος που μετράνε οι ανιχνευτές, φωτοδιόδοι, φωτόμετρα, κτλ.

Όπως είναι γνωστό, ένα επίπεδο και μονοχρωματικό Η/Μ κύμα περιγράφεται από την μιγαδική κυματοσυνάρτηση $\vec{E}(\vec{r}, t)$:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t + \varphi)} \quad \text{Σχέση (2.5)}$$

και το ηλεκτρικό πεδίο του Η/Μ κύματος δίνεται από το πραγματικό μέρος της $\vec{E}(\vec{r}, t)$.

$$\text{Εάν θέσουμε } \vec{k}\vec{r} + \varphi = g(\vec{r}) \quad \text{Σχέση (2.6)}$$

και χωρίσουμε τις χωρικές από τις χρονικές συντεταγμένες, τότε η σχέση (2.5) γίνεται

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{ig(\vec{r})} e^{-i\omega t} \quad \text{Σχέση (2.7)}$$

Όπου η ποσότητα $\vec{E}_0 e^{ig(\vec{r})}$ είναι το μιγαδικό άνυσμα $M(\vec{r})$. Έτσι μπορούμε να γράψουμε τελικά ότι:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{M}(\vec{r}) e^{-i\omega t} \quad \text{Σχέση (2.8)}$$



Με τον αστερίσκο * ως δείκτη να δηλώνει συζυγή μιγαδική ποσότητα.

Έχοντας υπ' όψη τη σχέση (2.4), ότι δηλαδή, η ένταση ακτινοβολίας είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και επειδή

$$\vec{M} \cdot \vec{M}^* = \vec{E}_0(\vec{r}) e^{ig(\vec{r})} \vec{E}_0(\vec{r}) e^{-ig(\vec{r})} = \vec{E}_0(\vec{r}) \cdot \vec{E}_0(\vec{r}) = E_0^2$$

προκύπτει ότι:

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon \vec{M} \cdot \vec{M}^* \quad \text{Σχέση (2.9)}$$

Η σχέση αυτή θα φανεί πολύ χρήσιμη στον προσδιορισμό της ολικής έντασης ακτινοβολίας από τη συμβολή δυο κυμάτων.

2.6 Προσδιορισμός της έντασης ακτινοβολίας από συμβολή

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, θα προσδιορίσουμε την ολική ένταση ακτινοβολίας I , σε ένα σημείο $\Sigma(\vec{r}, t)$ του χώρου, κατά τη συμβολή δύο κυμάτων. Θεωρούμε δυο γραμμικώς πολωμένα, μονοχρωματικά, αρμονικά και επίπεδα Η/Μ κύματα E_1 και E_2 που έχουν την ίδια συχνότητα ν ($\omega = 2\pi\nu$). Σύμφωνα με τη σχέση (2.5) είναι:

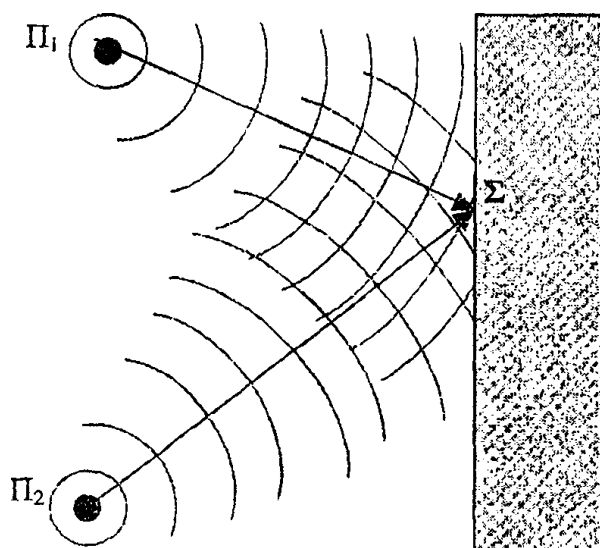
$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{01} e^{i(\vec{k}_1 \vec{r} - \omega t + \varphi_1)} \quad \text{Σχέση (2.10)}$$

$$\text{και } \vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{02} e^{i(\vec{k}_2 \vec{r} - \omega t + \varphi_2)} \quad \text{Σχέση (2.11)}$$

Τα κύματα αυτά θεωρούνται ότι προέρχονται από δύο σημειακές και απομακρυσμένες πηγές, διαδίδονται στο ίδιο ισότροπο και ομογενές μέσο, και συμβάλλουν στο σημείο Σ τη χρονική στιγμή t , όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 2.4. Στις παραπάνω σχέσεις (2.10 και 2.11) έχουμε θεωρήσει τις δυο παραμέτρους φ_1 και φ_2 για το ενδεχόμενο υπάρξεως



κάποιας διαφοράς φάσης $\Delta\varphi = |\varphi_2 - \varphi_1|$ των πηγών εκπομπής των αντίστοιχων κυμάτων. Οι φάσεις αυτές οφείλονται στον τρόπο εκπομπής των Η/Μ κυμάτων από τις δύο πηγές. Αν η διαφορά $\Delta\varphi$ παραμένει σταθερή στο χρόνο, τότε, όπως είδαμε και προηγουμένως, οι πηγές είναι σύμφωνες.



Σχήμα 2.4: Συμβολή δυο κυμάτων E_1 και E_2 που εκπέμπονται από τις πηγές Π_1 και Π_2 στο σημείο του χώρου Σ

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό του μιγαδικού ανύσματος $M(r)$ και τη σχέση αντικατάστασης $g(r) = kr + \varphi$ και για τα δύο κύματα θα έχουμε:

$$\vec{M}_1(\vec{r}) = \vec{E}_{01} e^{ig_1(\vec{r})} \quad \text{Σχέση (2.12)}$$

$$\vec{M}_2(r) = \vec{E}_{02} e^{ig_2(r)} \quad \text{Σχέση (2.13)}$$

Γενικά οι φάσεις g_1 και g_2 , που είναι πραγματικοί αριθμοί, είναι διαφορετικές μεταξύ τους, δεδομένου ότι οι δύο πηγές παρουσιάζουν εν γένει κάποια αρχική διαφορά φάσης $\Delta\varphi$ που είναι σταθερή, αλλά και



γιατί τα δύο κύματα κινούνται προς το σημείο Σ ακολουθώντας διαφορετικούς οπτικούς δρόμους των οποίων η διαφορά είναι ΔL . Η διαφορά Δg των δύο φάσεων g_1 και g_2 μας δίνει τη σχέση (2.2) δηλαδή είναι $\Delta g \equiv \delta$.

Με βάση τις σχέσεις 2.10 ως και 2.11 μπορούμε να γράψουμε για τις εντάσεις των ηλεκτρικών πεδίων των δύο κυμάτων ότι:

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{M}_1(\vec{r}) e^{-i\omega t} \quad \text{Σχέση (2.14)}$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{M}_2(\vec{r}) e^{-i\omega t} \quad \text{Σχέση (2.15)}$$

Σύμφωνα με την αρχή της γραμμικής υπέρθεσης (σχέση 2.2), η ολική ένταση $\vec{E}(\vec{r}, t)$ θα είναι:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t) = [\vec{M}_1(\vec{r}) + \vec{M}_2(\vec{r})] e^{-i\omega t} = \vec{M}(\vec{r}) e^{-i\omega t} \quad \text{Σχέση (2.16)}$$

Η τελευταία σχέση, και με την βοήθεια της (2.9), μας οδηγεί στην τελική σχέση που συνδέει την ολική ένταση ακτινοβολίας με τις επιμέρους εντάσεις των δυο πηγών.

$$I = I_1 + I_{12} + I_2 \quad \text{Σχέση (2.17 a)}$$

$$\text{όπου } I_i = \frac{1}{2} c \varepsilon |M_i|^2 = \frac{1}{2} c \varepsilon E_{0i}^2, \text{ με } i = 1 \text{ ή } 2, \quad \text{Σχέση (2.17b)}$$

είναι οι εντάσεις της κάθε μιας πηγής ξεχωριστά ενώ

$$I_{12} = \frac{1}{2} c \varepsilon \left(\overline{M_1 M_2^*} + \overline{M_1^* M_2} \right) \quad \text{Σχέση (2.18)}$$

είναι ο παράγων συμβολής, ο παράγοντας δηλαδή που καθορίζει εάν θα έχουμε ενισχυτική ή αποσβεστική συμβολή, μέγιστη ή ελάχιστη ένταση αντίστοιχα.



2.7 Προσδιορισμός και διερεύνηση του παράγοντα συμβολής

Λόγω των σχέσεων (2.12), (2.13) η σχέση (2.18) γίνεται

$$I_{12} = \frac{1}{2} c \varepsilon \left(\vec{E}_{01} e^{i g_1(\vec{r})} \cdot \vec{E}_{02} e^{-i g_2(\vec{r})} + \vec{E}_{01} e^{-i g_1(\vec{r})} \cdot \vec{E}_{02} e^{i g_2(\vec{r})} \right) =$$

$$= \frac{1}{2} c \varepsilon \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \left[e^{i(g_1 - g_2)} + e^{-i(g_1 - g_2)} \right] = c \varepsilon \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(g_1 - g_2)$$

και επειδή $g_1(\vec{r}) - g_2(\vec{r}) = \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \varphi_1 - \vec{k}_2 \vec{r}_2 - \varphi_2 = \delta$

$$I_{12} = c \varepsilon \left[\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \right] \cos \delta \quad \text{Σχέση (2.3)}$$

Είναι προφανές από την Σχέση (2.3) ότι όταν τα ανύσματα των εντάσεων των δυο κυμάτων είναι κάθετα μεταξύ τους, τότε το εσωτερικό τους γινόμενο είναι μηδέν, οπότε μηδενικός είναι και ο παράγοντας συμβολής. Από την (2.17) θα έχουμε $I = I_1 + I_2$ που σημαίνει ότι τα δυο κύματα δεν αλληλεπιδρούν στο σημείο Σ , δεν υπάρχει δηλαδή έννοια συμβολής. Στο Σ υπάρχει φωτεινή ένταση I σταθερή,

Όταν όμως τα ανύσματα των εντάσεων δεν είναι κάθετα μεταξύ τους τότε $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} = E_{01} \cdot E_{02} \cos \theta \neq 0$. Επομένως η τιμή του I_{12} για συγκεκριμένη θ θα καθορίζεται από την δ . Η γωνία θ είναι η γωνία που σχηματίζουν τα ανύσματα των εντάσεων. Πιο συγκεκριμένα για $\theta = 0$, δηλαδή για παράλληλα, γραμμικά πολωμένα κύματα, με βάση την (2.17b) θα έχουμε:

$$I_{12} = c \varepsilon E_{01} \cdot E_{02} \cos \delta = 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad \text{Σχέση (2.19)}$$

Και φυσικά η ολική ένταση ακτινοβολίας στο Σ θα είναι:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad \text{Σχέση (2.20)}$$



πράγμα που σημαίνει ότι διαμορφώνεται ανάλογα με την διαφορά φάσης δ στο σημείο συμβολής Σ .

Όταν η διαφορά φάσης είναι $\delta = 2\pi m$ όπου $m = 0, 1, 2, 3 \dots$ δηλαδή ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π , τότε $\cos\delta = 1$ και η ένταση θα έχει την μέγιστη τιμή της

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{Σχέση (2.21)}$$

Στην περίπτωση αυτή έχουμε **ολική ενισχυτική συμβολή**

Αν αντίθετα η διαφορά φάσης είναι $\delta = 2\pi m + \pi = 2\pi(m+1/2)$ όπου και πάλι $m = 0, 1, 2, 3 \dots$ δηλαδή δ περιττό πολλαπλάσιο του π , τότε $\cos\delta = -1$ και η ένταση θα έχει την ελάχιστη τιμή της

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{Σχέση (2.22)}$$

Στην περίπτωση αυτή έχουμε **ολική αποσβεστική συμβολή**

Γενικά, όταν η δ δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π ή περιττό ακέραιο πολλαπλάσιο του π , το συνημίτονο του δ είναι είτε $0 < \cos\delta < 1$ οπότε έχουμε ενισχυτική συμβολή και $I_1 + I_2 < I < I_{\max}$. Είτε $-1 < \cos\delta < 0$ οπότε έχουμε αποσβεστική συμβολή και $I_1 + I_2 > I > I_{\min}$

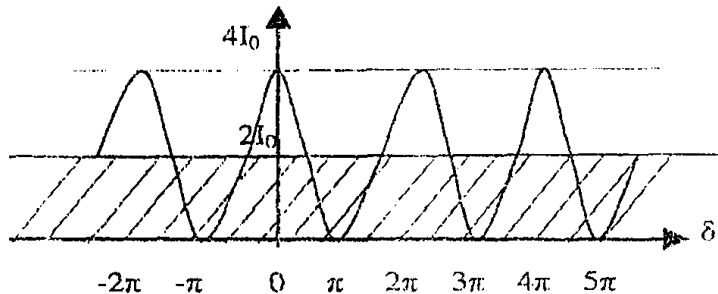
Τέλος στην ειδική περίπτωση όπου τα πλάτη των εντάσεων των ηλεκτρικών πεδίων των κυμάτων που συμβάλουν στο Σ είναι ίσα, οπότε φυσικά θα είναι και $I_1 + I_2 = I = I_0$, η ολική ένταση I της ακτινοβολίας, σύμφωνα με τη σχέση (2.20) και την τριγωνομετρική ταυτότητα

$\cos^2 \delta = \frac{1}{2}[1 + \cos 2\delta]$ θα είναι:

$$I = 2I_0 [1 + \cos\delta] = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad \text{Σχέση (2.23)}$$



Όπως προκύπτει και από τις εξισώσεις (2.21) και (2.22) στην περίπτωση αυτή όπου οι επιμέρους εντάσεις ακτινοβολίας είναι ίσες, η ελάχιστη τιμή της I για την οποία έχουμε ολική αποσβεστική συμβολή είναι $I_{\min}=0$ ενώ η μέγιστη τιμή της είναι $I_{\max}= 4I_0$ όπως δείχνει και το Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.5: Η ένταση ακτινοβολίας I συναρτήσει της διαφοράς φάσης δ για $I_1=I_2$

- Ίσως εδώ γεννηθεί η απορία πως είναι δυνατό από δύο πηγές με συνολική ένταση ακτινοβολίας $2I_0$ να έχουμε συνολική ένταση, κατά τη συμβολή, $4I_0$. Σίγουρα δεν πρόκειται περί παραβίασης της αρχής διατήρησης της ενέργειας, αλλά για διαφορετική κατανομή της στο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, στα σημεία του χώρου στα οποία έχουμε ενισχυτική συμβολή οπότε και $I > 2I_0$ συσσωρεύεται ενέργεια από τα σημεία στα οποία έχουμε αποσβεστική συμβολή και για τα οποία ισχύει $I < 2I_0$. Φυσικά η ολική ενέργεια (άρα και η ένταση, $I =$ ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας) στην περιοχή της συμβολής είναι σταθερή και ίση με το άθροισμα των ενεργειών (εντάσεων) των δύο πηγών. Τα παραπάνω γίνονται ευκολότερα κατανοητά με τη βοήθεια του σχήματος 2.5 όπου φαίνεται η τιμή της I συναρτήσει της διαφοράς φάσης δ (καμπύλη) να παρουσιάζει μέγιστα και ελάχιστα, αλλά και το άθροισμα $I_1 +$



$I_2 = 2I_0$ των επιμέρους εντάσεων (ευθεία), που ταυτόχρονα είναι και η μέση τιμή της I να παραμένει σταθερό.

$$\langle I \rangle = 4I_0 \left\langle \cos^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \right\rangle = 4I_0 \left(\frac{1}{2} \right) = 2I_0$$

Το γραμμοσκιασμένο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη, για συγκεκριμένο εύρος φάσεων, ισούται με το αντίστοιχο εμβαδόν κάτω από την ευθεία $2I_0$, και παριστά τη συνολική ένταση ακτινοβολίας στην περιοχή της συμβολής.

2.8 Ορατότητα ή ευκρίνεια των κροσσών.

Στις προηγούμενες παραγράφους είδαμε πώς η ένταση του φωτός εξαρτάται από τη διαφορά των οπτικών δρόμων των κυμάτων που συμβάλλουν. Η εξάρτηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κροσσών συμβολής, δηλαδή φωτεινών και σκοτεινών περιοχών ανάλογα με τη διαφορά φάσης σε κάθε σημείο του χώρου (σχήμα 2.5). Σ' αυτή την παράγραφο θα μελετήσουμε την ποιότητα των κροσσών και θα δούμε πως αυτή συνδέεται με το βαθμό συμφωνίας των πηγών.

Ο Michelson, κατά την πορεία των πειραμάτων του με το συμβολόμετρο, εισήγαγε ένα μέτρο διαχωρισμού των δημιουργούμενων κροσσών στην οθόνη παρατηρήσεως, και το ονόμασε ορατότητα V (Visibility) των κροσσών. Στην Ελληνική γλώσσα όμως, ο όρος ευκρίνεια αποδίδει καλύτερα το νόημα. Η παράμετρος V , εξ ορισμού δίνεται από την σχέση

$$V \equiv \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad \text{Σχέση (2.24)}$$



Όπου I_{\max} και I_{\min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη ένταση αντίστοιχα. Προφανώς, όταν I_{\min} είναι μηδέν, (άρα $I_1 = I_2$) το $V = 1$. Ενώ όταν είναι $I_{\max} = I_{\min}$ οπότε και δε βλέπουμε κροσσούς, τότε η V μηδενίζεται.

Η ευκρίνεια V μπορεί να ορισθεί και ως ένα μέτρο της συμφωνίας των κυμάτων, τα οποία συμβάλλουν σε κάποιο σημείο Σ του χώρου με άνυσμα θέσης r . Η σχέση (2.20) μπορεί να γραφεί και με την παρακάτω μορφή :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\tau)\} \quad \text{Σχέση (2.25)}$$

Το γ_{12} ονομάζεται μιγαδικός βαθμός χρονικής συμφωνίας και είναι:

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{I_1} \cdot \sqrt{I_2}} \quad \text{Σχέση (2.26)}$$

όπου η συνάρτηση χρονικής συσχέτισης $\Gamma_{12}(\tau)$ δυο σύμφωνων δεσμών όπως στην περίπτωση μας, με μιγαδικά πλάτη M_1 και M_2 σε δεδομένο r

$$\text{είναι } \Gamma_{12}(\tau) = \left\langle M_1^*(\vec{r}, t) \cdot M_2(\vec{r}, t + \tau) \right\rangle$$

Όταν $\Gamma_{12}(\tau) = 0$, οι δυο δέσμες είναι ασυσχέτιστες για διαφορά τ στο χρόνο άφιξης των στο \vec{r} ενώ αν $\Gamma_{12}(\tau) \neq 0$ έχουμε συσχέτιση σε κάποιο βαθμό. Το μέτρο του $\gamma_{12}(\tau)$ είναι μικρότερο ή ίσο της μονάδας. Η ισότητα ισχύει στην περίπτωση που έχουμε τέλεια μονοχρωματικά κύματα.

Για κάποιο σχηματισμό κροσσών, όπου η ολική ένταση I μεταβάλλεται μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής, οι σχέσεις (2.21) και (2.22), που δίνουν αυτές τις τιμές, θα γίνουν, με βάση τη (2.25)

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}| \quad \text{Σχέση (2.27)}$$

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}| \quad \text{Σχέση (2.28)}$$

Έτσι η ευκρίνεια γίνεται τώρα:



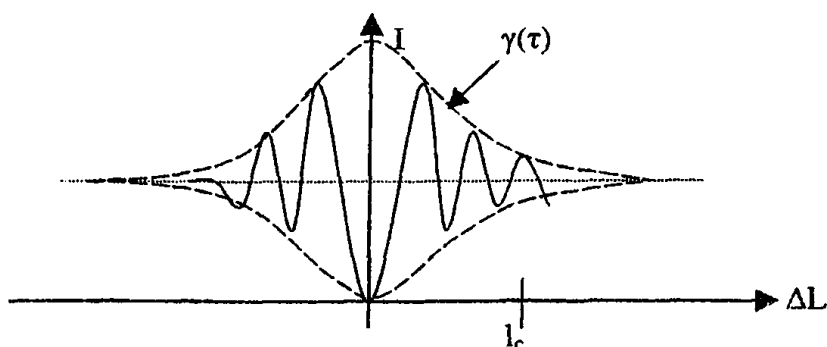
$$V \equiv \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 \cdot I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma_{12}| \quad \text{Σχέση (2.29)}$$

Αν $|\gamma_{12}|=1$, τότε υπάρχει πλήρης συμφωνία. Αν $|\gamma_{12}|=0$, τότε έχουμε πλήρη ασυμφωνία και βέβαια δεν έχουμε συμβολή. Φυσικά για τα πραγματικά κύματα είναι $0 < |\gamma_{12}| < 1$, δηλαδή έχουμε μερική συμφωνία. Στην ειδική περίπτωση, όπου $I_1 = I_2$ η σαφήνεια V θα ταυτίζεται με τον βαθμό συμφωνίας $|\gamma_{12}|$.

Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο χρόνος συμφωνίας τ , και το φασματικό εύρος συχνοτήτων $\Delta\nu$, συνδέονται με τη σχέση $\Delta\nu=1/\tau$, η απόδειξη της όμως ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της εργασίας. Η σχέση αυτή είναι ανάλογη της αρχής της αβεβαιότητας του Heisenberg.

Είναι προφανές ότι μπορούμε να ορίσουμε και το μήκος συμφωνίας ως $l_c = c\tau$, όπου c η ταχύτητα του φωτός. Αν η διαφορά των οπτικών δρόμων των δύο δεσμών είναι μικρότερη από το μήκος συμφωνίας l_c τότε οι δέσμες είναι σύμφωνες και υπάρχει δυνατότητα συμβολής. Αν όμως η διαφορά των οπτικών δρόμων των δύο δεσμών είναι μεγαλύτερη από το μήκος συμφωνίας l_c τότε οι δέσμες παύουν να είναι σύμφωνες, άρα δεν είναι δυνατή η παρατήρηση φαινομένων συμβολής. Το σχήμα 2.6 δείχνει την ελάττωση της σαφήνειας με την αύξηση της διαφοράς των οπτικών δρόμων. Είναι φανερό ότι για $\Delta L > l_c$ ο βαθμός συμφωνίας γ τείνει στο μηδέν και οι κροσσοί συμβολής σταδιακά χάνονται από την οθόνη.





Σχήμα 2.6: Εξάρτηση του μιγαδικού βαθμού συμφωνίας $\gamma(\tau)$ από τη διαφορά των οπτικών δρόμων ΔL

Όπως είδαμε η ορατότητα των κροσσών σχετίζεται με τον λόγο της έντασης της ακτίνας αναφοράς προς αυτή του αντικειμένου. Αν και την μέγιστη ορατότητα την επιτυγχάνουμε όταν αυτός ο λόγος είναι μονάδα, πολλοί είναι οι λόγοι που μας υποδεικνύουν ότι αυτό δεν είναι η καλύτερη λύση. Τις περισσότερες φορές η ένταση της ακτίνας αντικειμένου δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο το εύρος της. Για να αποφύγουμε την υπερέκθεση του φιλμ, ο λόγος των εντάσεων θα πρέπει να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψιν την μέση ένταση της ακτίνας αντικειμένου. Έτσι σε μη γραμμικά μέσα όπως το φιλμ των πειραμάτων μας χρειάζεται να έχουμε λόγους 4:1 και 6:1

3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1 Ολόγραμμα Τρισδιάστατου Αντικειμένου

Η γενικότερη περίπτωση ολογράμματος αναφέρεται σε ένα τυχαίο αντικείμενο A τριών διαστάσεων, το οποίο μπορεί να αντιπροσωπευθεί από μία σειρά ενός πολύ μεγάλου αριθμού σημειακών αντικειμένων, έτσι ώστε, κατά τον φωτισμό του, κάθε σημείο του A να θεωρείται ως μία ξεχωριστή σημειακή πηγή. Επομένως, η θεωρητική ανάλυση ολογράμματος για τρισδιάστατο αντικείμενο ανάγεται στην επί μέρους ανάλυση ολογράμματος για ένα σημειακό αντικείμενο ΣA .

3.2 Παραγωγή Ολογράμματος

Επειδή το στερεό αντικείμενο, του οποίου επιζητούμε το ολόγραμμα, είναι συνήθως αδιαφανές, γι' αυτό παρεμβάλλουμε στην αρχική δέσμη του Laser (1), εκτός από το πρίσμα Π , και ένα επίπεδο κάτοπτρο $EΚ$, υπό κάποια κλίση ως προς τη αρχική δέσμη, όπως δείχνει το σχήμα 3.1.

Το κύμα αναφοράς (2), προσπίπτει υπό σταθερή γωνία θ πάνω στην φωτογραφική πλάκα $\Phi\Pi$. Το κύμα E_2 έχει εξίσωση της μορφής

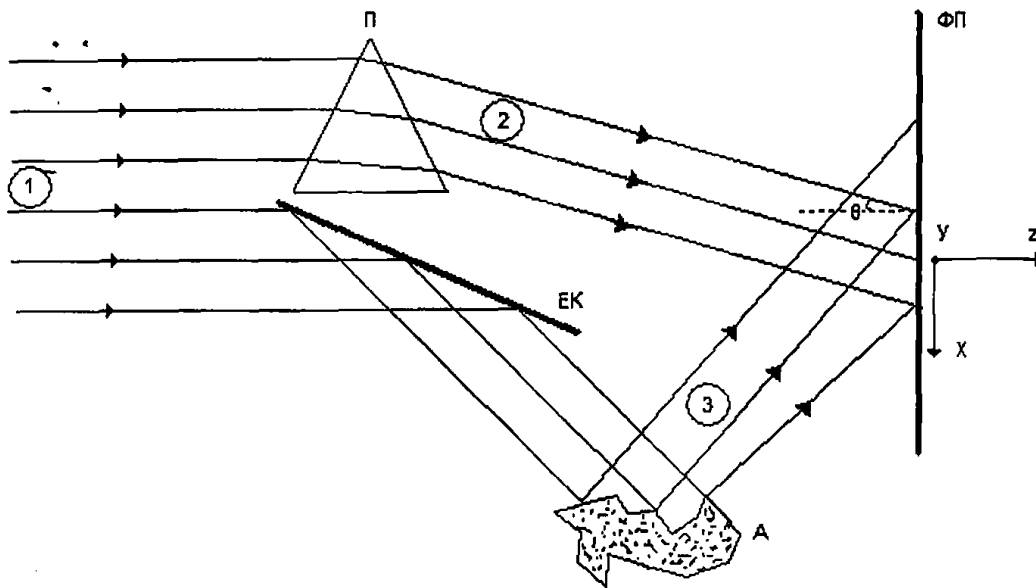
$$E_2(r, t) = E_{02} e^{i(kx \sin \theta + kz \cos \theta - \omega t)} \approx E_{02} e^{i(kz - \omega t)} e^{-ikx\theta} \quad (3.1)$$

όπου το πλάτος E_{02} είναι σταθερό και θ μικρή γωνία.

Το κύμα αντικειμένου (3) μετά την σκέδαση του πάνω στο τρισδιάστατο αντικείμενο A προσπίπτει και αυτό στην $\Phi\Pi$. Σε κάποια θέση $P(x, y, z=0)$ πάνω στην $\Phi\Pi$, το κύμα E_4 έχει εξίσωση της μορφής

$$E_3(r, t) = E_{03}(x, y) e^{-i\varphi(x, y)} e^{-i\omega t} \quad (3.2)$$





Σχέση 3.1: Ολογραφική Διάταξη Με Πρίσμα Π, Επίπεδο Κάτοπτρο ΕΚ και Στερεό Αδιαφάνες Αντικείμενο

όπου ο όρος $E_{04}(x,y)$ περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες για το πλάτος του κύματος (3), ενώ ο όρος $\varphi(x,y)$ εμπεριέχει όλες τις πληροφορίες για τη φάση του, ανάλογα με τη θέση (x,y) στο επίπεδο της ΦΠ, αντικατοπτρίζοντας την φωτιζόμενη επιφάνεια του τρισδιάστατου αντικειμένου Α.

Το συνιστάμενο κύμα $E_{\Phi\Pi}$ στη θέση της ΦΠ, ως αποτέλεσμα της συμβολής των κυμάτων E_2 και E_3 , θα είναι:

$$\begin{aligned}
 E_{\Phi\Pi}(r,t) &= E_2(r,t) + E_3(r,t) = \\
 &= \left[E_{02} e^{-ikx\theta} + E_{03}(x,y) e^{-i\varphi(x,y)} \right] e^{-i\omega t}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Η αντίστοιχη ολική ένταση ακτινοβολίας $I_{\Phi\Pi}(x,y)$ θα είναι:

$$I_{\Phi\Pi} \propto |E_{\Phi\Pi}|^2 = E_{\Phi\Pi}^* E_{\Phi\Pi} \text{ ή}$$

$$I_{\Phi\Pi} = [E_{\omega_2}^2 + E_{\omega_3}^2(x,y)] + [E_{\omega_2} E_{\omega_3}(x,y) e^{-i(k\theta - \phi(x,y))}] + [E_{\omega_2} E_{\omega_3}(x,y) e^{+i(k\theta - \phi(x,y))}] \quad (3.4)$$

όπου έχουν ενσωματωθεί οι κατανομές πλάτους και φάσεως του Α.

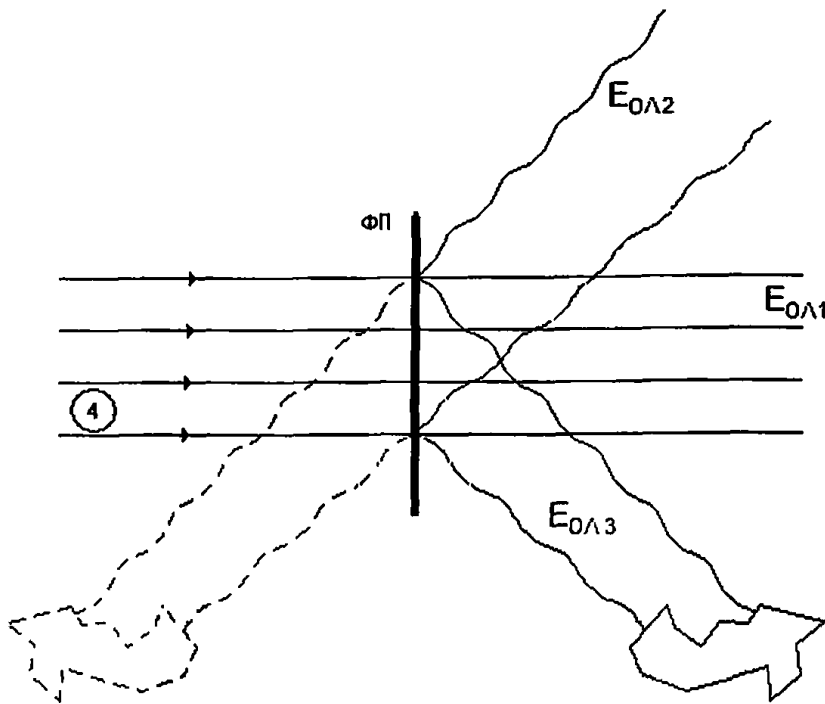
Παρατηρούμε ότι ενώ οι δυο πρώτοι όροι της σχέσης (3.4) αφορούν την ένταση των δυο κυμάτων, ενώ ο τρίτος και ο τέταρτος όρος εξαρτιέται και από τη διαφορά φάσης αυτών. Γίνεται έτσι φανερός ο λόγος της χρησιμοποίησης του κύματος αναφοράς για την καταγραφή και της φάσης του κύματος αντικειμένου.

Το φωτογραφικό φιλμ, μετά την κατάλληλη «εμφάνιση» του, δεν παρουσιάζει, εκ πρώτης όψεως, καμία ομοιότητα με τη μορφή του αρχικού αντικειμένου Α, ενώ ο πολυσύνθετος σχηματισμός κροσσών συμβολής στο επίπεδο (x,y) του ολογράμματος μοιάζει με μικρές κυματοειδείς ανακατεμένες γραμμές, με μια ανώμαλη κατανομή αμαυρώσεων. Όμως, η ανακατασκευή του, μπορεί να δώσει την πραγματική μορφή του Α.

3.3 Αναπαραγωγή Αντικειμένου

Για την αναπαραγωγή του αντικειμένου Α εκ του ολογράμματος ΟΛ φωτίζουμε κάθετα το ολόγραμμα με επίπεδο κύμα πλάτους E_4 . όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.2.





Σχήμα 3.2: Ανακατασκευή Ολογράμματος Από Επίπεδο

- Το αναδυόμενο κύμα $E_{0Λ}(x,y)$ από το ολόγραμμα ΟΛ εξαρτάται από την διαπερατότητα του φιλμ, που είναι ανάλογη του $I_{ΦΠ}(x,y)$, και θα είναι στο επίπεδο του φιλμ ($z=0$):

$$E_{0Λ}(r,t) \propto I_{ΦΠ}(x,y) E_4(x,y,t) = I_{ΦΠ}(x,y) E_{04}(x,y) e^{-i\omega t} = E_{0Λ}(x,y) e^{-i\omega t}$$

$$\begin{aligned} E_{0Λ}(x,y) &\propto \left\{ [E_{02}^2 + E_{03}^2(x,y)] + E_{02}E_{03}(x,y) \left[e^{-i(kx\theta - \phi(x,y))} + e^{+i(kx\theta - \phi(x,y))} \right] \right\} \times \{E_{04}\} = \\ &= [E_{02}^2 + E_{03}^2(x,y)] + \\ &E_{04}E_{02}E_{03}(x,y) e^{i(kx\theta - \phi(x,y))} + \\ &E_{04}E_{02}E_{03}(x,y) e^{-i(kx\theta - \phi(x,y))} + \quad (3.5) \\ &= E_{0Λ1} + E_{0Λ2} + E_{0Λ3} \end{aligned}$$

Το $E_{0Λ1}$ αντιστοιχεί απλώς σε ένα μειωμένου πλάτους αντίγραφο του προσπίπτοντος κύματος αναπαραγωγής και συνεπώς αναπαριστάνει ένα επίπεδο κύμα που διαδίδεται κατά μήκος του άξονα z . Δεν παρουσιάζει

καμία σπουδαιότητα, για το υπό μελέτη ολόγραμμα, δεδομένου ότι δεν περιέχει καμία πληροφορία για τη φάση του κύματος αντικειμένου.

Το κύμα $E_{0\lambda 2}$ είναι ανάλογο του αρχικού κύματος αντικειμένου E_3 πολλαπλασιασμένου με ένα γραμμικό εκθετικό παράγοντα $e^{ikx\theta}$, πράγμα που σημαίνει πως παράγει ένα φανταστικό είδωλο σε απόσταση z_0 από το φιλμ και μετατοπισμένο κατά γωνία θ ως προς το z .

Ομοίως βλέπουμε ότι το $E_{0\lambda 3}$ είναι ανάλογο του συζυγούς κύματος του αρχικού κύματος αντικειμένου E_3 πολλαπλασιασμένο με τον εκθετικό παράγοντα $e^{-ikx\theta}$, με αποτέλεσμα το σχηματισμό πραγματικού ειδώλου του αντικειμένου σε απόσταση z_0 από το φιλμ και μετατοπισμένο κατά $-\theta$ ως προς το z .



4 ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ: ΤΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

4.1 Εισαγωγή

Η φυσική της ολογραφίας είναι καλά κατανοητή στις μέρες μας. Η πλήρης θεωρία είναι, εντούτοις, ιδιαίτερα περίπλοκη. Αρχίζει με την αντιπροσώπευση των φωτεινών κυμάτων με ορισμένους τύπους και ερευνά έπειτα από μαθηματική άποψη την συμβολή και άλλα φαινόμενα που προκύπτουν.

Ευτυχώς, είναι δυνατό να εξαχθούν από τα πολύπλοκα μαθηματικά της θεωρίας διαισθητικά κατανοητές απόψεις της ολογραφίας μέσω κάποιων προτύπων. Ο σκοπός τέτοιων προτύπων είναι να προσφέρουν απλούς εικονογραφημένους τρόπους κατανόησης των φαινομένων της ολογραφίας με θυσία όμως την πληρότητα.

Στην πραγματικότητα, δύο καλά πρότυπα της ολογραφίας έχουν επινοηθεί, πρότυπα τα οποία είναι εύκολο να κατανοηθούν και τα οποία τη διορατικότητα στο πώς λειτουργούν τα ολογράμματα. Είναι τόσο χρήσιμα ώστε ακόμη και ειδικοί στην ολογραφία στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε αυτά.

Ένα από αυτά είναι το λεγόμενο *Zone Plate* μοντέλο. Αυτό το πρότυπο έχει χρησιμοποιηθεί στις δημοφιλείς και τεχνικές συζητήσεις της ολογραφίας από το χρόνο της αρχικής εφεύρεσης του Δρ Gabor. Είναι ένα ισχυρό πρότυπο και εύκολα κατανοητό από την στιγμή που ο αναγνώστης εξοικειωθεί με τα οπτικά φαινόμενα της περίθλασης.

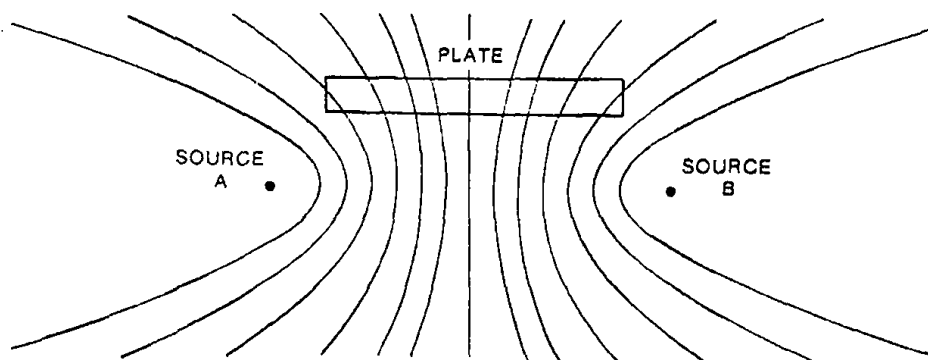
Ένα ακόμα απλούστερο πρότυπο της ολογραφίας επινοήθηκε από το Δρ Tung H. Jeong. Το γεωμετρικό πρότυπό του είναι ιδιαίτερα εύκολο να κατανοηθεί, αν και είναι περιορισμένο με ορισμένους τρόπους στη



δυνατότητα εφαρμογής του. Επειδή είναι τόσο σαφές και τόσο αποτελεσματικό όπου ισχύει, το γεωμετρικό πρότυπο είναι αυτό που θα συζητήσουμε.

4.2 Φωτογράφιση Των Σχεδίων Συμβολής

Γνωρίζουμε ότι όταν έχουμε υπέρθεση δυο φωτεινών κυμάτων από δύο σύμφωνες πηγές αυτά θα συμβάλουν. Η ενισχυτική και καταστρεπτική συμβολή παράγει ένα στάσιμο σχέδιο κροσσών, σχέδιο που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. Ο ρόλος του φιλμ που παρουσιάζεται θα εξεταστεί αργότερα.



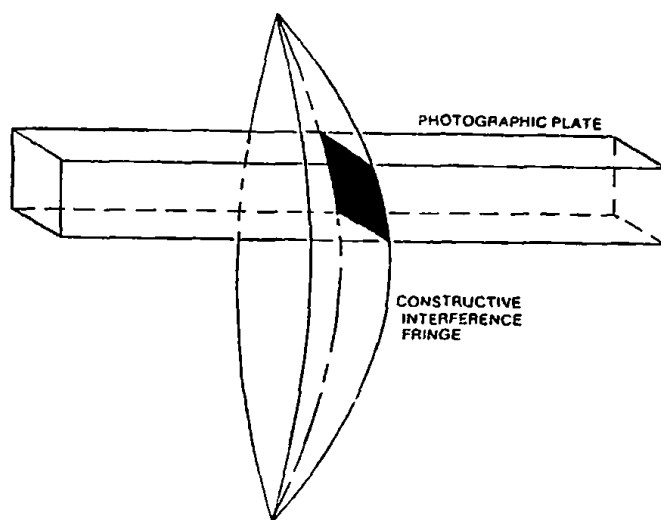
Σχήμα 4.1: Σχέδιο Κροσσών Συμβολής από δυο πηγές A κ B

Οι κροσσοί που παρουσιάζονται στο σχήμα είναι διατομές επιφανειών που στην πραγματικότητα είναι τρισδιάστατες επιφάνειες. Μπορούμε να απεικονίσουμε τις επιφάνειες αυτές με τη περιστροφή του σχήματος 4.1 ως προς την γραμμή που περνά από τα A και B. Για σαφήνεια, μέρος από μια από τις επιφάνειες παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2, που παρεμποδίζεται από ένα φιλμ.

Σε όλα τα σημεία αυτής της επιφάνειας η ένταση του φωτός έχει την μέγιστη τιμή της λόγω ενισχυτικής συμβολής. Η επόμενη γειτονική επιφάνεια (που δεν παρουσιάζεται) επίσης αποτελείται από σημεία όπου

υπάρχει ενισχυτική συμβολή, και μεταξύ των επιφανειών υπάρχει χαμηλή ένταση του φωτός, λόγω της καταστρεπτικής συμβολής.

Ένα ουσιαστικό βήμα στην ολογραφία είναι η παραγωγή του στάσιμου σχεδίου των κροσσών. Το επόμενο βήμα είναι η καταγραφή αυτού του σχεδίου έτσι ώστε να διαμορφωθεί το ολόγραμμα. Το γαλάκτωμα στα σχήματα 4.1 και 4.2 αντιδρά έντονα όπου το φως είναι έντονο και λιγότερο έντονα αλλού. Κατά συνέπεια οι κροσσοί λόγω ενισχυτικής συμβολής θα γίνουν επιφάνειες όπου έχει υπάρξει ισχυρή ενεργοποίηση των αλογονιδίων αργύρου του γαλακτώματος. Αφότου έχει υποβληθεί σε επεξεργασία χημικά το εκτεθειμένο φιλμ, θα είναι ένα φωτογραφικό αρνητικό που περιέχει ένα μόνιμο αρχείο του σχεδίου συμβολής.

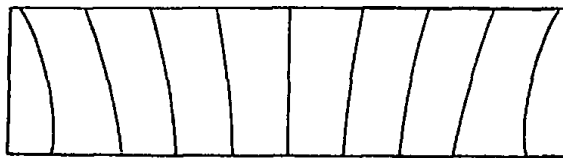


Σχήμα 4.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση κροσσού

Το επόμενο βήμα στην ολογραφία είναι να χρησιμοποιηθεί το φιλμ για να ανακατασκευαστεί μια ορατή αποκωδικοποιημένη έκδοση των πληροφοριών που καταγράφηκαν.

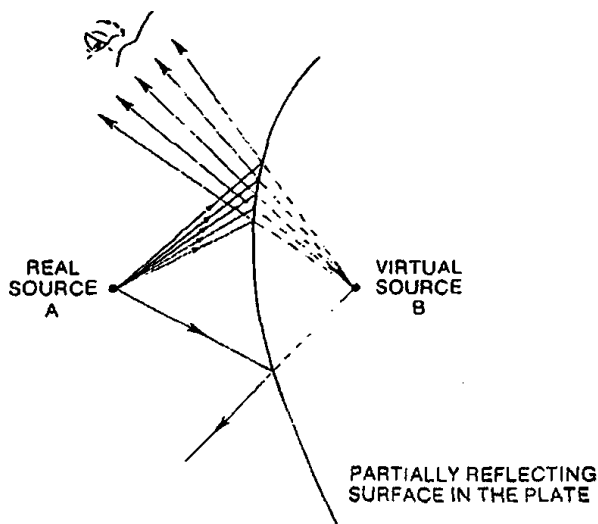
4.3 Οι Κροσσοί Ως Απεικονίσεις Των Επιφανειών

Το σχήμα 4.3 παρουσιάζει τη φύση του ολογραφικού αρνητικού σε μια εγκάρσια τομή. Κάθε ένας από τους κροσσούς μπορεί να θεωρηθεί ως μια μερικώς ανακλαστική επιφάνεια.



Σχήμα 4.3: Εγκάρσια Τομή του Φίλμ

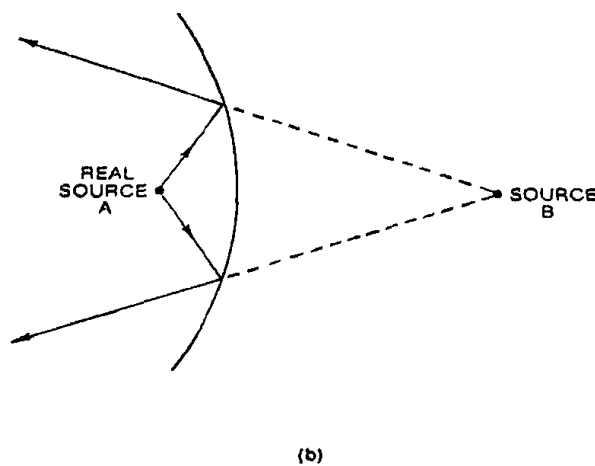
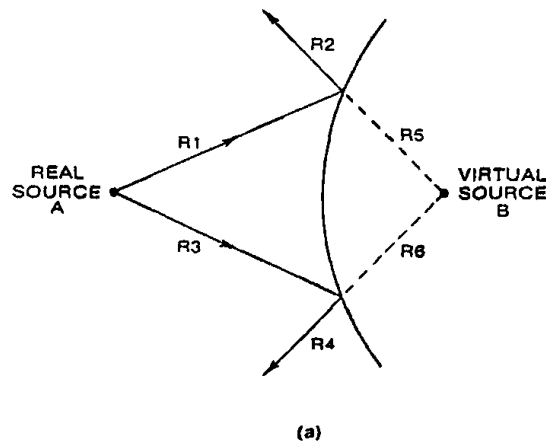
Ας υποθέσουμε ότι φωτίζουμε το φιλμ, το προσπίπτον φως θα πέσει πάνω σε μια από αυτές τις επιφάνειες. Ένα μέρος του θα ανακλαστεί πίσω, ένα μέρος θα διέρθει κατευθείαν και ένα μικρό ποσοστό θα χαθεί λόγω απορρόφησης.



Σχήμα 4.4: Ανάκλαση Φωτός Σε Μια Επιφάνεια

Η γενική φύση της ανάκλασης από μια από τις επιφάνειες παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Φως από την πραγματική πηγή Α ανακλάται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο μάτι του παρατηρητή. Ολόκληρο το φιλμ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο τοποθετημένων μερικών ανακλαστικών επιφανειών, κάθε μια από τις οποίες όταν φωτίζεται το φιλμ ενεργεί όπως αυτήν στο σχήμα 4.4.

Η σημασία των υπερβολικών επιφανειών βρίσκεται στον ακριβή τρόπο με τον οποίο ανακλούν τις ακτίνες φωτός. Ας εξετάσουμε το σχήμα 4.5 (a).



Σχήμα 4.5: Ανάκλαση Φωτός Σε Μια Αποτυπωμένη Επιφάνεια Στο Φιλμ



Η καμπύλη που παρουσιάζεται αντιπροσωπεύει μια από τις μερικώς ανακλαστικές επιφάνειες, που αρχικά δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τις πραγματικές πηγές A και B. Τώρα η πηγή B έχει αφαιρεθεί, και μόνο η πηγή A φωτίζει το φιλμ. Η ακτίνα R1, ανακλάται από την επιφάνεια ως ακτίνα R2. Ομοίως η ακτίνα R3 ανακλάται ως R4. Εάν οι ανακλώμενες ακτίνες R2 και R4 σχεδιαστούν προς τα πίσω, όπως οι R5 και R6 του σχήματος, αυτές οι επεκτάσεις θα διασταυρωθούν στο σημείο B. Στο μέρος (a) του σχήματος, η επιφάνεια είναι κυρτή προς το A. Το θεώρημα κρατά εξίσου καλά και στην περίπτωση (b) του σχήματος, όπου η επιφάνεια είναι κοίλη προς το A.

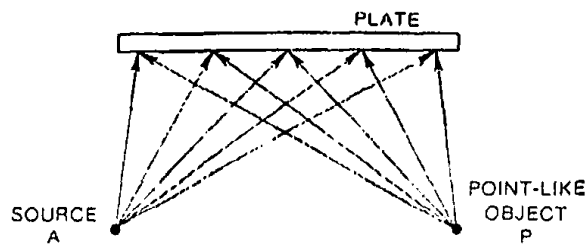
Επιπλέον, αυτό ισχύει για οποιαδήποτε ακτίνα από το A. Ως εκ τούτου στο σχήμα 4.4, όλες οι ακτίνες που παρουσιάζονται ότι προέρχονται από την πηγή A και ανακλώνται από την επιφάνεια θα διασταυρωθούν στο B αν οι ανακλώμενες ακτίνες προεκταθούν προς τα πίσω.

Εάν δούμε τις ανακλώμενες ακτίνες όπως αυτές του σχήματος 4.4, τι θα αντιληφθούμε; Το μάτι μας δεν έχει κανέναν μηχανισμό να καταλάβει αν οι λαμβανόμενες ακτίνες φωτός προήλθαν πραγματικά από την πηγή A μετά από ανακλάσεις και ότι δεν υπάρχει καμία πραγματική ακτίνα που να προέρχεται από την πηγή B. Στο μάτι, είναι ακριβώς σαν οι ακτίνες να προήλθαν από το B. Αυτό ονομάζεται φανταστικό είδωλο, και με αυτόν τον τρόπο υπογραμμίζουμε ότι η πηγή δεν είναι πραγματικά εκεί.

4.4 Το Ολόγραμμα Ενός Σημειακού Αντικειμένου

Τώρα είμαστε έτοιμοι να συζητήσουμε την παραγωγή ενός ολογράμματος ενός αντικειμένου και της παρατήρησης του. Σε αυτό το πρώτο στάδιο το αντικείμενο μας θα είναι πολύ μικρό, σχεδόν σημειακό. Αντίθετα παρακάτω οι ιδέες μας θα εφαρμοστούν σε πιο εκτεταμένα αντικείμενα.





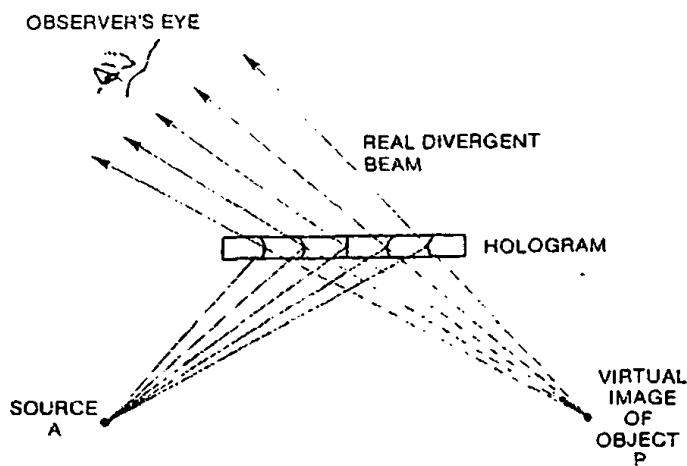
Σχήμα 4.6: Κατασκευή Ολογράμματος Σημειακού Αντικειμένου

Στο σχήμα 4.6 ένα μέρος από το φως της πηγής A πηγαίνει άμεσα στο φιλμ αυτή είναι η δέσμη αναφοράς (reference beam). Ένα μέρος από το φως (που δεν υποδεικνύεται από τις ακτίνες στο σχέδιο) πηγαίνει από την πηγή A στο αντικείμενο P. Αυτό ανακλάται από το P, και ένα μέρος του πέφτει στο φιλμ. Αυτό το φως είναι η δέσμη αντικειμένου (object beam). Οι ακτίνες αναφοράς και αντικειμένου συμβάλουν στο γαλάκτωμα. Αφού το φιλμ εκτεθεί και υποβληθεί στην χημική επεξεργασία, είναι ένα ολόγραμμα σημειακού αντικειμένου.

Καλό θα ήταν σε αυτό το σημείο να συγκρίνουμε τα σχήματα 4.1 και 4.6. Αν και στο 4.1 η πηγή B είναι αυτόφωτη ενώ στο 4.6 το αντικείμενο P λάμπει μόνο λόγω του ανακλώμενου φωτός, βλέπουμε ότι η γεωμετρία είναι η ίδια στις δύο περιπτώσεις. Αυτό σημαίνει ότι οι μορφές των κροσσών συμβολής και οι θέσεις τους στα γαλακτώματα είναι οι ίδιες στις δύο περιπτώσεις. Ως εκ τούτου με την ανακατασκευή του ολογράμματος όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 4.7 θα εμφανιστεί ένα σημειακό φανταστικό είδωλο, ακριβώς όπως το περιμέναμε.

Εντούτοις, για το πώς το φανταστικό είδωλο εμφανίζεται, εξαρτάται από ακόμα μια ιδιότητα των κροσσών και ειδικότερα τον βαθμό αμαύρωσης τους ή αντίθεσής τους με το γενικά διαφανέστερο υπόβαθρο του γαλακτώματος. Εάν η ανακλαστικότητα του αντικειμένου P είναι τόσο μεγάλη ώστε να ανακλά όλο σχεδόν το φως που το φωτίζει, η συμβολή των ακτίνων αναφοράς και αντικειμένου στο γαλάκτωμα θα παράγει κροσσούς με υψηλή αντίθεση (μεγάλο κοντράστ). Έτσι όταν ανακατασκευαστεί η εικόνα, θα είναι αρκετά φωτεινή. Αντίθετα αν το αρχικό αντικείμενο P είναι θαμπό, και ανακλά λίγο φως, οι κροσσοί στο γαλάκτωμα θα είναι χαμηλής αντίθεσης (μικρό κοντράστ), και η εικόνα θα είναι θαμπή.

Αυτό είναι θεμελιώδους σπουδαιότητας, γιατί είναι η βάση για πώς η ολογραφική εικόνα μιας σκηνής μπορεί να παρουσιάσει ποικίλους βαθμούς φωτεινότητας στις διάφορες προεπισκοπήσεις του αντικειμένου

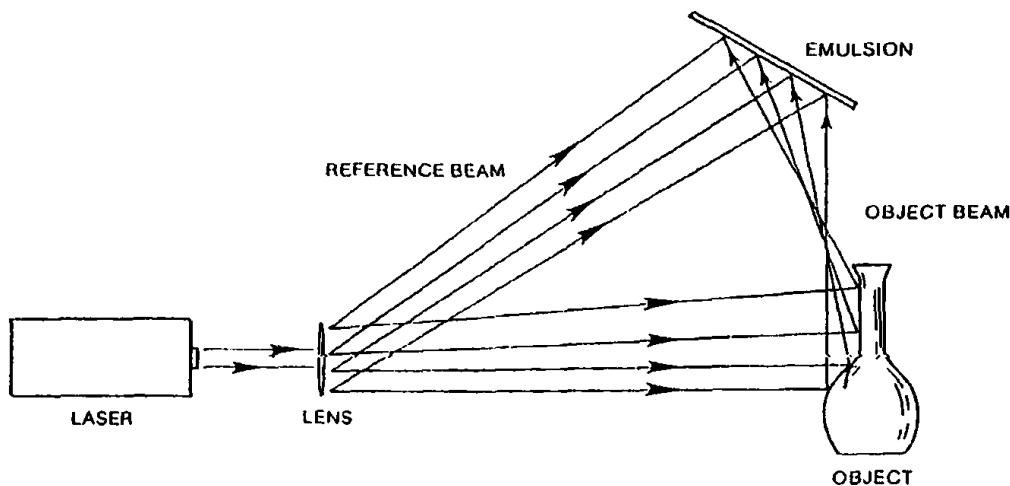


Σχήμα 4.7: Ανακατασκευή Ολογράμματος Σημειακού Αντικειμένου

4.5 Ολόγραμμα Μιας Εκτεταμένης Σκηνής

Εάν, στην παραγωγή του ολογράμματος όπως στο σχήμα 4.6, το αντικείμενο P είχε βρεθεί σε ένα διαφορετικό σημείο (πλησιέστερα ή μακρύτερα από το φιλμ), οι κροσσοί που θα καταγράφονταν στο ολόγραμμα θα ήταν διαφορετικοί από πριν και με έναν τρόπο που θα αντιστοιχούσε στη μετατόπιση. Στην ανακατασκευή της εικονικής εικόνας όπως στο σχήμα 4.7, ο θεατής θα αντιλαμβανόταν το αντικείμενο όπου βρισκόταν αρχικά. Κατά συνέπεια το φιλμ περιέχει πληροφορίες για τη θέση του αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο.

Το σχήμα 4.8 επιδεικνύει πώς ένα ολόγραμμα διέλευσης ενός αρκετά μεγάλου αντικειμένου μπορεί να γίνει. Το συνεχές φως που απαιτείται είναι μια ακτίνα από ένα λέιζερ.



Σχήμα 4.8: Κατασκευή Ολογράμματος Τρισδιάστατου Αντικειμένου

Η ακτίνα αποκλίνει από έναν φακό τόσο ώστε να μπορέσει να φωτίσει το αντικείμενο ικανοποιητικά. Στο σχήμα, παρουσιάζονται τέσσερα σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου να ανακλούν το προσπίπτον φως. Σύνολα

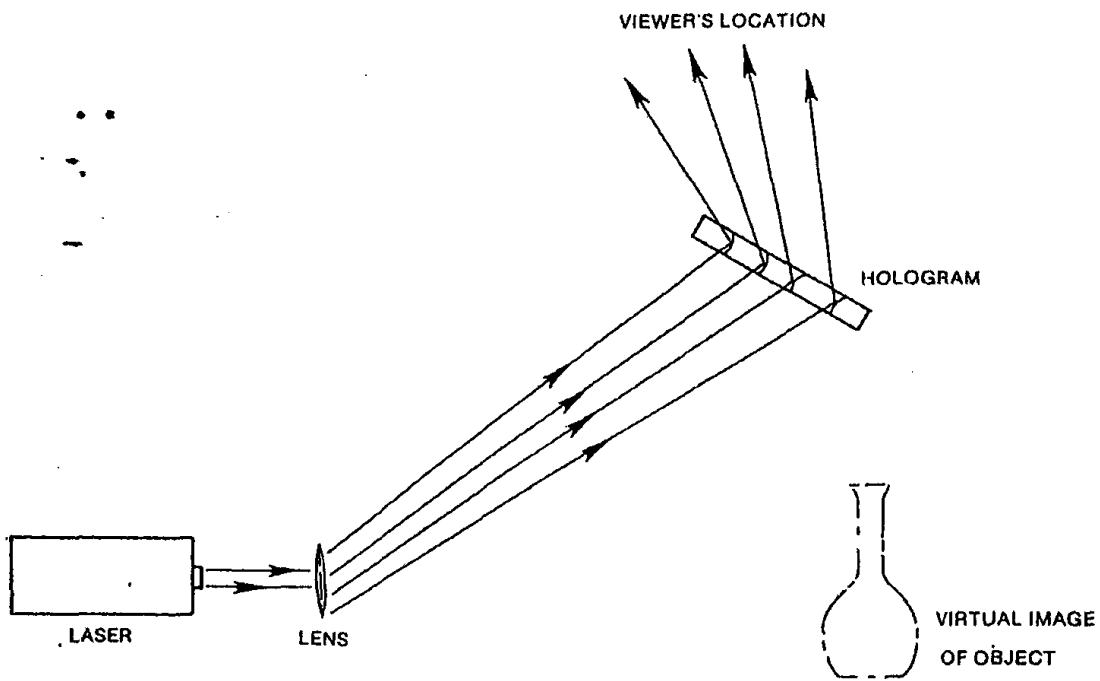
υπερβολικών επιφανειών θα διαμορφωθούν από την συμβολή, ένα για κάθε μέρος της επιφάνειας. Κάθε σύνολο θα διαφέρει στις λεπτομέρειες από τα άλλα. .

Όταν το ολόγραμμα θα παρατηρηθεί, τα τέσσερα μέρη της επιφάνειας θα φανούν, κάθε ένα στην κατάλληλη χωρική θέση του όσον αφορά τα άλλα και κάθε ένα με την κατάλληλη φωτεινότητα ή πυκνότητα του. Εν ολίγοις, θα φανούν ανακατασκευασμένα ρεαλιστικά.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σκεφτούμε τι γίνεται όταν όλα τα σημεία του αντικειμένου συμπεριφέρονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως τα τέσσερα αντιπροσωπευτικά σημεία προηγουμένως. Το ολόγραμμα του αντικειμένου θα περιέχει μια πολύ περίπλοκη συλλογή του συνόλου των κροσσών συμβολής. Εντούτοις, όταν φωτίσουμε το ολόγραμμα για να το παρατηρήσουμε τα διάφορα σύνολα κροσσών θα παραγάγουν τις εικόνες των διαφορετικών σημείων, εικόνες που θα ταξινομηθούν κατάλληλα και που θα τοποθετηθούν σε σωστές χωρικές θέσεις μεταξύ τους. Η ανακατασκευασμένη εικόνα θα έχει το αληθινό βάθος.

Η ρύθμιση για την ανακατασκευή του αντικειμένου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9. Παρατηρούμε ότι εάν βάλουμε το μάτι μας στα αριστερά της περιοχής "VIEWER'S LOCATION", θα δούμε το αντικείμενο από μια αντίστοιχη κατεύθυνση και ομοίως εάν κινηθείτε προς τα δεξιά θα το δούμε από άλλη κατεύθυνση.





Σχήμα 4.9: Ανακατασκευή Ολογράμματος Τρισδιάστατου Αντικειμένου

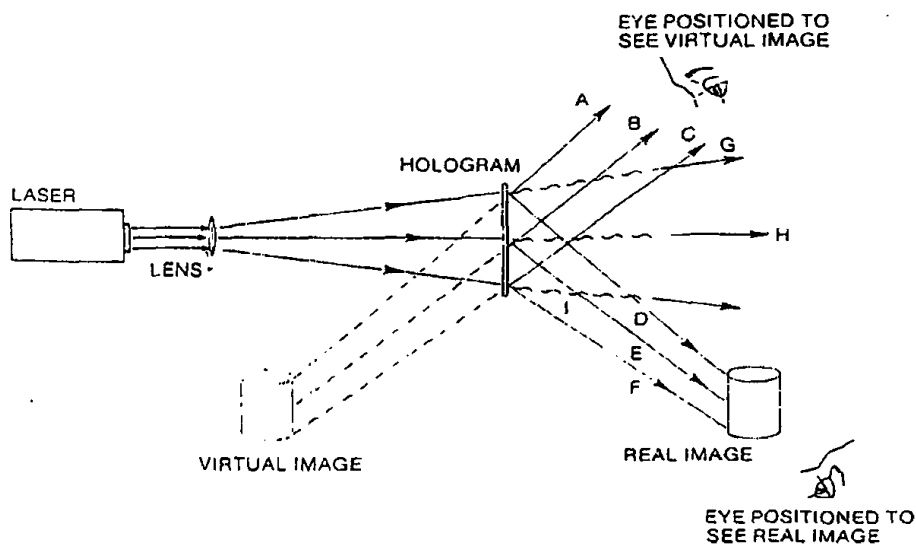
5 ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Θα ήταν θαυμάσιο εάν τα ολογράμματα διέλευσης μπορούσαν να παρατηρηθούν με τις συνηθισμένες λευκές πηγές φωτός όπως το φως του ήλιου ή οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες, απομακρύνοντας την ανάγκη για το ερυθρό φως του λέιζερ. Όπως θα ήταν επίσης θαυμάσιο εάν οι εικόνες αυτές παραγόντουσαν σε πλήρη φυσικά χρώματα. Δυστυχώς, η ολοκλήρωση αυτών των πραγμάτων δεν είναι ακόμα πραγματοποιήσιμη. Παραδείγματος χάριν, εάν ένα ολόγραμμα διέλευσης φωτιστεί από συνηθισμένο λευκό φως, η εικόνα που θα παρατηρηθεί θα είναι μια κηλίδα με φασματική διασπορά των χρωμάτων πάρα ένα καθαρό και χρωματιστό αντικείμενο.

5.2 Πραγματική Και Φανταστική Εικόνα

Στο σχήμα 5.1 μια αποκλίνουσα ακτίνα λέιζερ χτυπάει το ολόγραμμα από αριστερά.



Σχήμα 5.1: Ανακατασκευή Ολογράμματος Διέλευσης

Το ολόγραμμα "επεξεργάζεται" το φως και τρεις ακτίνες προκύπτουν. Μια ακτίνα αποκλίνει και ταξιδεύει προς τα πάνω. Αυτή η ακτίνα παράγει την φανταστική εικόνα. Μια άλλη ακτίνα συγκλίνει, ή στρέφεται, και ταξιδεύει προς τα κάτω. Αυτή η ακτίνα παράγει την πραγματική εικόνα. Υπάρχει επίσης και μια διερχόμενη ακτίνα. Αυτή η "άμεση" ακτίνα περνάει μέσω του φιλμ ως ένα είδος διαρροής. Δεν κουβαλάει ολογραφικές πληροφορίες για το αντικείμενο και επομένως δεν θα συζητηθεί περαιτέρω.

Εάν εξετάσουμε την αποκλίνουσα ακτίνα ήμαστε σε θέση να δούμε την φανταστική εικόνα επειδή οι φακοί των ματιών μας, μας παρέχουν την απαραίτητη δράση. Αφ' ετέρου, η συγκλίνουσα ακτίνα παράγει την πραγματική εικόνα χωρίς την ανάγκη για οποιουσδήποτε εξωτερικούς φακούς. Ένα απλό και ενδιαφέρον πείραμα αποτελεί η μελέτη της πρόσπτωσης των ακτίνων σε ένα άσπρο κομμάτι χαρτί. Εάν το χαρτί τοποθετηθεί στην αποκλίνουσα ακτίνα, μόνο μια ασαφής περιοχή φωτός θα φανεί. Εάν το χαρτί τοποθετηθεί στη συγκλίνουσα ακτίνα, τα αντικείμενα της σκηνής θα σχηματιστούν. Αυτό είναι η πραγματική εικόνα.

Δεδομένου ότι υποθέτουμε ότι το φως παρατήρησης έχει το ίδιο χρώμα με αυτό που χρησιμοποιείται για να κάνει το ολόγραμμα, και οι δύο εικόνες θα φανούν σε αυτό το χρώμα. Συνήθως αυτό σημαίνει ότι οι εικόνες είναι στο χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα του λέιζερ He:Ne.

Η πραγματική εικόνα έχει διάφορες ιδιότητες. Μια από αυτές είναι ότι υπάρχει σε μια υπολογίσιμη περιοχή του χώρου. Εάν κινήσουμε το χαρτί πιο κοντά ή μακρύτερα από το ολόγραμμα, η εικόνα θα εμφανίζεται ακόμα στο χαρτί. Αυτό σημαίνει ότι το βάθος της εστίασης είναι μεγάλο. Με το χαρτί σε μια τυχαία θέση, τα αντικείμενα στο ολόγραμμα θα μπορούν να διακριθούν, αλλά μερικά θα είναι πιο εστιασμένα από άλλα. Καθώς το χαρτί κινείται, τα εστιασμένα μέρη αλλάζουν. Διαφορετικά μέρη είναι σε εστίαση



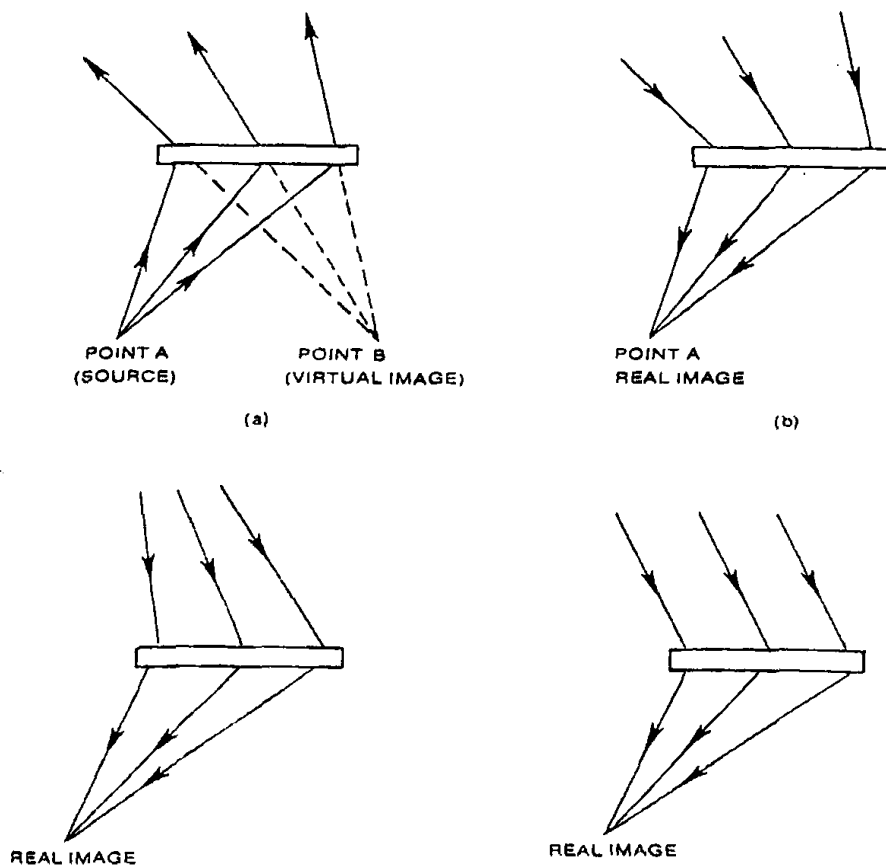
σε διαφορετικές αποστάσεις από το φιλμ αλλά το χαρτί μπορεί να μας παρουσιάσει μόνο δισδιάστατες προβολές.

Με τη μέθοδο της εικόνας που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1, τα αντικείμενα της εικόνας μπορεί να φανούν μεγενθυμένα σε σύγκριση με τα αρχικά-αντικείμενα.

Τέλος, εάν τοποθετήσουμε το μάτι μας σε θέση τέτοια ώστε να δούμε την πραγματική εικόνα με ή χωρίς την κάρτα, θα δούμε μια πολύ περίεργη ιδιότητα του αντικειμένου. Ιδιότητα η οποία ονομάζεται ψευτοπροοπτική.

5.3 Πως Παράγεται Η Πραγματική Εικόνα

Ας αρχίσουμε με τα διάφορα μέρη του σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.2: Πραγματική Εικόνα, Πως Παράγεται.

Το μέρος (a) παρουσιάζει ένα εξοικειωμένο σχέδιο για μας. Οι ακτίνες από την πηγή A ανακλώνται στις επιφάνειες του ολογράμματος και αποκλίνουν. Εάν συνεχιστούν προς τα πίσω, τέμνονται στη θέση B. Στο (b) οι κατευθύνσεις των ακτίνων σε σχέση με το (a) έχουν αντιστραφεί. Είναι μια βασική αρχή στην οπτική ότι οι ακτίνες στο (b) θα συμπεριφερθούν ακριβώς όπως εκείνες στο (a), εκτός από το ότι το φως θα ταξιδέψει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Άρα συνεπάγεται ότι εάν φωτίσουμε το φιλμ με συγκλίνουσες ακτίνες, αυτές θα ανακλαστούν και έπειτα θα συγκλίνουν (εστιάσουν). Έτσι θα διαμορφώσουν την πραγματική εικόνα στο A.

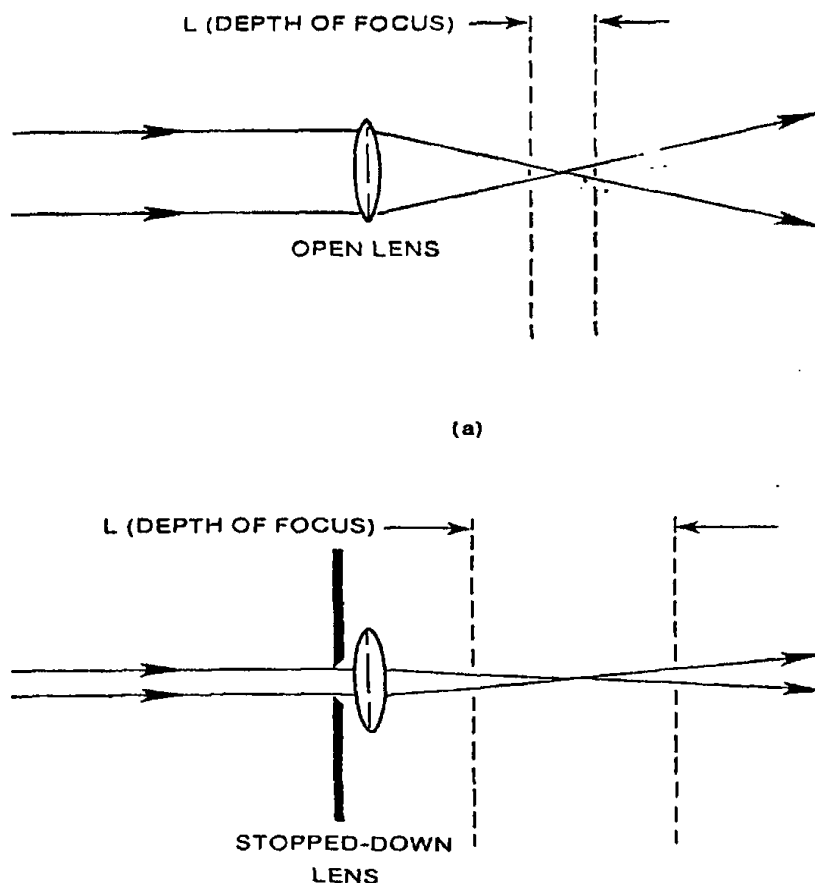
Αυτός είναι ένας τρόπος για το σχηματισμό της πραγματικής εικόνας. Επιπλέον, είναι ο μόνος τρόπος με τον οποίο η παραγόμενη εικόνα είναι αισθητά εστιασμένη και ελάχιστα διαστρεβλωμένη. Εντούτοις, η πραγματική εικόνα μπορεί να σχηματιστεί εάν το φιλμ φωτιστεί από μια ακτίνα λέιζερ "ανοιγμένη" από έναν απλό φακό ή ακόμα και κατευθείαν από την πηγή laser. Αυτό όμως θα έχει σαν αποτέλεσμα την ανακατασκευή του ολογράμματος με απώλειες όμως στο οπτικά παραγόμενο αποτέλεσμα.

5.4 Βάθος Εστίασης

Η έννοια του βάθους εστίασης είναι κάτι που διευκρινίζεται στις προηγούμενες συζητήσεις για την πραγματική εικόνα. Ένα χαρτόνι που τοποθετείται οπουδήποτε σε μια σειρά αποστάσεων από ένα ολόγραμμα μπορεί να μας δώσει την πραγματική εικόνα. Αυτό είναι μια περίπτωση μεγάλου βάθους εστίασης. Εάν η κάρτα έπρεπε να τοποθετηθεί σε μια ιδιαίτερη απόσταση, το βάθος της εστίασης θα ήταν μικρό. Το βάθος εστίασης είναι γνωστό στους φωτογράφους αλλά ακόμη και για έναν μη φωτογράφο η έννοια γίνεται εύκολα κατανοητή.



Το σχήμα 5.3 παρουσιάζει αντιπροσωπευτικές ακτίνες φωτός που περνούν μέσω ενός φακού. Προκειμένου να αποκτηθεί μια καλή φωτογραφία σε αυτήν την διάταξη το φιλμ μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε μέσα σε μια ορισμένη περιοχή L χωρίς καμία σοβαρή επιδείνωση της εικόνας. Εάν ο φακός είναι ευρέως ανοικτός όπως στο (a), η περιοχή L είναι στενή, αλλά εάν χρησιμοποιηθεί ένα μικρό διάφραγμα όπως στο (b), η περιοχή L θα είναι μεγαλύτερη. Αυτό το " L " είναι το βάθος της εστίασης και όπως είδαμε, εξαρτάται από το μέγεθος του ανοίγματος των



Σχήμα 5.3: Σχηματική απεικόνιση του βάθους πεδίου

φακών. Εξαρτάται επίσης από τον λόγο της εστιακής απόστασης του φακού



προς τη διάμετρο του ανοίγματος, μια ποσότητα γνωστή στους φωτογράφους ως αριθμός f .

Όταν το φως ανακλάται από έναν κυρτό καθρέφτη οι ανακλώμενες ακτίνες μπορούν να συγκλίνουν για να παραγάγουν μια πραγματική εικόνα. Η διαδικασία δεν είναι η ίδια με αυτήν στην οποία ένας φακός επιδρά σε φως που περνά μέσω αυτού για να παραγάγει μια πραγματική εικόνα, αλλά οι δύο διαδικασίες είναι αρκετά ανάλογες. Μπορούμε να κατανοήσουμε τον λόγο που η ολογραφική πραγματική εικόνα έχει τόσο μεγάλο βάθος εστίασης αν παρομοιάσουμε τις ανακλαστικές επιφάνειες του ολογράμματος ως φακούς με μεγάλη εστιακή απόσταση ή σαν φακούς οι οποίοι έχουν μεγάλο αριθμό f .

Παρατηρούμε ότι το θέμα του βάθους της εστίασης δεν προκύπτει με την φανταστική εικόνα. Στην παρατήρηση αυτής της εικόνας, το μάτι μας λαμβάνει μια αποκλίνουσα ακτίνα φωτός και εστιάζει για να μας δώσει μια καθαρή εικόνα.

5.5 Μεγέθυνση

Οι πραγματικές και φανταστικές εικόνες ενός αντικειμένου δεν έχουν απαραίτητως το ίδιο μέγεθος όπως το αρχικό αντικείμενο. Συνήθως η φανταστική εικόνα αναπαράγει τέλεια τα αντικείμενα όσον αφορά τα πραγματικά τους μεγέθη. Στην πραγματικότητα, εάν φωτίσουμε ένα ολόγραμμα με φως λέιζερ αφού το περάσουμε από έναν αποκλίνοντα φακό και μετά αλλάξουμε την απόσταση λέιζερ-ολόγραμμα θα δούμε, σε μερικές αποστάσεις, τις διαστάσεις των αντικειμένων κατά την αναπαραγωγή να αλλάζουν.

Υπάρχουν διάφορες μεταβλητές που έχουν επιπτώσεις στην μεγέθυνση: οι αποστάσεις των αντικειμένων και της πηγής φωτός από το



φιλμ κατά τη διάρκεια της παραγωγής του ολογράμματος, η απόσταση της πηγής φωτός από το φιλμ κατά τη διάρκεια της ανακατασκευής του και τα μήκη κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του ολογράμματος και του φωτός που χρησιμοποιείται στην εξέταση.

Υπάρχουν δύο ειδικές περιπτώσεις στις οποίες η μεγέθυνση θα είναι ίση με τη μονάδα. Σε μια από τις περιπτώσεις η πηγή φωτός που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του ολογράμματος και η πηγή φωτός που χρησιμοποιείται στην παρατήρηση της εικόνας έχουν άπειρες αποστάσεις από το φιλμ. Δηλαδή, τα επίπεδα κύματα χρησιμοποιούνται και στις δύο περιπτώσεις. Αυτός ο όρος δεν ικανοποιείται συνήθως επειδή το φως λέιζερ που χρησιμοποιείται ανοίγει με τη χρήση φακού.

Η δεύτερη ειδική περίπτωση εμφανίζεται όταν έχουν οι πηγές καταγραφής και ανακατασκευής τις ίδιες πεπερασμένες αποστάσεις από το φιλμ. Σ' αυτήν την περίπτωση τα κυματομέτωπα είναι σφαιρικά και όμοια. Εάν οι δύο αποστάσεις δεν είναι ίσες, η μεγέθυνση για την εικονική εικόνα θα είναι πάντα λιγότερο από τη μονάδα, ενώ για την πραγματική εικόνα, η μεγέθυνση θα είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα.

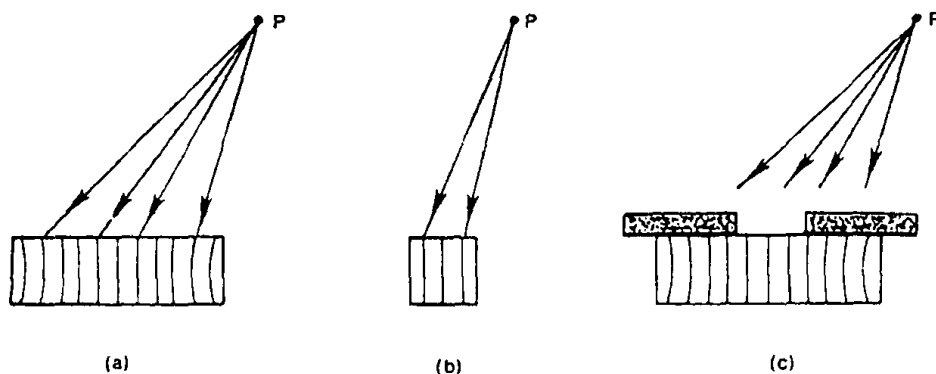
5.6 Πλεονασμός: Κάθε Κομμάτι Από Ένα Ολόγραμμα Είναι Ένα Ολόγραμμα

Στα ευρέα και στενά ολογράμματα στα (a) και (b) του σχήματος 5.4 έχουν καταγραφεί κροσσοί συμβολής με αποτέλεσμα κάθε ένα να περιέχει ολογραφικές πληροφορίες από το αντικείμενο.

Εντούτοις, στο (a) το φιλμ "βλέπει" το αντικείμενο από ένα ευρύτερο φάσμα κατευθύνσεων απ' ό,τι στο (b). Στην αναδημιουργία της φανταστικής (ή πραγματικής) εικόνας με το ευρύ ολόγραμμα, ο θεατής μπορεί να "δει" το αντικείμενο P από μια σειρά κατευθύνσεων. Με το στενό ολόγραμμα, το



αντικείμενο στο P θα φανεί τρισδιάστατο πάλι αλλά, ο θεατής, θα έχει λίγη ελευθερία στην κίνηση του ματιού του για να το δει. Εάν ένα ολόγραμμα είναι σπασμένο σε κομμάτια, κάθε κομμάτι του θα αναδημιουργεί το αρχικό ολόγραμμα.



Σχήμα 5.4: Ανακατασκευή 3 Ολογραμμάτων Διαφορετικών Μηκών

Πλεονασμός, είναι ο όρος που χρησιμοποιούμε για να εξηγήσουμε την παραπάνω ιδιότητα. Ένας λιγότερο καταστρεπτικός τρόπος να παρατηρηθεί αυτό είναι να χρησιμοποιηθεί η συνηθισμένη αποκλίνουσα ακτίνα και μια αδιαφανής οθόνη με μια τρύπα ώστε να εμποδίσει τον φωτισμό ολόκληρου του φιλμ. Μόνο ένα μικρό σημείο θα φωτιστεί και με κάποια προσπάθεια θα μπορέσουμε, μέσω αυτού να δούμε την φανταστική εικόνα. Με τα μικρά κομμάτια ενός ολογράμματος, υπάρχει επίσης και κάποια υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας. Γενικά ο συνολικός αριθμός κροσσών σε ένα ολόγραμμα, και όχι μόνο η χωρική πυκνότητα αυτών, είναι σημαντικό στον καθορισμό της ποιότητας της εικόνας. Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο καλύτερα.

Υποθέστε ένα ολόγραμμα διελεύσεως το οποίο φωτίζεται από μια ακτίνα λέιζερ. Εάν γυρίσουμε το φιλμ έτσι ώστε η πλευρά που φώτιζε το λέιζερ να γίνει η πλευρά που κοιτάζουμε, τότε είμαστε πάλι σε θέση να δούμε τις φανταστικές και πραγματικές εικόνες.

6 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

6.1 Οπτική Τράπεζα

Τα ολογράμματα πρέπει να γίνουν σε ένα περιβάλλον εξ ολοκλήρου χωρίς δονήσεις ή οποιοδήποτε τύπο κίνησης. Στόχος είναι να έχουμε μια επιφάνεια επάνω στην οποία θα μπορούμε να τοποθετήσουμε τα οπτικά στοιχεία μας, και η οποία θα είναι με κάποιο τρόπο απομονωμένη από κάθε είδους δονήσεις. Αυτό το κάνουμε γιατί οι σχηματισμοί συμβολής χάνονται όταν οι δονήσεις είναι της τάξεως $\lambda/4$ κ μεγαλύτερες.

Βαρείς ήχοι χαμηλής συχνότητας ταξιδεύουν εύκολα κατά μήκος της επιφάνειας της γης, με αποτέλεσμα πολλά πράγματα συμπεριλαμβανομένων των ολογραφικών μας οπτικών στοιχείων να θέτονται σε ταλάντωση. Αυτό είναι αρκετά συχνά ικανό να καταστρέψει ένα ολόγραμμα.

Το πρόβλημα λύνεται με τη χρησιμοποίηση ενός συστήματος απομόνωσης δόνησης που αποτελείται από μια πολύ βαριά πλάκα που στηρίζεται σε μια δομή εναέριας υποστήριξης. Δηλαδή με την βοήθεια μιας οπτικής τράπεζας.

Η απομόνωση των δονήσεων είναι ένας σχετικός όρος. Όλα τα πράγματα δονούνται συνεχώς μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Επομένως είναι σημαντικό να τοποθετήσουμε την οπτική τράπεζα σε μια αρκετά ήρεμη και απομονωμένη περιοχή όπως ένα ισόγειο, ένα γκαράζ, ή ένα υπόγειο. Παρόλο που ένα τσιμεντένιο πάτωμα είναι καλύτερο, τα κτήρια τείνουν να ενισχύσουν τις δονήσεις, με γενικό κανόνα ότι όσο ψηλότερα πηγαίνουμε τόσο χειρότερα είναι. Αυτό δεν σημαίνει ότι είναι αδύνατο να γίνουν ολογράμματα σε ένα κτήριο.



Εμείς αντί για οπτική τράπεζα χρησιμοποιήσαμε ένα βαρύ μαύρο μεταλλικό τραπέζι διαστάσεων 150 cm X 80 cm.

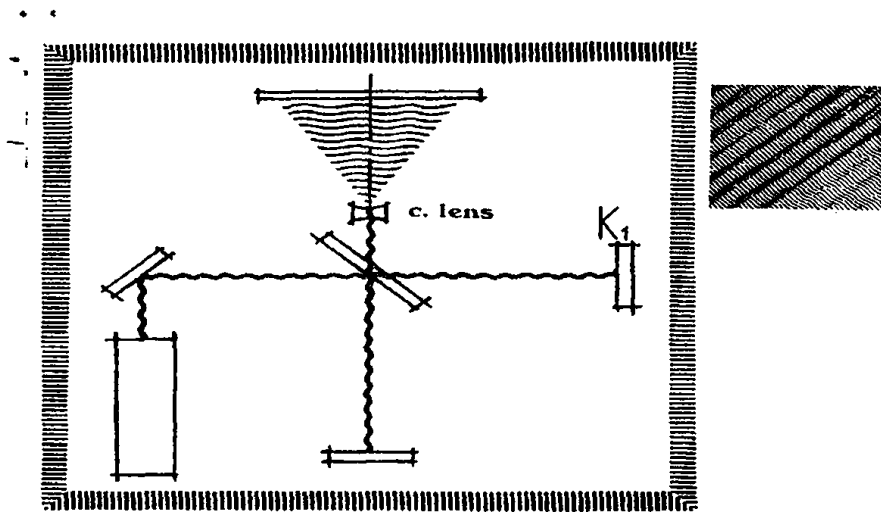
Είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι το χρησιμοποιούμενο δωμάτιο μπορεί να συσκοτιστεί εντελώς. Θυμηθείτε ότι τα ολογράμματα θα εκτεθούν στο σκοτάδι και ότι τα χρησιμοποιούμενα φιλμ είναι ευαίσθητα, όχι μόνο στο φως λείζερ, αλλά και σε ένα μεγάλο μέρος του ορατού φωτός.

Πρωταρχικός στόχος μας ήταν η δημιουργία ενός σκοτεινού θαλάμου που να είναι απομονωμένος από οποιαδήποτε ορατή ακτινοβολία, για αυτό και με ειδικές διατάξεις (μαύρο χαρτόνι, μαύρη κουρτίνα) επικαλύψαμε τα ανοίγματα. Έπειτα, και λαμβάνοντας υπόψη όπως θα αναφέρουμε παρακάτω, ότι το φιλμ που χρησιμοποιήσαμε δεν είναι φωτοευαίσθητο μόνο στην πράσινη περιοχή, περάσαμε με πράσινη ζελατίνα {Green Sheets Edmund Scientific Company (stock #35136)} εξωτερικά τον λαμπτήρα πυρακτώσεως που είχαμε στο εσωτερικό του σκοτεινού θαλάμου και επομένως, εξασφαλίσαμε φωτεινότητα κατά την διάρκεια της κατασκευής ολογραμμάτων. Οποιοσδήποτε διαρροές φωτός μπορούν να καλυφθούν με μαύρη ηλεκτρική ταινία. Ένας καλός τρόπος να βρεθούν οι διαρροές και να διαπιστώσουμε αν συσκοτίσαμε επιτυχώς το θάλαμο είναι να κλειστούν όλα τα φώτα, να αφηθούν τα μάτια μας να εξοικειωθούν με το σκοτάδι για λίγα λεπτά, και να ψαχτούν έπειτα τα σημεία όπου το φως περνάει κατευθείαν από το εξωτερικό.

Επόμενο βήμα μας ήταν να εξασφαλίσουμε την σταθερότητα της τράπεζας μας αλλά κυρίως να ελέγξουμε τις αντιδράσεις της σε τυχαίες δονήσεις που θα πραγματοποιούνταν στο εσωτερικό του σκοτεινού θαλάμου. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήσαμε την συμβολομετρική διάταξη Michelson. Με την βοήθεια του Laser He:Ne, ενός διαχωριστή δέσμης, δυο καθρέπτες μπροστινής ανάκλασης και ενός αποκεντρωτικού φακού



κατασκευάσαμε την παρακάτω διάταξη, με τη βοήθεια της οποίας παρατηρήσαμε την παρακάτω εικόνα συμβολής.



Κάθε πηγή θορύβου ή δόνησης όπως είναι λογικό προκαλεί μεταβολή στην σταθερότητα της εικόνας συμβολής. Γι' αυτό το λόγο μελετήσαμε μετά από πόσο χρόνο από ένα εσκεμμένο χτύπημα του τραπεζιού μας ή ακόμα και το θορυβώδες βάδισμα στο πάτωμα του θαλάμου μας, ηρεμούσε η εικόνας συμβολής μας.

Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά καθώς η τράπεζα είχε πολύ καλές αντιδράσεις, δηλαδή η εικόνα συμβολής ηρεμούσε μετά από 3-4 λεπτά και κρίθηκε σταθερή.

6.2 Όργανα Και Υλικά

6.3 LASER

Το Laser είναι μια συσκευή μονοχρωματικής δέσμης φωτός με ιδιότητες, διαφορετικές από τις κλασσικές πηγές φωτός. Η ονομασία του οφείλεται στα αρχικά των λέξεων Light Amplification by Stimulated

Emission of Radiation και σημαίνει ενισχυτής φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας.

Το Laser He-Ne είναι ιδανικό για εφαρμογές συμβολομετρίας και αυτό γιατί: Πρώτον έχει αρκετά μεγάλο μήκος συμφωνίας. Δεύτερον, το μήκος κύματος τους, 632,8nm, είναι στο ορατό (κόκκινο) με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η ευθυγράμμιση του συμβολόμετρου, επίσης η ακρίβεια στις μετρήσεις είναι καλύτερη σε σχέση με άλλα Laser με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Τρίτον, η ισχύς του Laser He-Ne, συνήθως λίγα mW, είναι κατάλληλη γιατί δεν είναι ούτε πολύ μικρή, έτσι ώστε να έχουμε πρόβλημα να χωρίσουμε τη δέσμη, αλλά ούτε και πολύ μεγάλη, πράγμα που θα απαιτούσε τη χρησιμοποίηση ειδικών οπτικών από υλικά ανθεκτικά σε μεγάλες εντάσεις αλλά και ειδικών φίλτρων για την ελάττωση της έντασης της ακτίνας αντικειμένου ή της ακτίνας.

Τα laser που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια της κατασκευής των ολογραμμάτων ήταν laser He:Ne χαμηλής ισχύος μονοχρωματικής ερυθρής ακτινοβολίας 6328 Å. Το ένα από αυτά L_1 ήταν στα 10 mW και εξέπεμπε φυσικό φως (όχι πολωμένο) και το άλλο L_2 ήταν στα 20 mW και εξέπεμπε γραμμικά πολωμένο. Εδώ οφείλουμε να πούμε ότι το μήκος συμφωνίας των παραπάνω Laser He:Ne θα μπορούσαμε να το μετρήσουμε με την βοήθεια της συμβολομετρικής διάταξης Michelson που χρησιμοποιήσαμε για να ελέγξουμε την σταθερότητα της τράπεζας μας. Αυτό θα γινόταν μετακινώντας το κάτοπτρο K_1 προς τα δεξιά. Κατά την μετακίνηση θα παρατηρούσαμε στην εικόνα συμβολής ότι οι κροσσοί εξαφανίζονταν σιγά-σιγά, μέχρι την ξαναεμφάνιση τους. Η διαφορά μεταξύ των δυο θέσεων του K_1 θα ήταν ίση με το μισό μήκος συμφωνίας του Laser. Εμείς παρόλη την προσπάθεια δεν καταφέραμε να μετρήσουμε το μήκος συμφωνίας αλλά μέσα απο φυλλάδια γνωρίζουμε ότι το L_1 14 cm και το L_2 έχει 16cm.



6.4 Πολωτές

Γι' αυτό το λόγο και επειδή το φως που εκπέμπει το Laser He:Ne L_1 είναι φυσικό φως δηλαδή μη πολωμένο χρησιμοποιήσαμε δυο πολωτές τους Pasco Scientific HN-32, Π_1 και Π_2 . Όπου με τον Π_1 πολώναμε το φως και με τον Π_2 απλώς ελέγχουμε ποια πόλωση δίνουμε στο φως.

Χρήση ενός HN-32 πολωτή σημαίνει ότι αν προσπέσει σ' αυτόν Μη πολωμένο Φως με αρχική ένταση I_0 , τότε ο πολωτής HN-32 επιτρέπει την διέλευση μόνο το 32% του I_0 , με δεδομένο μήκος κύματος $\lambda = 6328 \text{ \AA}$.

Αν όμως προσπέσει Γραμμικώς πολωμένο φως με $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ του οποίου το επίπεδο ταλαντώσεως ταυτίζεται με τον άξονα πολώσεως του, τότε η διέλευση θα διπλασιαστεί στο 64% του I_0 .

6.5 Φακοί

Προκείμενου να επιτύχουμε ικανοποιητικό άνοιγμα στη δέσμη του laser ήταν αναγκαία η χρησιμοποίηση φακών οι οποίοι θα μας έδιναν το αποτέλεσμα που θέλαμε. Αρχική μας σκέψη ήταν η χρησιμοποίηση συγκεντρωτικών (convex) φακών μικρής εστιακής απόστασης της τάξης των mm οι οποίοι ανοίγουν αρκετά τη δέσμη. Παρόλο αυτά δεν μείναμε ικανοποιημένοι από το αποτέλεσμα των υπαρχόντων φακών και στραφήκαμε στη λύση των φακών μικροσκοπίου με απογοητευτικά αποτελέσματα όμως λόγω της καθαρότητας της μεγεθυσμένης δέσμης. Τέλος για καλύτερη μεγέθυνση της δέσμης σε αρκετές περιπτώσεις επικαλεστήκαμε συστήματα συγκεντρωτικών φακών εστιακής απόστασης 18 mm. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε τους εξής φακούς :



Τύπος Φακού	Συμβολισμός	Εστιακή Απόσταση
Συγκεντρωτικός	Φ_1	$f_1=13,0 \text{ mm}$
Συγκεντρωτικός	Φ_2	$f_2=14,9 \text{ mm}$
Συγκεντρωτικός	Φ_3	$f_3=19,7 \text{ mm}$
4 Συγκεντρωτικούς	Φ_4	$f_4=18,0 \text{ mm}$
Φακός Μικροσκοπίου	Φ_5	20 X

6.6 Διαχωριστές Δέσμης (Beamsplitters)

Κατά την διάρκεια της παρασκευής των ολογραμμάτων χρησιμοποιήσαμε διαχωριστές δέσμης προκειμένου να αναβαθμίσουμε την ποιότητα τους. Οι διαχωριστές δέσμης είναι καθρέπτες οι οποίοι ανακλούν ένα μέρος της προσπίπτουσας δέσμης, απορροφούν ελάχιστο της, και επιτρέπουν την διέλευση της υπόλοιπης. Ο διαχωριστής δέσμης B_1 που χρησιμοποιήσαμε ήταν ο LAMBDA PHYSICS (Laser Technik) R 25% 355/532 NM 45 GR MIRROR TYPE. Τον διαχωριστή τον χειριστήκαμε σαν 50 / 50 δηλαδή διαχωρίζαμε την δέσμη με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν και οι δυο την ίδια ένταση.

6.7 Κάτοπτρα

Όπως είναι φυσικό την δέσμη του Laser εκτός από την μεγέθυνση και τον διαχωρισμό της, χρειάστηκε να την αλλάξουμε πορεία και να την κατευθύνουμε σε κάποια συγκεκριμένα σημεία της οπτικής μας τράπεζας. Για να το καταφέρουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε κάτοπτρα μπροστινής ανάκλασης (front surface mirror). Τα κάτοπτρα μπροστινής ανάκλασης είναι επαργυρωμένα κάτοπτρα από την πλευρά που προσπίπτει το φως. Έτσι το



φως πρόσπίπτει στην επιφάνεια και ανακλάται χωρίς να έχουμε δεύτερη ανακλώμενη δέσμη από την πίσω επιφάνεια του κατόπτρου. Τα κάτοπτρα που χρησιμοποιήσαμε είναι τα εξής :

Τύπος Κατόπτρου	Συμβολισμός	Διαστάσεις
ΔΙΣΚΟΣ	K_1	$\delta = 5 \text{ cm}$
ΔΙΣΚΟΣ	K_2	$\delta = 4 \text{ cm}$
ΟΡΘΟΓΩΝΙΟ	K_3	$\alpha = 5 \text{ cm} \ \& \ \beta = 4 \text{ cm}$

6.8 Φωτόμετρο

Το φωτόμετρο ήταν χρήσιμο στα πειράματα μας αφού χάρη σ' αυτό μετρούσαμε με ακρίβεια τις εντάσεις των ακτίνων και καταφέραμε να πετύχουμε τις επιθυμητές αναλογίες εντάσεων. Το φωτόμετρο που χρησιμοποιήσαμε ήταν της INTERNATIONAL LIGHT Model 1400A το οποίο συνοδευόταν από την κεφαλή Silicon Photodiode SEL 100/K15 η οποία έχει φωτοευαίσθητη επιφάνεια 1 cm^2 . Ο συνδυασμός του παραπάνω φωτόμετρου με την κεφαλή έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε μετρήσεις σε ένα από 250 nm έως 1100 nm και οι ενδείξεις που έχουμε να είναι στην περιοχή $1,89 \cdot 10^{-10} \text{ W/cm}^2$ έως $6,6 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2$.

6.9 Φίλτρα

Μετά τον διαχωρισμό της αρχικής δέσμης και την κατεύθυνση της, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της διάταξης του πειράματος, το μόνο που απέμενε ήταν να πετύχουμε τον κατάλληλο λόγο των εντάσεων των δυο ακτίνων. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήσαμε τα φίλτρα αποκοπής εντάσεως 5215-M New Focus.



6.10 Βάσεις

Για να πετύχουμε την ευθυγράμμιση αλλά και το επιθυμητό ύψος ως προς την οπτική μας τράπεζα και να τοποθετήσουμε τα αντικείμενα μας στο κέντρο της ακτίνας του Laser χρησιμοποιήσαμε αρκετές ξύλινες βάσεις, ποικίλων διαστάσεων

Συμβολισμός	Χρήση Βάσης	Διαστάσεις
Ξ1	Φιλμ	14cm x 8cm
Ξ2	Laser	31cm x 15cm
Ξ3	Αντικείμενα	22cm x 22cm x 30cm

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων μας χρειαζόμασταν μια κατασκευή η οποία θα μας έδινε την δυνατότητα να σταθεροποιήσουμε το φιλμ , κάθετα ή υπό γωνία, σε μια θέση πάνω στην οπτική τράπεζα. Το Plateholder όπως ονομάζεται αυτή η κατασκευή έχει το σχήμα ενός ανάποδου Π με την διαφορά ότι εσωτερικά έχει μια χαραγή στην οποία τοποθετούμε το φιλμ υπό την μορφή σάντουιτς ανάμεσα σε δυο γυαλιά.

6.11 Αντικείμενα

Αν και θεωρητικά όλα τα αντικείμενα είναι κατάλληλα για την δημιουργία ολογράμματος εμείς στις διατάξεις μας χρησιμοποιήσαμε τα παρακάτω:

A1	Πιόνι
A2	Άλογο
A3	Ακρόπολη

Αυτό που προσέξαμε στα αντικείμενα μας ήταν να είναι ματ αλλά με μεγάλη ανακλαστικότητα και να έχουν επιφάνεια με λεπτομέρειες ώστε να είναι ενδιαφέρον η μελέτη τους κατά την αναπαραγωγή των ολογραμμάτων τους.



6.12 Φιλμ

Τα υλικά που είναι κατάλληλα για ολογράμματα, ανήκουν στην ομάδα των αλογονιδίων αργύρου ασθενώς φωτοευαίσθητων γαλακτωμάτων, όπως οι περισσότερες φωτογραφικές πλάκες, και είναι απλά στο χειρισμό και στην επεξεργασία τους. Η σημαντική διαφορά μεταξύ των ολογραφικών και φωτογραφικών υλικών έγκειται στην ανάλυση, που εκφράζεται συνήθως σε γραμμές ανά χιλιοστό. Εκτιμώντας ότι οι φωτογραφικές πλάκες δεν μπορούν συνήθως να έχουν περισσότερες από 50-100 γραμμές/χιλιοστό, και γνωρίζοντας ότι χρειαζόμαστε αναλύσεις 1500-3000 γραμμών/χιλιοστό ή και περισσότερο για τις ολογραφικές εφαρμογές, εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε τον λόγο για τον οποίο είναι καλύτερα να ξεχάσουμε τα φωτογραφικά φιλμ για την παραγωγή ολογραμμάτων.

Τα παραπάνω γαλακτώματα είναι διαθέσιμα και σε πλάκες γυαλιού και σε φιλμ. Το γυαλί προτιμάται για τις περισσότερες εφαρμογές και ειδικά στην ολογραφία αντανάκλασης και είναι καταλληλότερο για τους αρχάριους λόγω της ακαμψίας του.

Η ευαισθησία των φωτογραφικών φιλμ εκφράζεται σε αριθμούς ASA. Αντίθετα τα ολογραφικά υλικά είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητα από τα συνηθισμένα φιλμ (100 ASA), τόσο που οι αριθμοί ASA τους θα ήταν μικροί αριθμοί. Οι ευαισθησίες τους εκφράζονται συνήθως σε εκατοστά ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$).

Η χρήση φιλμ για την δημιουργία ολογράμματος είναι γενικά λίγο δυσκολότερη από την χρησιμοποίηση πλάκας γυαλιού, λόγω της δυσκολίας να κρατηθεί τελείως ακίνητο και απολύτως άκαμπτο κατά την διάρκεια της έκθεσης του στην δέσμη του Laser. Γενικά, το φιλμ είναι πρακτικό μόνο για ολογράμματα διαπερατότητας. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του φιλμ είναι το

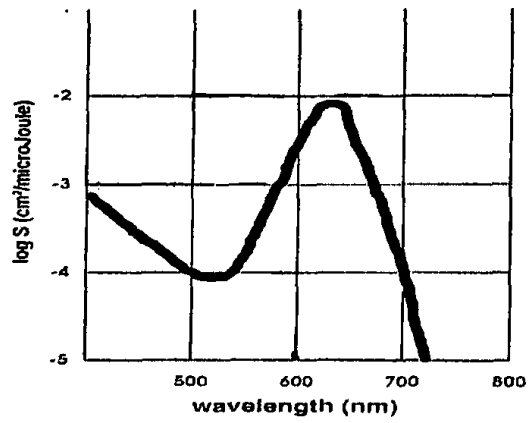


χαμηλότερο κόστος του, σε σύγκριση με το γυαλί, που σημαίνει ότι προτιμάται για τον πειραματισμό (εκθέσεις δοκιμής, τεχνική ανάπτυξης).

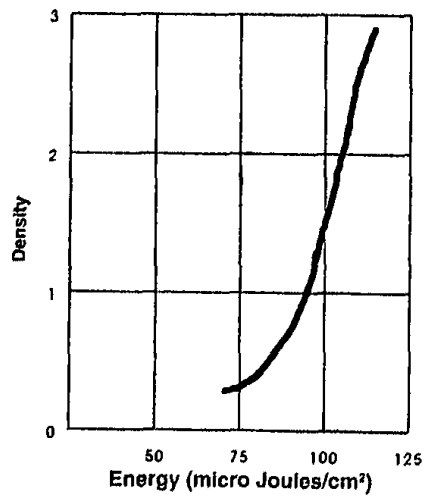
Υπάρχουν πολλές εταιρίες οι οποίες κατασκευάζουν ολογραφικά υλικά σε μορφή φιλμ ή σε πλάκες γυαλιού όπως οι Kodak, Agfa και Slavich. Εμείς κατά την διάρκεια των πειραμάτων μας χρησιμοποιήσαμε το φωτοευαίσθητο φιλμ PFG-01 της Slavich. Το PFG-01 είναι ένα λεπτόκοκκο φιλμ, ευαίσθητο στις κόκκινες περιοχές, σχεδιασμένο για την καταγραφή ολογραμμάτων διαπερατότητας ή ανάκλασης. Το μέσο μέγεθος του κόκκου του είναι 40nm, η ανάλυση του μεγαλύτερη από 3000 γραμμές/χιλιοστό ενώ το εύρος της φασματικής του ευαισθησίας κυμαίνεται από τα 600nm ως τα 680nm (συμπεριλαμβανομένων των 633nm και 647nm).

Η χαρακτηριστική καμπύλη για το PFG-01, που παρουσιάζει την φασματική ευαισθησία σε σχέση με το μήκος κύματος, παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1. Η ευαισθησία στο φως για το PFG-01 φαίνεται να κορυφώνεται στα 100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ περίπου για το μήκος κύματος των 640nm. Το σχήμα 6.2 παρουσιάζει την οπτική πυκνότητα, μετά από έκθεση σε ακτινοβολία και την εμφάνιση του, ως προς την ενέργεια.





Σχήμα 6.1: Φασματική Ευαισθησία ως προς το Μήκος Κύματος



Σχήμα 6.2: Οπτική Πυκνότητα σε συνάρτηση με την έκθεση



6.13 Χημικά

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός χημικών που κυκλοφορούν στο εμπόριο, για την εμφάνιση των ολογραμμάτων. Τα βασικά χημικά που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια των πειραμάτων μας ήταν τρία. Ο Εμφανιστής (Developer), ο Λευκαντής (Bleach) και το Αgeron που ανήκει στην κατηγορία των Photo Flo χημικών.

Ο Εμφανιστής αποτυπώνει και εμφανίζει πάνω στο φιλμ τους κροσσούς συμβολής ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης του φιλμ στην κόκκινη ακτίνα του Laser. Ο Λευκαντής στερεώνει το φιλμ, δηλαδή το κάνει μη φωτοευαίσθητο, και ταυτόχρονα το ξεπλένει από τις μαυρίλες που δημιουργήθηκαν από τον Εμφανιστή. Τέλος το Αgeron το χρησιμοποιούσαμε μετά το τελικό πλύσιμο των φιλμ για γρηγορότερο στέγνωμα αλλά και για την απομάκρυνση των αλάτων του νερού.

Η σύσταση των μιγμάτων που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια των πειραμάτων μας είναι :

ΕΜΦΑΝΙΣΤΗΣ (DEVELOPER) (Για διάλυμα 1000 ml)

Metol	5 gr
Ascorbic Acid	40 gr
Solidium Carbonate Anhydrous	60 gr
Solidium Hydroxide	7 gr
Potassium Bromide	2 gr

ΛΕΥΚΑΝΤΗΣ (BLEACH) (Για διάλυμα 1000 ml)

EDTA (2Na)	30 gr
Fe (III) Sulfate	30 gr
Potassium Bromide	30 gr
Sodium Hydrogen Sulfate Crystals	30 gr



7 ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΕΛΕΥΣΕΩΣ

A. Απλή Ολογραφική Τεχνική

7.1 Βασική Πειραματική Διάταξη

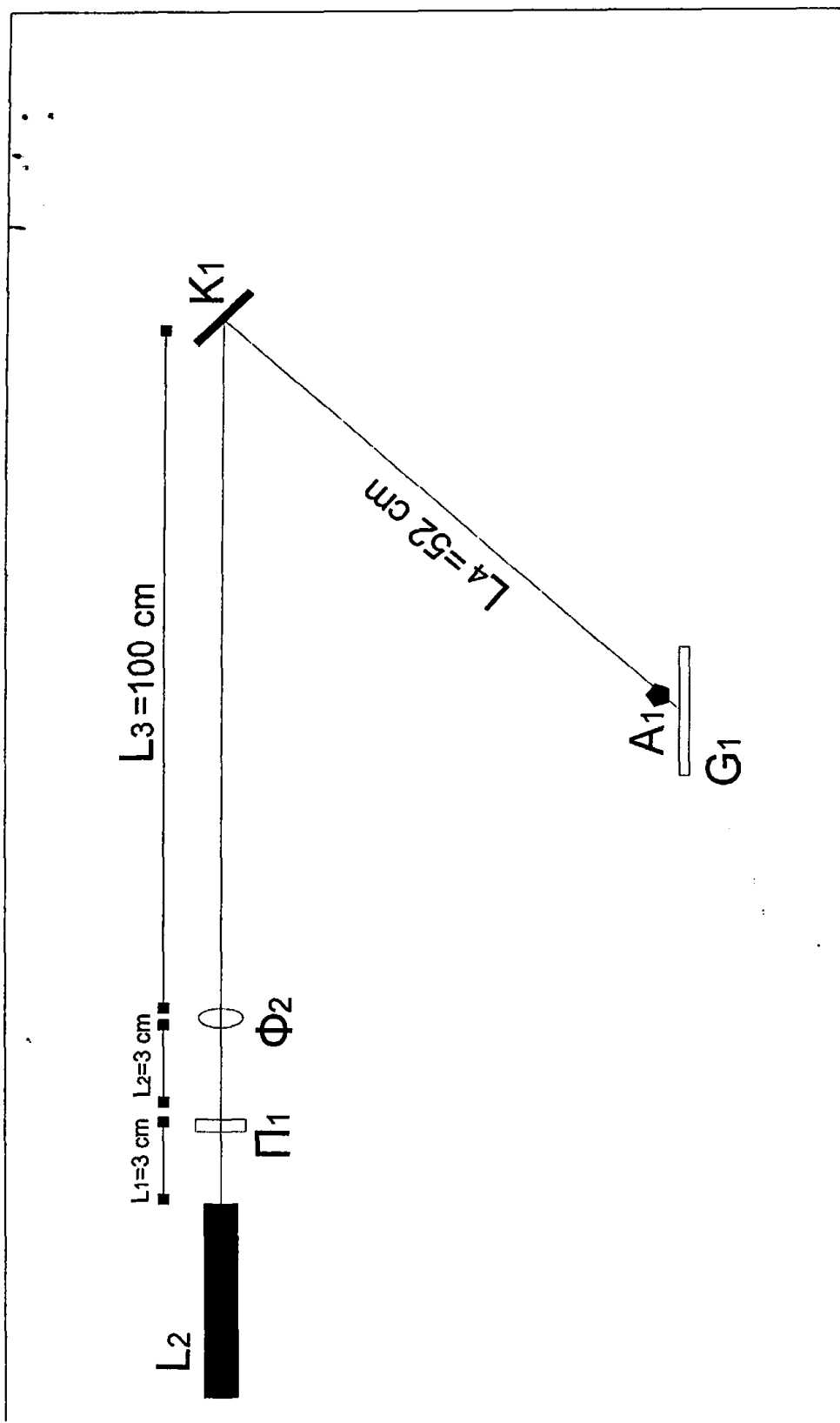
7.1.1 Εξοπλισμός

Η βασική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε, περιείχε τον παρακάτω εξοπλισμό :

- το laser L_1 He:Ne των 20 mW το οποίο αποτελεί την σημειακή μονοχρωματική πηγή συνεχούς φωτός για το πείραμα
- τον αμφίκυρτο φακό Φ_2 με εστιακή απόσταση $f_2 = 14,9$ mm
- το set G_1 των δυο διαφανων γυαλιών τετραγωνικής δομής, ακμής $a_1 = 10$ cm, όπου στο εσωτερικό τους τοποθετήσαμε το φιλμ αποτυπώσεως του ολογράμματος
- τον πολωτή Π_1 HN-32
- το κάτοπτρο K_1 διαμέτρου $\delta_1 = 6$ cm
- την ξύλινη βάση Ξ_2 με την ειδική κοιλότητα στην οποία τοποθετούμε το laser και την ξύλινη προθήκη Ξ_1 για την τοποθέτηση των διαφανων γυαλιών
- το λευκό μη ανακλαστικό μικρών διαστάσεων αντικείμενο A_1 πiónι του σκακιού.

Σχηματική απεικόνιση της παραπάνω πειραματικής διατάξεως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:





ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΣ 7.1



Τοποθετήσαμε το laser L_2 He:Ne των 20 mW στην ξύλινη θήκη Ξ_2 στο εσωτερικό της ειδικής κοιλότητας προκειμένου να εξασφαλίσουμε με αυτόν τον τρόπο την όσο το δυνατόν καλύτερη σταθεροποίηση του. Η όλη διάταξη βρίσκεται φυσικά πάνω στην τράπεζα η οποία πρωτίτερα και όπως έχουμε αναφέρει και στην θεωρία πληρεί τις προϋποθέσεις για την διεκπεραίωση των πειραμάτων που θέλουμε να κατασκευάσουμε.

Σε απόσταση $l_1=3\text{cm}$ από το laser βάλουμε τον πολωτή Π_1 προκειμένου με αυτόν τον τρόπο όχι να πολώσουμε την δέσμη μας, άλλωστε γνωρίζουμε ότι το συγκεκριμένο laser εκπέμπει πολωμένη δέσμη, αλλά να μειώσουμε την ένταση της δέσμης καθώς για την κατασκευή των ολογραμμάτων μας θεωρήθηκε αρκετά ισχυρή και σε αυτήν την περίπτωση δεν θα είχαμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια και σε απόσταση $l_2=3\text{cm}$ τοποθετήσαμε τον συγκεντρωτικό φακό Φ_2 ο οποίος «άνοιγε» την δέσμη του laser καθώς ήταν αναγκαίο η ερυθρή ακτινοβολία να φωτίζει όλο το αντικείμενο αλλά και να είχε την δυνατότητα να φωτίζει και αρκετά μεγάλο μέρος από την επιφάνεια του φιλμ. Στην πορεία της δέσμης και πριν φτάσει αυτή στο αντικείμενο τοποθετήσαμε σε απόσταση $l_3=100\text{cm}$ το κάτοπτρο K_1 όπου ανακλώταν η δέσμη και έπειτα οδηγιόταν στο σημείο όπου τοποθετήσαμε το αντικείμενο. Η παρουσία του κάτοπτρου στην πορεία της δέσμης είχε και ένα ακόμα σημαντικό λόγο να υπάρχει. Πιο συγκεκριμένα όπως έχουμε ήδη αναλύσει και από την θεωρία το laser εκπέμπει την ερυθρή ακτινοβολία με τέτοιο τρόπο ώστε η κατανομή της εντάσεως της αποτυπώνεται με την βοήθεια μιας Gaussian καμπύλης. Αυτό που εκμεταλλευτήκαμε με το κάτοπτρο ήταν ότι είχαμε την ανάκλαση όσο το δυνατόν της περιοχής της εντάσεως που εσωκλείεται στην κορυφή της Gaussian καμπύλης γεγονός που μας έδινε



πολύ καλύτερα αποτελέσματα κατά την αποτύπωση του αντικειμένου στο φιλμ.

Τέλος και σε απόσταση $l_4=52\text{cm}$ από το κάτοπτρο στερεώσαμε το πiónι που αποτέλεσε και το αντικείμενο για την πειραματική μας διάταξη. Ακριβώς από πίσω από το πiónι και σε απόσταση πολύ κοντά από αυτό έπρεπε να τοποθετήσουμε την ειδική ξύλινη προθήκη Ξ_1 όπου και θα στερεώναμε στο εσωτερικό της τα γυάλινα στηρίγματα του φιλμ αποτυπώσεως. Κάτι τέτοιο όμως δεν αποτελούσε μια εύκολη υπόθεση καθώς από τη στιγμή που η απλή αυτή βασική πειραματική διάταξη στερούταν την παρουσία διαχωριστή δέσμης, η μια και μοναδική μας δέσμη έπρεπε να «παίξει» το ρόλο τόσο της δέσμης αναφοράς όσο και της δέσμης του αντικειμένου. Επομένως, χρειάστηκε να τοποθετήσουμε τα γυάλινα στηρίγματα στο εσωτερικό της προθήκης και με πολύ προσεκτικές μετατοπίσεις τόσο του αντικειμένου όσο και της προθήκης να επιτύχουμε τόσο το αντικείμενο να εσωκλείεται εξολοκλήρου στον ερυθρό δίσκο ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή ανάκλαση από αυτό, όσο και τα γυάλινα πλακίδια να καλύπτονται συνολικά από την ίδια δέσμη. Αυτό από μόνο του απαντούσε στο ότι αντικείμενο και φιλμ και σε αυτήν τη βασική πειραματική διάταξη ήταν παρά πολύ κοντά μεταξύ τους.

Στη συνέχεια με την βοήθεια ενός μαύρου χαρτονιού τοποθετημένο ακριβώς μπροστά από την κοιλότητα του laser, απομονώσαμε την δέσμη από την υπόλοιπη διάταξη. Κλείσαμε ερμητικά το σκοτεινό θάλαμο με την μαύρη κουρτίνα και ανάψαμε τον επικαλυμμένο με πράσινη ζελατίνα λαμπτήρα. Με ιδιαίτερη προσοχή βάλουμε ένα κομμάτι από το φιλμ αποτυπώσεως που διαθέταμε στο εσωτερικό των δυο γυάλινων πλακιδίων και το στερεώσαμε με ειδικά πλαστικά στηρίγματα. Έπειτα τοποθετήσαμε τα δυο γυαλιά και το φιλμ ακριβώς πίσω από το λευκό αντικείμενο σε θέση



τέτοια ώστε τα γυαλιά να σχηματίζουν γωνία $\theta = 90^\circ$ με το οριζόντιο επίπεδο . Είναι αναγκαίο να τονίσουμε εδώ ότι στα ολογράμματα διελεύσεως δεν ήταν αναγκαίο η φωτοευαίσθητη επιφάνεια του φιλμ να βρίσκεται από την πλευρά του αντικειμένου. Παρόλο αυτά εμείς, όπως και στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή των ολογραμμάτων ανακλάσεως, εξακολουθήσαμε να τοποθετούμε την φωτοευαίσθητη επιφάνεια του φιλμ από την πλευρά του αντικειμένου.

7.1.2 Πειραματική Διαδικασία

Ήταν απαραίτητο να προσδιορίσουμε τον χρόνο εκθέσεως του αντικειμένου στη ερυθρή ακτινοβολία καθόσον σε υπερβολική του έκθεση σε αυτήν , δεν θα παίρναμε εικόνα του αντικειμένου στο φιλμ και στην ολογραφική ωρολόγια θα λέγαμε ότι "κάηκε". Αλλά και σε αντίθετη περίπτωση όταν το αντικείμενο δεν είχε εκτεθεί αρκετά στην δέσμη δεν θα παρουσιαζόταν πάνω στο φιλμ κατά την εμφάνιση του. Επομένως , γνωρίζαμε εξ αρχής ότι οι πρώτες προσπάθειες μας ήταν αναγνωριστικές, κυρίως στο να προσδιορίσουμε τους χρόνους που προαναφέραμε.

Είναι αναγκαίο να τονίσουμε βέβαια σε αυτό το σημείο ότι επειδή τα συγκεκριμένα πειράματα ήταν η συνέχεια πειραμάτων για την κατασκευή ολογραμμάτων ανακλάσεως είχαμε μια εικόνα για το ποιοι περίπου ήταν οι χρόνοι που απαντούσαν στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε τους χρόνους που εκθέσαμε το πόνι κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας:



ΠΙΟΝΙ ΣΚΑΚΙΟΥ			
ΧΡΟΝΟΣ (sec)	30	45	60
ΠΟΙΟΤΗΤΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ

Επειδή γνωρίζαμε εξ αρχής ότι τυχόν δονήσεις επηρέαζαν την σταθερότητα της διάταξης ήμασταν πάρα πολύ προσεκτικοί κατά την διάρκεια της εκθέσεως του αντικειμένου στο φιλμ. Πιο αναλυτικά, και μετά την τοποθέτηση του φιλμ στο εσωτερικό των δυο γυαλιών, παραμέναμε σταθεροί σε προκαθορισμένες θέσεις για περίπου 2 με 3 λεπτά έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε όσο το δυνατόν την "ηρεμία" στην διάταξη. Έπειτα ταυτόχρονα με την έναρξη του χρόνου στο ψηφιακό χρονόμετρο, αφαιρούσαμε το μαύρο χαρτόνι και το επανατοποθετούσαμε μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος που είχαμε προεπιλέξει ό,τι θα εκθέταμε το φιλμ. Συνολικά η όλη διαδικασία επαναλήφθηκε για όλους τους χρόνους που αναφέρθηκαν στους παραπάνω πίνακες.

7.1.3 Εμφάνιση Του Φιλμ

Μέσα στο σκοτεινό θάλαμο, σε πλαϊνή τράπεζα, είχαμε τοποθετήσει τρία δοχεία στα οποία είχαμε βάλει μέσα το Developer, το νερό και το Bleach (η σύσταση καθώς και η λειτουργία των συγκεκριμένων χημικών κατά την διάρκεια της αποτυπώσεως του φιλμ έχει ήδη αναφερθεί). Αρχικά τοποθετήσαμε το φιλμ στο Developer όπου μέσα εκεί έπρεπε να παραμείνει 4 με 5 λεπτά . Κατά την διάρκεια του "μαυρίσματος" του ελέγχαμε διαρκώς την οπτική πυκνότητα του φιλμ. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα δηλαδή, με την βοήθεια μιας λαβίδας, βγάσαμε έξω από το Developer το φιλμ και προσπαθούσαμε να κοιτάξουμε μέσα από αυτό , τον επικαλυμμένο με



πράσινη ζελατίνα λαμπτήρα. Η συγκεκριμένη διαδικασία μας βοηθούσε να ξέρουμε προκαταβολικά αν στο φιλμ που προσπαθούσαμε να εμφανίσουμε είχαμε επιτύχει σωστό χρόνο. Αν το μαύρισμα ήταν παρά πολύ έντονο και δεν διακρίναμε τον λαμπτήρα τότε είχαμε κάψει το φιλμ. Σε αντίθετη περίπτωση αν δεν υπήρχε μαύρισμα και το φιλμ παρέμενε λευκό τότε δεν είχαμε καταφέρει να αποτυπώσουμε το αντικείμενο. Το ιδανικό, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις μας, ήταν να διακρίνουμε οριακά τον λαμπτήρα.

Στη συνέχεια τοποθετούσαμε το φιλμ στο μεσαίο δοχείο με το νερό και το ξεπλέναμε καλά. Ήταν αναγκαίο να απαλλάξουμε το φιλμ από το Developer που είχε επικαθίσει στην επιφάνεια του, καθώς οποιαδήποτε ανάμιξη του με το Bleach θα δημιουργούσε ανεπιθύμητες ενώσεις. Έπειτα από περίπου ένα λεπτό στο νερό, βυθίσαμε το φιλμ στο Bleach όπου και παρέμεινε μέσα εκεί για περίπου 15 λεπτά και αργά αλλά σταθερά άλλαζε χρώμα και από μαύρο γινόταν άσπρο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι δεν είναι αναγκαίο η διαδικασία του Bleaching να γίνεται στο σκοτεινό θάλαμο και μπορεί να γίνεται και σε εξωτερικό χώρο με παρουσία ορατού φωτός.

Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας, αφαιρούσαμε το φιλμ από το Bleach και το πλέναμε παρά πολύ καλά στον νιπτήρα που διέθετε το εργαστήριο περίπου 5 λεπτά. Έπειτα το τοποθετούσαμε σε ένα δοχείο όπου περιείχε ένα ειδικό υγρό, το Ageron, που βοηθούσε στον πλήρη καθαρισμό του φιλμ ακόμα και από τα άλατα που επικάθονταν στην επιφάνεια του από το νερό. Με ειδικά πλαστικά στηρίγματα στερεώναμε για 5 λεπτά περίπου τα φιλμ σε ένα σχοινί προκειμένου να στεγνώσουν με φυσικό τρόπο και έπειτα με την βοήθεια ενός νεσεσέρ ζεστού αέρα επιταχύναμε την διαδικασία αυτή.



7.1.4 Απεικόνιση Του Φιλμ

Στα ολογράμματα διελεύσεως αντιμετωπίζουμε μια ιδιαιτερότητα όταν έρχεται η στιγμή να δούμε το αποτέλεσμα των προσπαθειών μας. Και αυτό συνίσταται στο γεγονός ότι για να δούμε το πιόνι μέσα στο φιλμ πρέπει να γυρίσουμε στον σκοτεινό θάλαμο και να επανατοποθετήσουμε το φιλμ ακριβώς όπως και όταν το εκθέσαμε στην ερυθρή ακτινοβολία, αφαιρώντας το πιόνι βέβαια από την θέση του. Έπειτα αλλάζοντας εμείς συνεχώς την γωνία με την οποία κοιτάμε μέσα από το φιλμ και χωρίς να ρίχνουμε το βλέμμα μας απευθείας στην δέσμη προσπαθούμε να διακρίνουμε το πιόνι κάτι που είναι εύκολα παρατηρήσιμο και δεν κρύβει ιδιαίτερη δυσκολία. Αυτό ακριβώς και κάναμε και τα αποτελέσματα μας κρίθηκαν καλά, άλλωστε ήταν και τα πρώτα μας ολογράμματα αυτής της μορφής και υπήρχε έλλειψη συγκριτικών δεδομένων.

Ήταν όμως πολύ φυσιολογικό ότι πολύ γρήγορα εγκαταλείψαμε την απλή πειραματική διάταξη και στραφήκαμε στις τεχνικές παραγωγής ολογραμμάτων διάδοσης υπό την παρουσία διαχωριστή δέσμης. Άλλωστε από τη στιγμή που θα υπήρχε πια ο διαχωρισμός της δέσμης αναφοράς και αντικειμένου θα ήταν και πολύ καλύτερη η ποιότητα των ολογραμμάτων που θα κατασκευάζαμε.



B. Ανώτερη Ολογραφική Τεχνική Με Διαχωριστή Δέσμης

7.2 Βασική Πειραματική Διάταξη

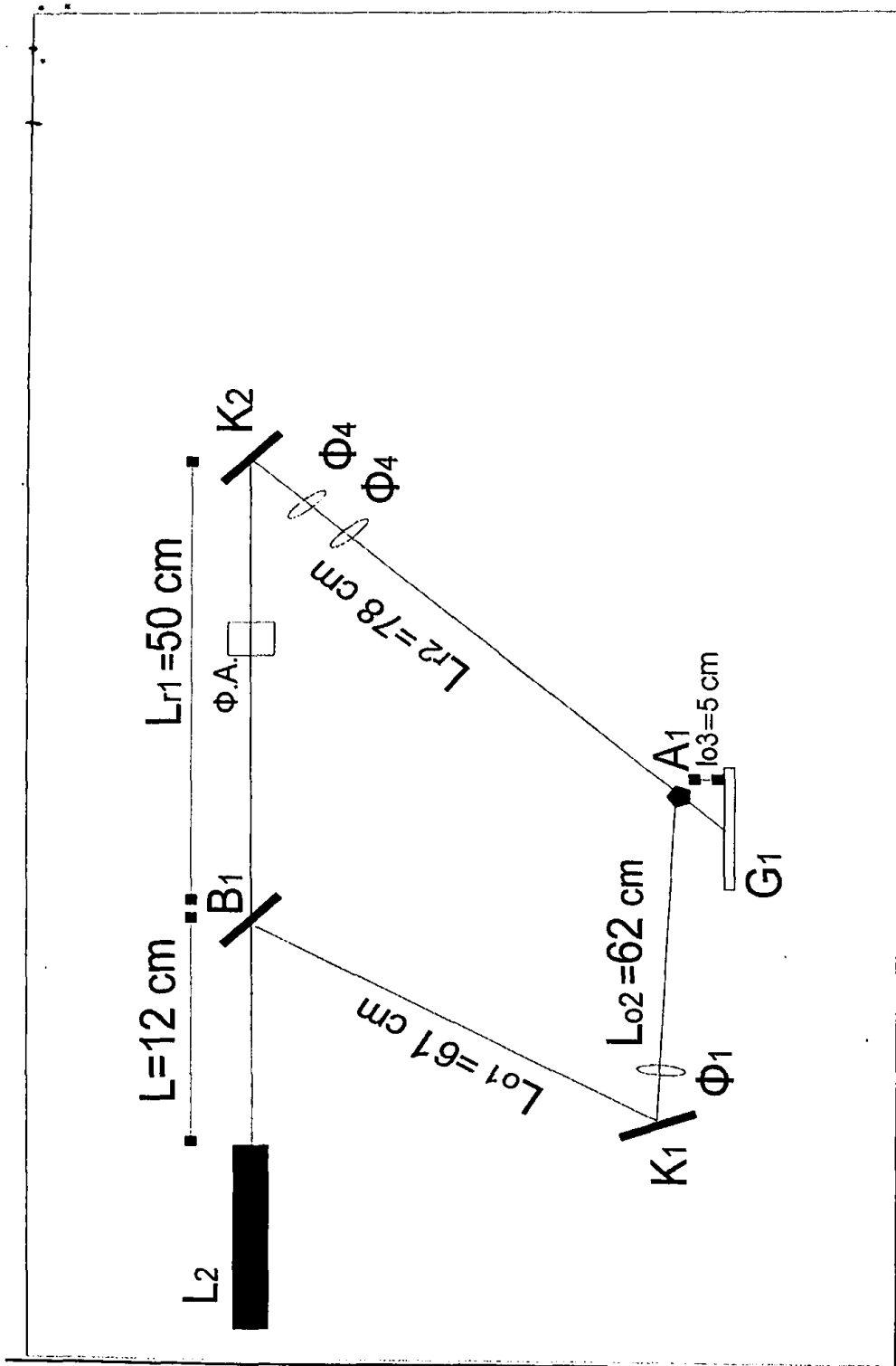
7.2.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός της ανώτερης πειραματικής διατάξεως για την παραγωγή ολογραμμάτων διελεύσεως δεν διαφέρει σημαντικά από την βασική πειραματική διάταξη. Πιο συγκεκριμένα τα οπτικά στοιχεία που χρειαστήκαμε ήταν τα εξής:

- το L_2 laser He:Ne των 20 mW το οποίο αποτελεί την σημειακή μονοχρωματική πηγή συνεχούς φωτός για το πείραμα
- το διαχωριστή δέσμης B_1 που διαχωρίζει την αρχική δέσμη σε δυο άλλες της ίδιας εντάσεως (50/50)
- τον αμφίκυρτο φακό Φ_1 με εστιακή απόσταση $f_1 = 13,0$ mm και τους δυο αμφίκυρτους φακούς Φ_4 με εστιακή απόσταση $f_4 = 18$ mm
- το K_1 κάτοπτρο διαμέτρου $\delta_1=5$ cm και το K_2 κάτοπτρο διαμέτρου $\delta_2=4$ cm τα οποία είναι εμπρόσθιας ανακλαστικότητας (front face mirror)
- τα φίλτρα σταθερής διαπερατότητας (αποκοπής εντάσεως)
- το set G_1 των δυο διάφανων γυαλιών τετραγωνικής δομής, ακμής $a_1 = 10$ cm, όπου στο εσωτερικό τους τοποθετήσαμε το φιλμ αποτυπώσεως του ολογράμματος
- την ξύλινη βάση Ξ_2 με την ειδική κοιλότητα στην οποία τοποθετούμε το laser και την ξύλινη προθήκη Ξ_1 για την τοποθέτηση των διάφανων γυαλιών
- το λευκό μη ανακλαστικό μικρών διαστάσεων αντικείμενο A_1 , το πιόνι του σκακιού.



Σχηματική απεικόνιση της παραπάνω πειραματικής διατάξεως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΣ 7.2



Αφαιρώντας συνολικά τα διάφορα οπτικά στοιχεία της προηγούμενης πειραματικής διατάξεως προχωρήσαμε στο στήσιμο της νέας μας πειραματικής προσπάθειας με δεδομένο ότι παρέμεινε πάνω στην τράπεζα το laser μέσα στην ξύλινη ειδική βάση. Σε απόσταση $l=12,0$ cm από το laser εγκαταστήσαμε το διαχωριστή δέσμης ο οποίος και όπως θα δούμε διαφοροποιεί σημαντικά την διάταξη μας καθώς η δέσμης μας διαχωρίζεται στη δέσμη αναφοράς και στη δέσμη αντικειμένου. Ο διαχωριστής δέσμης είναι τοποθετημένος σε τέτοια θέση ώστε να λειτουργεί ως 50/50 και επομένως οι δυο εντάσεις των δυο διαχωριζόμενων δεσμών είναι ίσες.

Στην πορεία της δέσμης αναφοράς και σε απόσταση $l_{a1}=50$ cm τοποθετήσαμε το κάτοπτρο K_2 όπου είχαμε την ανάκλαση της δέσμης και την καθοδήγηση της προς την περιοχή όπου και θα βρίσκονταν αργότερα το φιλμ μας. Πολύ κοντά στο κάτοπτρο βάλαμε τους δυο φακούς Φ_4 με εστιακή απόσταση $f_2=18,0$ mm, σε τέτοια θέση μεταξύ τους ώστε να λειτουργούν ως σύστημα φακών και οι οποίοι μεγέθυναν την δέσμη ικανοποιητικά. Τέλος σε απόσταση $l_{a2}=78$ cm από το κάτοπτρο στερεώσαμε την ειδική ξύλινη προθήκη Ξ_1 , όπου στο εσωτερικό της στερεώσαμε το G_1 set των τετραγωνικής ακμής γυάλινων πλακιδίων. Μέσα σε αυτά θα εισάγαμε αργότερα το φιλμ αποτυπώσεως.

Στη συνέχεια στραφήκαμε στην δέσμη του αντικειμένου και σε απόσταση $l_{o1}=61$ cm τοποθετήσαμε το κάτοπτρο K_1 . Η ανακλώμενη δέσμη στην εμπρόσθια επιφάνεια του κατόπτρου, μεγεθύνονταν από τον φακό Φ_1 με εστιακή απόσταση $f_1=13$ mm, που ήταν τοποθετημένος πολύ κοντά στο κάτοπτρο και δημιουργούσε ένα οπτικό δίσκο, που περιελάμβανε όλο το αντικείμενο στο εσωτερικό του. Το αντικείμενο βρισκόταν σε απόσταση $l_{o2}=62$ cm από το κάτοπτρο K_1 και ήταν στερεωμένο σε τέτοια θέση ώστε να απέχει από το φιλμ απόσταση $l_{o3}=5$ cm. Είναι αναγκαίο να τονίσουμε εδώ ότι



η θέση του αντικειμένου ήταν μπροστά από το φιλμ αποτυπώσεως και σε ίδιο επίπεδο με τα δυο κάτοπτρα. Άλλωστε αυτή είναι η σημαντική διαφορά των ολογραμμάτων διελεύσεως από τα ολογράμματα ανακλάσεως. Ήταν πασιφανές, επίσης, ότι επιδιώξαμε, οι δυο οπτικοί δρόμοι να είναι ίσοι, προκειμένου να έχουμε την καλύτερη δυνατή συμφωνία του φωτός στην επιφάνεια του φιλμ ($I_{obj} = I_{ref} = 128,0 \text{ cm}$).

Επειδή το αντικείμενο βρισκόταν μπροστά από το φιλμ είχαμε επίσης να αντιμετωπίσουμε την αντικειμενική δυσκολία να διασταυρώνονται η δέσμη της αναφοράς με τη δέσμη του αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα η δέσμη του αντικειμένου «έπεφτε» μερικώς πάνω στο φιλμ, αλλά και η δέσμη αναφοράς «φώτιζε» πολύ ελάχιστα το αντικείμενο γεγονός που δεν επιθυμούσαμε. Ακριβώς για αυτό με τη βοήθεια μαύρων χαρτονιών αποκόπταμε εκείνο το μέρος της φωτεινής ακτινοβολίας το οποίο δημιουργούσε προβλήματα στην πειραματική μας διαδικασία.

7.2.2 Πειραματική Διαδικασία

Όπως έχουμε ήδη αναφερθεί στην θεωρία των ολογραμμάτων διελεύσεως, είναι απαραίτητο, προκειμένου να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, οι εντάσεις των δυο δεσμών να μην είναι ίδιες. Πιο συγκεκριμένα πρέπει ο λόγος της εντάσεως της δέσμης αναφοράς προς την ένταση της δέσμης αντικειμένου να είναι ίσος με δύο ($I_{ref} / I_{obj} = 4$). Ήταν επομένως λογικό να χρειαστεί να μετρήσουμε, με την βοήθεια του ψηφιακού φωτομέτρου που είχαμε, τις εντάσεις των δυο δεσμών στο σημείο στο οποίο είχαμε τοποθετήσει το φιλμ αποτυπώσεως προκειμένου να εξασφαλίσουμε με κατάλληλες τεχνικές τον παραπάνω λόγο.

Η διαδικασία μέτρησης των εντάσεων δεν ήταν απλή και έπαιρνε αρκετό χρόνο, προκειμένου να αποτελέσματα μας να θεωρούνται αξιόπιστα.



Αυτό οφειλόταν κυρίως στο ότι οι ενδείξεις που απεικονίζονταν στην οθόνη του φωτόμετρου ήταν ιδιαίτερα ακριβής και σύναμμα με απειροελάχιστες μετατόπισης της κεφαλής του, αυτές άλλαζαν σημαντικά μην μπορώντας να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την πραγματική ένταση της δέσμης. Μέσα επομένως από όλες αυτές τις αντικειμενικές δυσκολίες που είχαμε, οδηγηθήκαμε στην απόφαση να πραγματοποιούμε μετρήσεις ιδιαίτερα σχολαστικές παίρνοντας υπ' όψιν και την παραμικρή παράμετρο που ενδεχομένως θα μας κατεύθυνε σε λανθασμένα πειραματικά δεδομένα.

Πρωταρχικός μας σκοπός ήταν να μην υπάρχει άλλη φωτεινή πηγή στο εσωτερικό του θαλάμου και αναφερόμαστε στο επικαλυμμένο λαμπτήρα ο οποίος κατά την διάρκεια των μετρήσεων παρέμεινε κλειστός. Έπειτα, με την βοήθεια ενός μαύρου χαρτονιού, αποκόπταμε την ερυθρή ακτινοβολία από την συνολική διάταξη και πραγματοποιούσαμε το λεγόμενο zeroing δηλαδή τον μηδενισμό των ενδείξεων στην οθόνη του φωτόμετρου. Αφαιρούσαμε τα γυαλιά μέσα από την προθήκη και στη θέση τους τοποθετούσαμε την κεφαλή του φωτόμετρου. Πάντοτε η πρώτη μας μέτρηση αφορούσε την δέσμη του αντικειμένου καθώς με γνώμονα αυτήν την ένταση καθορίζαμε με διάφορες τεχνικές που θα αναφέρουμε παρακάτω τον απαραίτητο λόγο που προαναφέραμε. Αυτό γινόταν καθώς χρησιμοποιήσαμε για την πειραματική διαδικασία τρία διαφορετικά αντικείμενα όπου το καθένα ανακλούσε με διαφορετικό τρόπο την ακτινοβολία με αποτέλεσμα να άλλαζε σημαντικά από αντικείμενο σε αντικείμενο η ένταση της δέσμης.

Στην συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιήσαμε το πiónι και μετρήσαμε $I_{obj}=1,25 \mu\text{Watt} / \text{cm}^2$. Όπως ήταν φυσιολογικό η ένταση της δέσμης αναφοράς ήταν αρκετά μεγαλύτερη και αναγκαστήκαμε προκειμένου να επιτύχουμε τον απαιτούμενο λόγο, να εισάγουμε στην πορεία της, τα φίλτρα



αποκοπής εντάσεως με άμεσο στόχο την μείωση αυτής της εντάσεως. Με ιδιαίτερη σχολαστικότητα επιτύχαμε να μετρήσουμε ένταση αναφοράς $I_{ref} = 5,2 \mu\text{Watt} / \text{cm}^2$ ολοκληρώνοντας έτσι την πειραματική προετοιμασία τοποθετώντας τα γυάλινα πλακίδια στη θέση τους.

Όπως ήταν φυσιολογικό η προσοχή μας εστιάστηκε στο κατά πόσο οι χρόνοι εκθέσεως του αντικειμένου για την καλύτερη απεικόνιση του πάνω στο φιλμ, θα πλησίαζαν τους χρόνους εκθέσεων στις προηγούμενες πειραματικές διατάξεις. Ήταν άλλωστε κοινή μας πεποίθηση ότι κάτι τέτοιο θα αποτελούσε και το μοναδικό πια εμπόδιο μας πριν από τη κατασκευή του πρώτου μας ολογράμματος με διαχωριστή δέσμης. Οι χρόνοι αυτοί απάντησαν σε μεγέθη, διπλάσια των προηγούμενων και σχετικός πίνακα αυτών των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται αμέσως μετά:

ΠΙΟΝΙ ΣΚΑΚΙΟΥ							
ΧΡΟΝΟΣ (sec)	45	50	60	65	70	80	90
ΠΟΙΟΤΗΤΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ

Η ποιότητα των συγκεκριμένων ολογραμμάτων μετά την εμφάνιση τους ήταν όπως ήταν αναμενόμενο καλύτερη από τα προηγούμενα ολογράμματα. Ήταν αποτυπωμένο ευκρινέστερα το αντικείμενο και πιο ρεαλιστικό ως προς το μέγεθος του και τις διαστάσεις του.

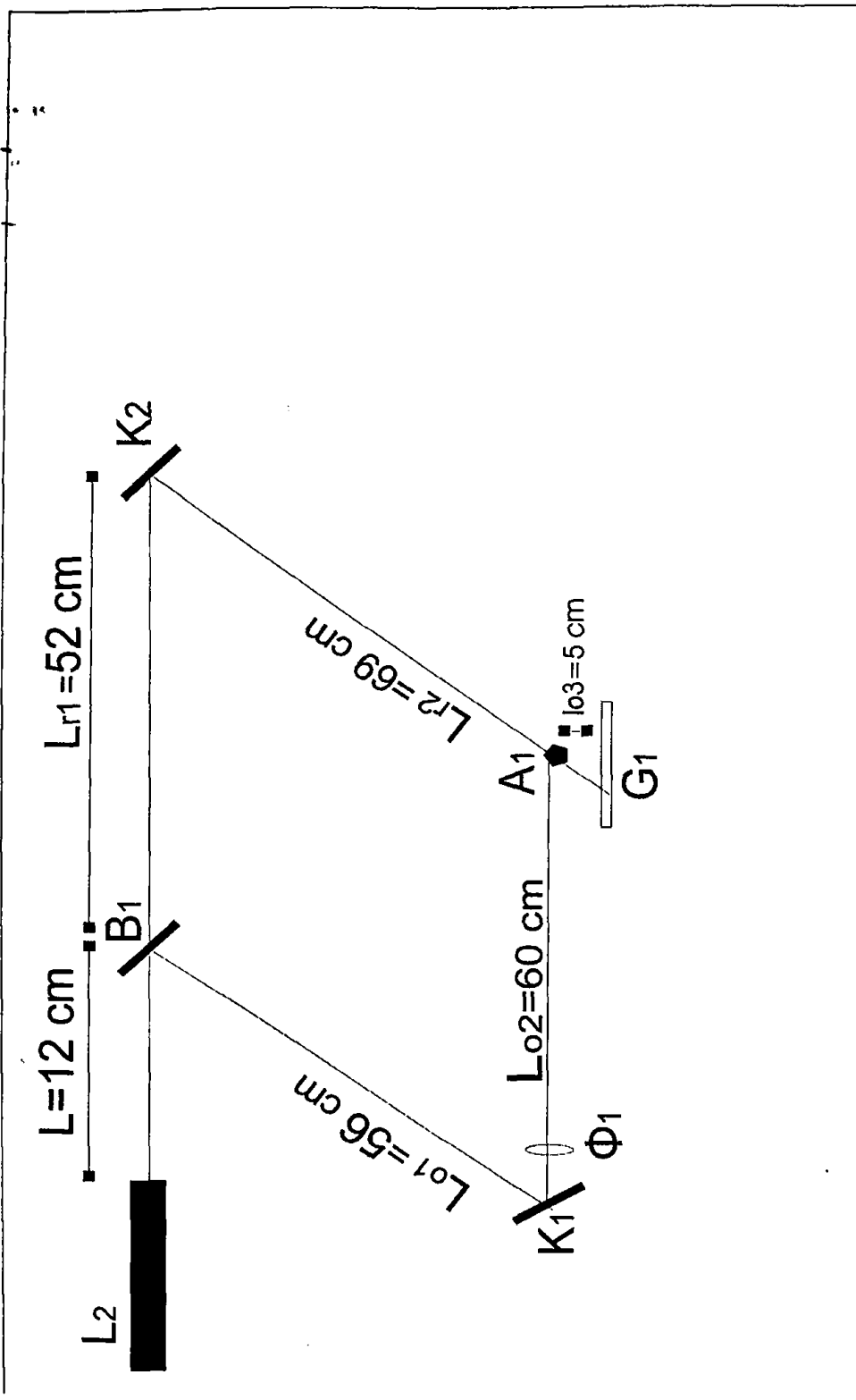


7.3 Βασική Πειραματική Διάταξη Με Τον Διαχωριστή Δέσμης Να Διαφοροποιεί Τις Εντάσεις Αναφοράς Και Αντικειμένου

7.3.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός της παρούσας πειραματικής διατάξεως δεν διαφοροποιείται σε σχέση με την βασική πειραματική διάταξη. Οι αλλαγές που επιφέραμε απαντούν μόνο στο ότι αφαιρέσαμε τους δύο φακούς Φ_4 από την πορεία της δέσμης αναφοράς και τοποθετήσαμε στην θέση του τον φακό μικροσκοπίου που διαθέταμε Φ_5 20X ο οποίος λειτουργεί ως συγκεντρωτικός φακός. Επίσης, αφαιρέσαμε τα φίλτρα αποκοπής της εντάσεως από την δέσμη αναφοράς όπου παρακάτω θα αναφερθούμε λεπτομερέστατα.





ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΣ 7.3

Όπως έχουμε επισημάνει, η σημαντική διαφοροποίηση στις παρούσες πειραματικές διατάξεις σε σχέση με τις προηγούμενες είναι ο διαχωριστής δέσμης. Και από τη στιγμή που είχαμε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε ένα διαχωριστή δέσμης ο οποίος ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης της ερυθρής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του, καθορίζει τις εντάσεις των δυο δεσμών (αναφοράς και αντικειμένου), αποφασίσαμε να το εκμεταλλευτούμε.

Πιο συγκεκριμένα και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι θέλαμε να αποφύγουμε την χρησιμοποίηση των φίλτρων αποκοπής εντάσεως, καθώς οποιοδήποτε επιπλέον οπτικό στοιχείο στην πορεία της δέσμης ενισχύει την μη καθαρότητα της, αποφασίσαμε να τοποθετήσουμε με τέτοιο τρόπο τον διαχωριστή δέσμης ώστε να επιτύχουμε τον συγκεκριμένο λόγο των εντάσεων των δεσμών. Το επακόλουθο βέβαια της συγκεκριμένης μετατροπής ήταν να αλλάξουν οι οπτικοί δρόμοι των δυο δεσμών και έπρεπε με συγκεκριμένες κινήσεις να τους επαναφέρουμε στην ισότητα.

Ακολουθώντας την δέσμη αναφοράς είχαμε από τον διαχωριστή δέσμης ως το κάτοπτρο K_2 απόσταση $l_{a1}=52$ cm και από το κάτοπτρο ως τα γυάλινα στηρίγματα απόσταση $l_{a2}=69$ cm. Η μεγέθυνση της δέσμης μετά την ανάκλαση της από το κάτοπτρο όπως έχουμε ήδη αναφέρει πραγματοποιείται με την βοήθεια του φακού μικροσκοπίου που διαθέταμε Φ_5 20X ο οποίος λειτουργεί ως συγκεντρωτικός.

Ταυτόχρονα η δέσμη του αντικειμένου ανακλώταν στο κάτοπτρο K_1 που απέχει από τον διαχωριστή δέσμης απόσταση $l_{o1}=56$ cm και έπειτα μετά από την μεγέθυνση της στον φακό Φ_1 κατευθυνόταν στο αντικείμενο που απέχει απόσταση $l_{o2}=60$ cm. Το αντικείμενο ήταν τοποθετημένο σε απόσταση $l_{o3}=5$ cm από τα γυάλινα πλακίδια και έτσι εξασφαλίστηκε πάλι η ισότητα των δυο οπτικών δρόμων των δεσμών.



7.3.2 Πειραματική Διαδικασία

Έπειτα από ιδιαίτερα προσεγμένες μετρήσεις είχαμε $I_{obj}=0,85 \mu\text{Watt} / \text{cm}^2$ και $I_{ref} = 4,50 \mu\text{Watt} / \text{cm}^2$ επιτυγχάνοντας τον επιθυμητό λόγο των εντάσεων για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα κατά την διάρκεια της αποτυπώσεως του αντικειμένου στο φιλμ. Τα αποτελέσματα της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα με αντικείμενο και πάλι το πιόνι του σκακιού.

ΠΙΟΝΙ ΣΚΑΚΙΟΥ							
ΧΡΟΝΟΣ	60	60	70	75	80	85	90
ΠΟΙΟΤΗΤΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΚΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ

- Η ποιότητα των ολογραμμάτων ήταν καλή και το κυριότερο με την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη μας δόθηκε η δυνατότητα να παρουσιάσουμε ένα ικανοποιητικό αριθμό από αυτά. Πιο αναλυτικά, καταφέραμε να βρούμε σχετικά γρήγορα τον χρόνο εκθέσεως με το καλύτερο αποτέλεσμα και στη συνέχεια εκθέσαμε το πιόνι σε χρόνους παραπλήσιους από αυτόν τον χρόνο. Έτσι επιτύχαμε να δείξουμε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το σημαντικό ρόλο που παίζει για την ολογραφία η κατάλληλη τιμή της εντάσεως που συμβάλει στην επιφάνεια του φιλμ, όταν αυτό εκτεθεί στο ενδεδειγμένο χρονικό διάστημα, καθώς τα ολογράμματα με διαφορετικούς χρόνους, έστω και αν αυτοί είναι παραπλήσιοι στον ιδανικό, παρουσιάζουν εικόνα χαμηλότερης ποιότητας και απεικονίζουν τα είδωλα ιδιαίτερα θαμπά.



8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναμφισβήτητα, στο σύνολο τους οι παραπάνω πειραματικές διατάξεις καθώς και η εν γένει κατασκευή των ολογραμμάτων ώθησαν στο να εξαχθούν αρκετά συμπεράσματα. Η σπουδαιότητα αυτών ανάγεται κυρίως στο γεγονός ότι αποτελούν όχι απλές θεωρίες πάνω στα ολογράμματα, αλλά σημαντικά στοιχεία για την επίτευξη ολογραμμάτων και συγκριτικά δεδομένα σε συνάρτηση με τις δυο ολογραφικές τεχνικές με τις οποίες και ασχοληθήκαμε. Εν δυνάμει βέβαια αποτελούν αυτά τα συμπεράσματα ένα οδηγό σωστής και επιτυχημένης πορείας για ένα ερευνητή που πρωτοασχολείται με ολογραφία, προκειμένου να έχει ένα όσο το δυνατόν καλύτερο αποτέλεσμα.

Συνολικά επομένως τα ολογράμματα διελεύσεως αποτελούν την πρώτη επιλογή για κατασκευή ποιοτικών ολογραμμάτων. Δίνεται η δυνατότητα με αυτήν τη τεχνική να μπορέσουμε να δούμε πολύ εύκολα τόσο την αναπαράσταση του φανταστικού όσο και του πραγματικού ειδώλου καθώς σε αυτό βοήθα στο ότι η αναπαράσταση τους γίνεται στο εσωτερικό χώρο του εργαστηρίου με την βοήθεια του laser, έχοντας διατηρήσει και τις δυο πλευρές του φιλμ διαφανές, φωτίζοντας έτσι και από τις δυο πλευρές του. Η ανάκλαση Bragg και το μάζεμα του γαλακτώματος δεν παρουσιάζονται εδώ και συνολικά οι διατάξεις αυτής της ολογραφικής τεχνικής δεν είναι σε τόσο μεγάλο βαθμό ευαίσθητες στους θορύβους και στην κακή ποιότητα, τόσο της δέσμης του laser, όσο και των ανωμαλιών στις επιφάνειες των φακών και των κατόπτρων.

Αναμφισβήτητα όμως απαιτούν μεγάλα χρονικά διαστήματα έκθεσης του αντικειμένου στο φιλμ καθώς επίσης και δεν έχουν το πλεονέκτημα της παρατήρησης αμέσως μετά την κατασκευή του ολογράμματος. Είναι



αναγκαίο να αναπαρασταθεί το αντικείμενο πίσω στο εργαστήριο στην ίδια διάταξη με την οποία κατασκευάστηκε και με τις ίδια ένταση στην δέσμη του laser.

Συγκριτικά επομένως και σε αντιπαράθεση με τα ολογράμματα διελεύσεως, τα ολογράμματα ανακλάσεως :

- Είναι ποιοτικότερα ολογράμματα καθώς παρουσιάζεται καλύτερα η τρισδιάστατη μορφή των αντικειμένων
- Κατασκευάζονται με μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης του αντικειμένου πάνω στο φιλμ
- Η παρατήρηση τους πραγματοποιείται μόνο μέσα στο εργαστήριο και όχι σε εξωτερικούς χώρους
- Κατασκευάζονται με κατά κανόνα ανώτερες ολογραφικές διατάξεις



9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bahaa Saleh, Malvin Teich. Fundamentals Of Photonics. John Wiley And Sons, Inc
- Svelto Orazio, Hanna David. Principles Of Lasers. 4th Edition. Plenum Press
- Βάινος Νίκος. Σημειώσεις για το μάθημα Οπτική Μετρολογία του Μεταπτυχιακού Προγράμματος της Φωτονικής
- Unterseher F., Hansen J., Schlesinger B. Holography HandBook. Ross Books
- Born Max, Wolf Emil. Principles Of Optics. Cambridge University Press
- Χριστοδουλίδης Αλέξανδρος. Σύγχρονη Οπτική και Εφαρμογές. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
- Kasper J.E., Feller S.A. The Complete Book Of Holograms. John Wiley And Sons, Inc
- Emulsions For Holography. Slavich International.

