

### Περιεχόμενα

- §1. Εισαγωγή - Τι είναι ολογραφία
- §2. Βασική θεωρία πειραμάτων
- §3. Περιγραφή οργάνων
- §4. Λήψη ολογράμματος
- §5. Παρατήρηση του ολογράμματος
- §6. Ερωτήσεις
- §7. Βιβλιογραφία

### §1. Εισαγωγή - Τι είναι ολογραφία

Ολογραφία είναι η τεχνική της πλήρους καταγραφής κατά φάση και πλάτος ενός κύματος και η δυνατότητα της αναπαραγωγής του με μεγάλη πιστότητα. Ανακαλύφθηκε το 1948 από τον Dennis Gabor ενώ προσπαθούσε να βελτιώσει τη διακριτική ικανότητα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Λογικά θα μπορούσε να είχε ανακαλυφθεί από τον 19ο αιώνα αφού οι αρχές στις οποίες στηρίζεται ήταν ήδη γνωστές στους θεμελιωτές της κυματικής T.Young, O.Fresnel και J.Von Fraunhofer. Η αιτία που καθυστέρησε τόσο πολύ η ανακάλυψη της ολογραφίας οφείλεται περισσότερο σε τεχνικές δυσκολίες παρά στις οποιεσδήποτε θεωρητικές ελλείψεις. Έτσι με τις τεχνολογικές εξελίξεις του 20ου αιώνα και κύρια με την ανακάλυψη του laser δημιουργούνται τα πρώτα ολοκληρωμένα ολογράμματα (E.Leith, J.Upatnieks) βασισμένα στις έρευνες του Gabor. Από τότε αρχίζει μια ραγδαία εξέλιξη της τεχνικής της ολογραφίας και εξάπλωση των εφαρμογών της σε όλους τους τομείς της επιστήμης, από την ιατρική (ολογραφία υπερήχων) και τη χαρτογράφηση των θαλάσσιων βυθών ή της επιφάνειας της γης (με Radar ή ηχητικά κύματα), ως την τρισδιάστατη φωτογραφία και την προοπτική ολογραφικής τηλεόρασης και κινηματογράφου.

---

\* Τη σύνταξη και επιμέλεια αυτής της ενότητας ανέλαβε ο Ε.Λιαροκάκης με τη βοήθεια του Ε.Αναστασάκη.

Αλλά για να καταλάβουμε τί είναι ολογραφία ας δούμε πρώτα σε τι διαφέρει ένα οπτικό ολόγραμμα από μια κοινή φωτογραφία. Στην κοινή φωτογραφία κάθε σημείο του αντικειμένου εστιάζεται σε κάποιο σημείο του φωτογραφικού φιλμ και η φωτεινότητα της φωτογραφίας ανταποκρίνεται στην ένταση της αρχικής ακτινοβολίας του αντικειμένου. **Καταγράφεται λοιπόν στο φιλμ μόνον η ένταση (για την ακρίβεια το τετράγωνο της έντασης) της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας του αντικειμένου.** Επομένως όταν κοιτάζουμε μια κοινή φωτογραφία από διαφορετικές θέσεις βλέπουμε το περιεχόμενό της πάντοτε από μια οπτική γωνία, όπως ακριβώς το είδε ο φωτογραφικός φακός τη στιγμή που πάρθηκε η φωτογραφία.

Η σημαντική υπεροχή της ολογραφίας είναι η καταγραφή πάνω στο φιλμ όλης της πληροφορίας του σκεδαζόμενου κύματος που προσπίπτει πάνω σ' αυτό. Είναι γνωστό ότι κάθε κύμα χαρακτηρίζεται σε κάθε θέση του χώρου διάδοσής του από το πλάτος και τη φάση του. Επομένως **"ολογραφική" καταγραφή του κύματος σημαίνει αποτύπωση στο φιλμ όχι μόνο του πλάτους αλλά και της φάσης που είχε το κύμα όταν έφτανε στο επίπεδο του φιλμ.**

Ένα φιλμ που θα μπορούσε να αντιδράσει με άπειρη ταχύτητα στις χρονικές μεταβολές του προσπίπτοντος κύματος θα μπορούσε κατ' αρχήν να καταγράψει τα πλήρη στοιχεία του κύματος (πλάτος και φάση), αν η καταγραφή (έκθεση) γινόταν σε χρονικό διάστημα πολύ μικρότερο της περιόδου ταλάντωσης του κύματος. Για οπτικά κύματα η διαδικασία καταγραφής (έκθεση και ευαισθητοποίηση του φιλμ) θα έπρεπε να διαρκεί λιγότερο από  $10^{-15}$  sec (λιγότερο δηλαδή από την τυπική περίοδο ταλάντωσης του ορατού φωτός). Κάτι τέτοιο όμως είναι αδύνατο όχι μόνον από τεχνική άποψη αλλά και από το νόμο της απροσδιοριστίας, αφού μια τόσο γρήγορη καταγραφή αντιστοιχεί σ' ένα πλάτος συχνοτήτων της τάξης του  $\Delta f = \frac{1}{\Delta T} \approx 10^{15}$  Hz (ανάλυση Fourier ενός παλμού πλάτους  $10^{-15}$  sec). Κάθε πληροφορία που έχει συχνότητα ίση ή μικρότερη της απροσδιοριστίας  $\Delta f$  αναγκαστικά θα χαθεί. Αν θέλαμε βέβαια να καταγράψουμε ένα κύμα χαμηλής συχνότητας όπως π.χ. ραδιοκύματα ή κύματα ακουστικά όπου η περίοδος ταλάντωσης είναι αρκετά μεγαλύτερη, η γρήγορη καταγραφή

του κύματος θα ήταν εφικτή, αφού η απροσδιοριστία  $\Delta f$  θα έπαιρνε τώρα πολύ μικρότερες τιμές.

Ενας εναλλακτικός τρόπος που χρησιμοποιήθηκε από τον Gabor για να παρακαμφθεί η παραπάνω δυσκολία ήταν η χρήση μιας βοηθητικής δέσμης για την αναφορά των φάσεων του κύματος πληροφορίας στη φάση της δέσμης αυτής (δέσμη αναφοράς). Έτσι αν το σκεδαζόμενο κύμα και η δέσμη αναφοράς συμβεί να είναι (χωρικά) σύμφωνες, θα έχουμε συμβολή των δύο κυμάτων και εμφάνιση κροσσών πάνω στο φιλμ. Η κατανομή των κροσσών θα διαμορφώνεται από τη διαφορά φάσης των δύο κυμάτων. Με αυτό τον τρόπο δηλαδή καταφέρνουμε οι διαφορές φάσεων να μετατρέπουν σε διαφορές εντάσεων από κροσσό σε κροσσό. Η καταγραφή των κροσσών συμβολής πάνω στο κοινό φωτογραφικό φιλμ (που είναι ευαίσθητο στο πλάτος του κύματος μόνο) θα αποτυπώνει πλέον και τη φάση του σκεδαζόμενου κύματος σε σχέση με τη φάση του κύματος αναφοράς.

Ενα τέτοιο ολόγραμμα δεν θα θυμίζει σε τίποτε το αρχικό αντικείμενο αλλά θα είναι μόνο μια "κρυπτογραφική" αναπαράσταση της φάσης και του πλάτους του κύματος πληροφορίας, μέσω της γεωμετρίας των κροσσών συμβολής. Για να μπορέσουμε να αναπαράγουμε την εικόνα του αρχικού αντικειμένου θα πρέπει να φωτίσουμε με κατάλληλο τρόπο το ολόγραμμα, ώστε η αποκρυπτογράφηση των κροσσών συμβολής να ξαναδημιουργήσει το αρχικό κύμα πληροφορίας δηλαδή το είδωλο του αντικειμένου. Παρατήρηση του ολογράμματος από διαφορετικές οπτικές γωνίες θα μας επιτρέψει να βλέπουμε το αρχικό κύμα επίσης από διαφορετικές γωνίες. Άρα στα μάτια μας θα εμφανίζονται διαφορετικές όψεις του αρχικού αντικειμένου. Αυτή η τρισδιάστατη εικόνα του αντικειμένου δεν θα είναι καμιά οπτική απάτη αλλά μια εικόνα που θα προέρχεται από την πιστή αναπαραγωγή του αρχικού κύματος μέσα από τους αποτυπωμένους κροσσούς συμβολής και που φαίνεται να καταλαμβάνει το χώρο πίσω από το επίπεδο του ολογράμματος. Αν δηλαδή θελήσουμε να φωτογραφήσουμε το είδωλο του αντικειμένου που βλέπουμε μέσα από ένα ολόγραμμα χρησιμοποιώντας μια κοινή φωτογραφική μηχανή, θα πρέπει να εστιάσουμε κατάλληλα το φακό της μηχανής πάνω στο είδωλο και όχι πάνω στο ολόγραμμα. Αν κόβαμε ένα ολόγραμμα σε μικρά κομμάτια, μέσα από κάθε κομμάτι θα μπορούσαμε να δού-

με (με τον κατάλληλο φωτισμό) ολόκληρο το αντικείμενο δοσμένο πάντα από κάποια οπτική γωνία. Θα βλέπαμε δηλαδή το αντικείμενο με τον ίδιο τρόπο που θα φαινόταν αν το κοιτάζαμε μέσα από διάφορες κλειδαρότρυπες σε διαφορετικές θέσεις η κάθε μία.

Ολογράμματα μπορούν να δημιουργηθούν με αρκετή ευκολία σε διάφορα σχήματα. Μπορούμε λ.χ. να περιβάλουμε κυλινδρικά το αντικείμενο με το ολογραφικό φιλμ ώστε να έχουμε την πλήρη (360°) τρισδιάστατη ολογραφία του αντικειμένου. Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με οπτικά ολογράμματα, δηλαδή ολογράμματα που δημιουργούνται από τη σκέδαση του ορατού φωτός. Θα περιοριστούμε στην κατασκευή ενός είδους μόνο οπτικού ολογράμματος του **ανακλαστικού ολογράμματος (reflection hologram)**. Λέγεται έτσι γιατί η ανασύσταση (παρατήρηση) του αντικειμένου γίνεται μέσω του φωτός που ανακλάται από το ολόγραμμα. Με αυτό τον τρόπο θα βλέπουμε το φανταστικό είδωλο του αντικειμένου να σχηματίζεται πίσω από το ολόγραμμα. Το σημαντικό σ' αυτή την περίπτωση είναι ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και λευκό (φυσικό) φως για την παρατήρησή του. Αυτό είναι καλορθωτό γιατί το ανακλαστικό ολόγραμμα λειτουργεί και σαν ένα είδος φίλτρου που ανακλά μόνο μια ορισμένη περιοχή συχνοτήτων. Υπάρχει και η δεύτερη βασική κατηγορία ολογραμμάτων που για την παρατήρησή τους χρειάζεται φωτισμός με Laser από την αντίθετη πλευρά του ολογράμματος. Αυτά είναι τα **ολογράμματα μετάδοσης (transmission holograms)**. Το είδωλό τους είναι πραγματικό και μπορεί να προβληθεί πάνω σε μια οθόνη. Ολογράμματα μπορούν να δημιουργηθούν και από τις διαδοχικές φωτογραφίες ενός αντικειμένου από ελάχιστα διαφορετικές γωνίες. Αυτή η τεχνική που αναπτύχθηκε πριν ακόμη αναπτυχθεί η ολογραφία, για τη χαρτογράφηση ολόκληρων περιοχών με Radar, δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας κανονικών κινηματογραφικών ταινιών σε ένα είδος ολογράμματος που λέγεται **integram**. Σύνθεση ολογραμμάτων μπορεί να γίνει και με τη βοήθεια ενός computer. Σημείο προς σημείο και με κατάλληλο φωτισμό από Laser ο computer μπορεί να δημιουργήσει μία τρισδιάστατη εικόνα οποιουδήποτε αντικειμένου. Θα έπρεπε επίσης να αναφερθεί ότι με τη βοήθεια της ολογραφίας είναι δυνατό να φιλτραριστούν κοινές φωτογραφίες, ώστε να αυξηθεί η

διακριτική τους ικανότητα (*spatial filtration*), ή γενικά να γίνει αναγνώριση αντικειμένου (*character recognition*).

Μια τελευταία και πολύ σημαντική εφαρμογή της ολογραφίας είναι η παρατήρηση ασήμαντων μεταβολών στη μορφή ενός αντικειμένου με τη διαδοχική ολογράφηση του αντικειμένου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (*συμβολομετρική ολογραφία*). Η ένταση και ο βαθμός μετατοπίσεων (της τάξης των μερικών εκατοντάδων Å) εμφανίζεται σαν υπέρθεση πάνω στην εικόνα του αντικειμένου ενός συστήματος κροσσών συμβολής.

## §2. Βασική θεωρία πειραμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, το ολόγραμμα δημιουργείται από τη συμβολή δύο κυμάτων, ενός βοηθητικού (δέση αναφοράς) και του σκεδαζόμενου από το σώμα (δέση αντικειμένου). Η εικόνα συμβολής των δύο κυμάτων περιέχει όλη την πληροφορία ως προς το πλάτος και τη φάση του αντικειμένου. Για να δούμε πως δημιουργείται το ολόγραμμα από τη συμβολή των δύο κυμάτων θα εξετάσουμε τη συμβολή φωτός σε μερικές απλές περιπτώσεις. Μετά θα δούμε πως θεμελιώνεται θεωρητικά η ολογραφία και θα εξετάσουμε τα διάφορα είδη ολογραμμάτων. Θα αναφέρουμε μερικές χαρακτηριστικές ιδιότητες των ολογραμμάτων και τέλος θα ασχοληθούμε με το συγκεκριμένο τύπο ολογράμματος που θα κατασκευάσουμε (ανακλαστικό ολόγραμμα).

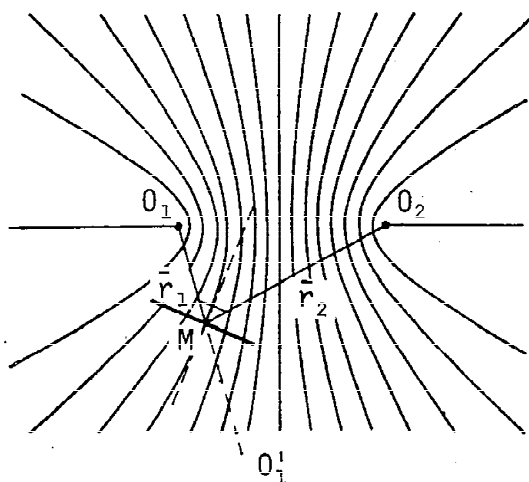
### 2.1 Γεωμετρική ερμηνεία της αρχής της ολογραφίας

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δύο σημειακές μονοχρωματικές πηγές που εκπέμπουν φως. Ακόμη ας δεχτούμε ότι τα δύο κύματα που εκπέμπονται είναι πολωμένα στην ίδια διεύθυνση και ότι η γωνιακή τους συχνότητα είναι  $\omega = 2\pi\nu$  (Σχ.1). Αν

$$\begin{aligned}x_1 &= A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\x_2 &= A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)\end{aligned}\tag{5.1}$$

είναι τα πεδία των δύο κυμάτων σε κάποια θέση, το ολικό πεδίο στην ίδια θέση θα είναι

$$x_{ολ} = x_1 + x_2 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) = A \cos(\omega t + \varphi),\tag{5.2}$$



Σχ.1 Εικόνα συμβολής δύο σημειακών μονοχρωματικών πηγών<sup>1</sup>  $O_1, O_2$ . Συνεχείς γραμμές: επιφάνειες σταθερού πλάτους  $A$  (υπερβολοειδή ει περιστροφής). Διακεκομμένη γραμμή: διχοτόμος της γωνίας  $O_1MO_2$ .

όπου

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (5.3)$$

και

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \right]. \quad (5.4)$$

Αν χρησιμοποιήσουμε οποιοδήποτε ανιχνευτή για την καταγραφή του συνιστάμενου κύματος, αυτός εξ αιτίας της αδράνειας του δεν θα μπορεί να παρακολουθήσει τη χρονική μεταβολή της έντασης του φωτός, δηλαδή το  $A^2 \cos^2(\omega t + \varphi)$ . Έτσι τελικά η ποσότητα που θα καταγραφεί θα είναι μια μέση χρονική τιμή του  $A^2 \cos^2(\omega t + \varphi)$ . Ομως η μέση τιμή του όρου  $\cos^2(\omega t + \varphi)$

είναι ίση προς  $\frac{1}{2}$ , άρα  $\langle A^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \rangle = \frac{\langle A^2 \rangle}{2}$  όπου η ποσότητα  $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$  εξαρτάται από τη διαφορά φάσης  $\varphi_1 - \varphi_2$ . Διακρίνουμε τώρα δύο περιπτώσεις: (α) Η διαφορά  $\varphi_1 - \varphi_2$  εξαρτάται από το χρόνο με ένα τυχαίο τρόπο. Τότε  $\langle \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \rangle = 0$  και  $\langle A^2 \rangle = A_1^2 + A_2^2$ . Δηλαδή η ένταση του φωτός που θα παρατηρήσουμε θα είναι το άθροισμα των εντάσεων κάθε δέσμης. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι οι δύο δέσμες εί-

ναι χωρικά ασύμφωνες μεταξύ τους ή απλώς ασύμφωνες. (β) Η διαφορά φάσης  $\varphi_1 - \varphi_2$  παραμένει σταθερή στο χρόνο. Τότε οι δύο δέσμες φωτός λέγονται σύμφωνες μεταξύ τους ή απλώς σύμφωνες και η παρατηρούμενη ένταση φωτός εξαρτάται από τη διαφορά φάσης των δύο κυμάτων στη συγκεκριμένη θέση. Αν π.χ. συμβαίνει να ισχύει

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2N\pi, \text{ όπου } N \text{ ακέραιος} \quad (5.5)$$

τότε  $A = A_1 + A_2$ . Αν πάλι

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (2N + 1)\pi \quad (5.6)$$

τότε  $A = |A_1 - A_2|$ .

Αποτέλεσμα της συμβολής των δύο σύμφωνων κυμάτων θα είναι η δημιουργία στάσιμων κυμάτων στο χώρο, με μέγιστο και ελάχιστο πλάτος στις θέσεις που ισχύουν η (5.5) και (5.6) αντίστοιχα. Είναι εύκολο τώρα να εκφράσουμε τη διαφορά φάσης σαν συνάρτηση των αποστάσεων των σημειακών πηγών από το σημείο παρατήρησης. Προφανώς θα ισχύει

$$\varphi_1 = \varphi_{0_1} + \frac{2\pi r_1}{\lambda}$$

$$\varphi_2 = \varphi_{0_2} + \frac{2\pi r_2}{\lambda}$$

όπου  $\varphi_{0_1}, \varphi_{0_2}$  είναι οι αρχικές φάσεις των κυμάτων στη θέση εκπομπής και  $r_1, r_2$  οι αποστάσεις των σημειακών πηγών  $O_1, O_2$  από το σημείο παρατήρησης  $M$  (Σχ.1). Για απλότητα μπορούμε να δεχτούμε ότι  $\varphi_{0_1} = \varphi_{0_2} = 0$ . Προκύπτει τότε

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) = K\pi \quad \eta \quad r_1 - r_2 = \lambda \frac{K}{2} \quad (5.7)$$

όπου  $K$  πραγματικός αριθμός. Μέγιστα έχουμε αν ισχύει  $K=2N$  όπου  $N = 0, 1, 2, \dots$  οπότε

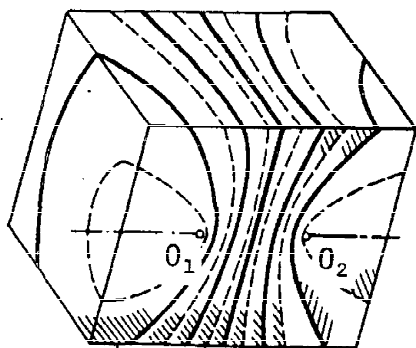
$$r_1 - r_2 = N\lambda. \quad (5.8)$$

Ελάχιστα θα έχουμε αν  $K=2N+1$ , οπότε

$$r_1 - r_2 = \left(N + \frac{1}{2}\right)\lambda. \quad (5.9)$$

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του τρισδιάστατου χώρου που ικανοποιούν τις σχέσεις (5.8) ή (5.9) θα είναι υπερβολοειδείς επιφάνειες εκ περιστροφής, με εστίες τις σημειακές πηγές εκπομπής των κυμάτων (Σχ. 1). Χαρακτηριστικό των επιφανειών είναι το ότι η διχοτόμος της γωνίας που σχηματίζουν οι οπτικές ακτίνες  $O_1M$  και  $O_2M$  στη θέση  $M$  είναι η εφαπτομένη της επιφάνειας στο σημείο αυτό (Σχ.1). Επίσης, η κάθετος της εφαπτομένης στο σημείο  $M$  διχοτομεί τη γωνία  $O_2MO_1'$ , όπου  $MO_1'$  η προέκταση της  $O_1M$ . Αν επομένως η υπερβολοειδής επιφάνεια είναι και κατοπτρική τότε μια προσπίπτουσα στο  $M$  ακτίνα που εκπέμπεται από την  $O_2$  θα ακολουθήσει μετά την ανάκλασή της στο  $M$  τη διεύθυνση  $MO_1'$ , η δε προέκτασή της θα περνά από το  $O_1$ .

Δεχόμαστε τώρα ότι γεμίζουμε ολόκληρο το χώρο γύρω από τις δύο πηγές με ένα κατάλληλο υλικό, ευαίσθητο στο φως των δύο πηγών που έχει δείκτη διάθλασης μονάδα (π.χ. ένα φιλμ). Εκεί που η ένταση του φωτός παρουσιάζει μέγιστο, το υλικό θα ευαισθητοποιηθεί πιο πολύ, ή όπως λέμε, θα δημιουργηθεί μέγιστο οπτικής πυκνότητας. Συνήθως οι περιοχές έντονης ευαισθητοποίησης είναι και έντονα ανακλαστικές. Η έκθεση επομένως του υλικού στο φως των δύο πηγών θα δημιουργήσει περιοχές μεγάλης ή μικρής οπτικής ανακλαστικότητας (Σχ.2) σύμφωνα με τους γεωμετρικούς τόπους του Σχ.1. Στην πραγματικότητα θα δημιουργηθεί μια συνεχής μεταβολή ανακλαστικότητας από τις θέσεις μέγιστης στις θέσεις ελάχιστης έντασης φωτός.

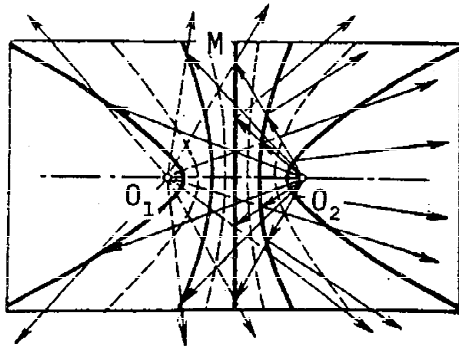


Σχ.2 Θέσεις μεγίστων (συνεχείς καμπύλες) και ελαχίστων (διακεκομμένες καμπύλες) οπτικής πυκνότητας ή ανακλαστικότητας<sup>2</sup>.

Αν εμφανίσουμε κατάλληλα αυτό το τρισδιάστατο φιλμ θα δημιουργήσουμε ένα τρισδιάστατο ολόγραμμα. Πράγματι, αν αφαιρέσουμε τη μια φωτεινή πηγή (π.χ. την  $O_1$ ) και φωτίσουμε το ολόγραμμα με την άλλη πηγή (την  $O_2$ ) οι φωτεινές ακτίνες από την πηγή  $O_2$  (Σχ.3) θα ανακλώνται στις θέσεις όπου εμφανίζεται έντονη ανακλαστικότητα, δηλαδή πάνω στις υπερβολοειδείς επιφάνειες μεγίστων του Σχ.1. Η γεωμετρία ανάκλασης θα γίνεται σύμ-



φωνα με την περιγραφή που δόθηκε πιο πάνω, μετά την (5.9). Αρα αν προεκτείνουμε όλες τις ανακλώμενες, αυτές θα συγκλίνουν στη θέση  $O_1$  όπου και θα σχηματιστεί το φανταστικό είδωλο της  $O_2$ . Ας υποθέσουμε τώρα ότι τοποθετούμε ένα μικροσκοπικό σώμα στη θέση της μιας σημειακής πηγής ενώ διατηρούμε την άλλη για να φωτίζει όλο το χώρο γύρω της, περιλαμβανομένου και του αντικειμένου. Εφόσον το σκεδαζόμενο φως που εκπέμπει το αντικείμενο είναι σύμφωνο με το φως της πηγής (που το φωτίζει), ο συνδυασμός των δύο φωτεινών σημάτων από την πηγή και από



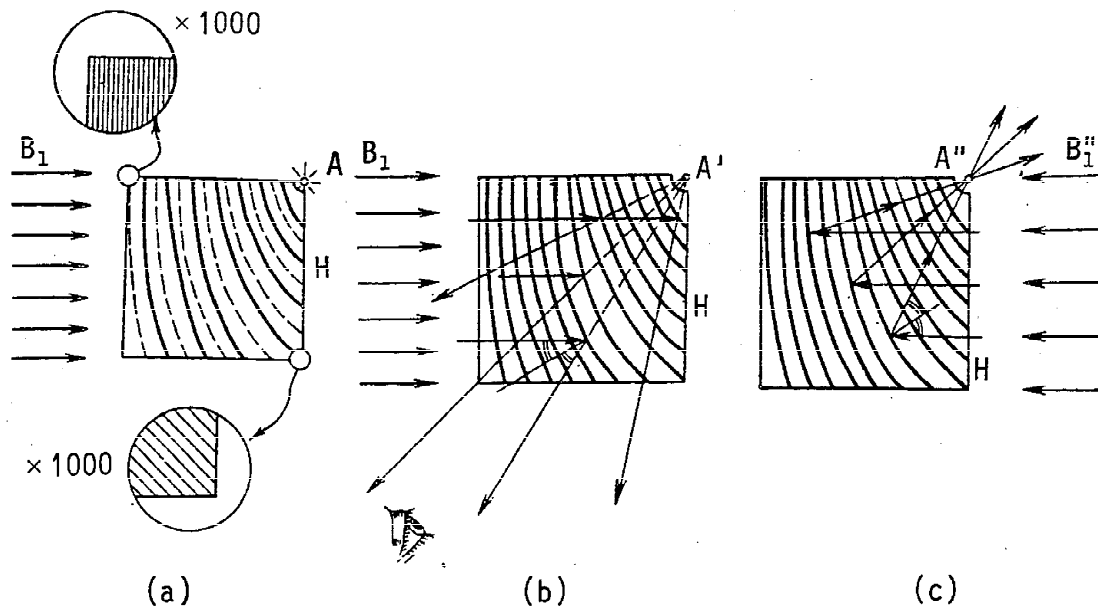
Σχ.3 Αναδημιουργία φανταστικού ειδώλου  $O_1$  από το τρισδιάστατο ολόγραμμα και τη σημειακή πηγή  $O_2$  δεξιά<sup>2</sup>.

κάθε σημείο του αντικειμένου θα μας δώσει μια εικόνα συμβολής μέσα στο φιλμ όμοια με εκείνη του Σχ.2. Η συνολική εικόνα συμβολής αντικειμένου-σημειακής πηγής θα είναι η

υπέρθωση όλων των επί μέρους εικόνων συμβολής (μιας για κάθε σημείο του αντικειμένου) και θα αποτυπωθεί μέσα στο φιλμ. Μετά την εμφάνιση του φιλμ και το φωτισμό του από τη σημειακή πηγή μόνο, θα έχουμε την αναδημιουργία ενός φανταστικού ειδώλου του αντικειμένου, ακριβώς όπως περιγράψαμε πιο πάνω για το φανταστικό είδωλο της σημειακής πηγής.

Στην πράξη δεν μπορούμε ποτέ να έχουμε ένα τόσο μεγάλο όγκο φωτογραφικού υλικού. Συνήθως το πάχος του φιλμ είναι περίπου 10λ. Μέσα σ' αυτό το μικρό κομμάτι γαλακτώματος (φωτογραφικού υλικού) δημιουργούνται οι υπερβολοειδείς επιφάνειες ισοκατανομής οπτικής πυκνότητας που δρουν σαν υπερβολικά κάτοπτρα. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων (ή ελαχίστων) οπτικής πυκνότητας είναι εύκολο να υπολογιστεί από την (5.7) και είναι ίση με  $\lambda/2$ . Τα ολογράμματα που δημιουργούνται σε φιλμ με πάχος γαλακτώματος πολύ μεγαλύτερο της μέσης απόστασης των διαδοχικών μεγίστων ( $d \gg \frac{\lambda}{2}$ ) λέγονται τρισδιάστατα ολογράμματα ή ολογράμματα όγκου. Το είδωλο του αντικειμένου που δημιουργείται με τα τρισδιάστατα ολογράμματα δεν είναι αναγκαστικά φανταστικό, αλλά εξαρτάται από ποια πλευρά φωτίζεται το ολόγραμμα με τη δέσμη αναφοράς

κατά τη διαδικασία αναπαραγωγής. Ας πάρουμε για παράδειγμα την περίπτωση της συμβολής ενός επίπεδου κύματος  $B_1$  και μιας σημειακής πηγής  $A$  (Σχ.4). Το τρισδιάστατο ολόγραμμα  $H$  φαίνεται στο Σχ.4a. Φωτίζοντας

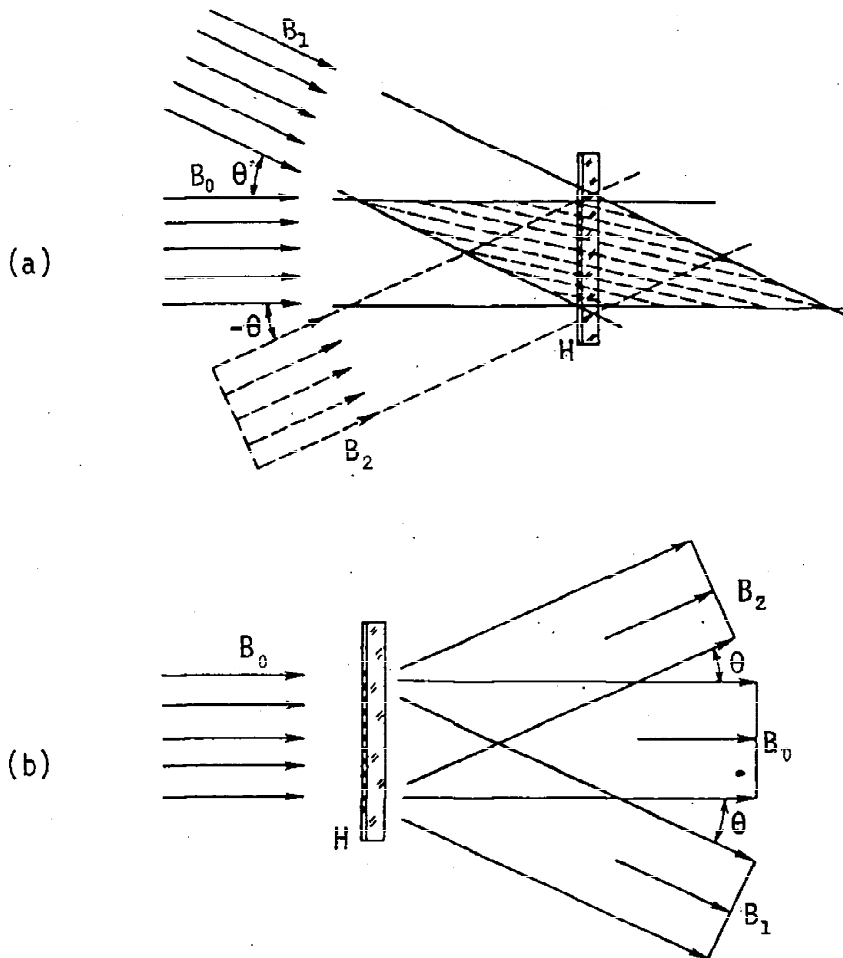


Σχ.4 Οι συνεχείς (διακεκομμένες) γραμμές παριστάνουν μέγιστα (ελάχιστα) της ολικής έντασης του συμβαλλόμενου φωτός<sup>2</sup>. (a) Ολόγραμμα  $H$  που δημιουργείται από τη συμβολή της επίπεδης δέσμης  $B_1$  και μιας σημειακής πηγής  $A$ . Οι μεγενθύσεις (μέσα στους κύκλους) υποδηλώνουν το πλήθος (1000) των πραγματικών καμπυλών μέγιστης έντασης που για λόγους ευκολίας σχεδιάζονται σαν μία. (b) Φωτισμός του ολογράμματος με την αρχική επίπεδη δέσμη  $B_1$  και δημιουργία φανταστικού ειδώλου  $A'$  στην αρχική θέση. (c) Φωτισμός από την αντίθετη κατεύθυνση με τη δέσμη  $B_1''$  και δημιουργία πραγματικού ειδώλου στη θέση  $A''$ .

το ολόγραμμα από τη διεύθυνση της αρχικής δέσμης έχουμε τη δημιουργία ενός ειδώλου (Σχ.4b) από τις προεκτάσεις των πραγματικών ανακλώμενων ακτίνων (φανταστικό είδωλο). Αντίθετα παίρνουμε πραγματικό είδωλο αν φωτιστεί το ίδιο ολόγραμμα από την αντίθετη κατεύθυνση (Σχ.4c).

Τα ολογράμματα που έχουμε εξετάσει μέχρι στιγμής απαιτούν όπως είπαμε και πιο πάνω αρκετό πάχος γαλακτώματος του φιλμ ( $d \gg \frac{\lambda}{2}$ ) έτσι ώστε μέσα στον όγκο του υλικού να δημιουργούνται μερικά τουλάχιστον ακρότατα συμβολής. Αν τώρα συμβεί το πάχος του γαλακτώματος να είναι πολύ μικρότερο από την απόσταση διαδοχικών μέγιστων ( $d \ll \frac{\lambda}{2}$ ) το ολό-

γραμμα θεωρείται επίπεδο. Ο περιορισμός του πάχους επηρεάζει αναγκαστικά την πιστότητα στην αναδημιουργία του αρχικού αντικειμένου. Επίσης ένα επίπεδο ολόγραμμα δημιουργεί πάντα δύο είδωλα του αντικειμένου ταυτόχρονα, ένα πραγματικό και ένα φανταστικό. Για να καταλάβουμε πως δημιουργούνται τα δύο είδωλα ας εξετάσουμε μια απλή περίπτωση συμβολής δύο επίπεδων δεσμών  $B_0, B_1$  που συναντιούνται με γωνία  $\theta$ . Η εικόνα συμβολής αποτελείται από ισαπέχουσες επιφάνειες μέγιστης έντασης που διχοτομούν τη γωνία  $\theta$  (Σχ.5a).



Σχ.5 (α) Δημιουργία επίπεδου ολογράμματος  $H$  από τη συμβολή δύο επίπεδων δεσμών, της δέσμης αναφοράς  $B_0$  και της δέσμης αντικειμένου ( $B_1$  ή  $B_2$ ) υπό γωνία  $\theta$  ή  $-\theta$  αντίστοιχα<sup>2</sup>. (β) Από το συνδυασμό της αρχικής δέσμης αναφοράς  $B_0$  και του ολογράμματος  $H$  έχουμε τη δημιουργία τριών δεσμών φωτός, της αρχικής  $B_0$  και δύο δεσμών αντικειμένου  $B_1, B_2$  σε ίσες γωνίες ως προς τη δέσμη αναφοράς.

Αν αντί για τη δέσμη  $B_1$  χρησιμοποιήσουμε μια άλλη επίπεδη δέσμη  $B_2$  υπό γωνία  $-\theta$  ως προς την  $B_0$  (Σχ.5a), τα επίπεδα συμβολής διχοτομούν εντελώς ανάλογα τη γωνία  $-\theta$ . Ουσιαστικά, για πολύ μικρά πάχη των ολογραμμάτων η δομή των δύο εικόπων συμβολής θα διαφέρει (για την ακρίβεια, θα τείνει στη μορφή ενός οπτικού φράγματος). Έτσι αν στη διαδικασία αναπαραγωγής φωτίσουμε οποιοδήποτε από τα δύο ολογράμματα ( $B_0+B_1$  ή  $B_0+B_2$ ) με τη δέσμη αναφοράς  $B_0$ , θα πρέπει να σχηματιστούν και οι δύο δέσμες  $B_1$  και  $B_2$  (Σχ.5b), αφού η  $B_0$  δεν μπορεί να διακρίνει με ποιο συνδυασμό δεσμών δημιουργήθηκε αρχικά το ολόγραμμα. Μπορούμε να πούμε ότι το επίπεδο ολόγραμμα συμπεριφέρεται σαν ένα οπτικό φράγμα περίθλασης. Το συμπέρασμα αυτό είναι αρκετά σημαντικό. Ισχύει για όλα τα επίπεδα ολογράμματα και μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά με τη βοήθεια των μετασχηματισμών Fourier (βλ. ενότητα 2). Μπορεί δε να αποδειχθεί ότι το ολόγραμμα είναι αυτοούσιος ο μετασχηματισμός Fourier του αντικειμένου. Επίσης ότι κατά την παραγωγή το είδωλο που δημιουργείται είναι ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier του ολογράμματος. Επομένως το είδωλο θα συμπίπτει με το αρχικό αντικείμενο. Για ολογράμματα όγκου η μαθηματική αντιστοιχία μεταξύ αντικειμένου-ολογράμματος-ειδώλου δεν είναι τόσο απλή και δεν θα αναφερθούμε αναλυτικά σ' αυτήν, μολονότι **το ολόγραμμα που θα κατασκευάσουμε είναι ολόγραμμα όγκου**. Στην επόμενη παράγραφο θα δειχθεί με σύντομο αναλυτικό τρόπο ότι στην απλή περίπτωση ενός επίπεδου ολογράμματος πράγματι τα είδωλα που αναμένονται είναι δύο, ένα πραγματικό κι ένα φανταστικό. Η παρουσίαση δεν είναι πλήρης, οπωσδήποτε όμως βοηθά στο να πάρει κανείς μια ιδέα για το μαθηματικό τρόπο χειρισμού του προβλήματος. Για περισσότερες λεπτομέρειες συνιστώνται οι βιβλιογραφικές αναφορές 2 και 3.

## 2.2 Αναλυτική ερμηνεία του επίπεδου ολογράμματος

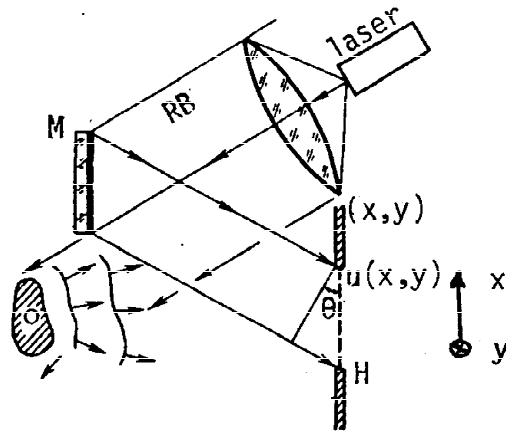
Έχουμε δει ότι ένα ολόγραμμα δημιουργείται από τη συμβολή δύο σύμφωνων κυμάτων πάνω στο φωτογραφικό φιλμ. Έστω ότι το φως που σκεδάζεται από το αντικείμενο και πέφτει πάνω στο φιλμ περιγράφεται από μια συνάρτηση του ηλεκτρικού του πεδίου

$$E(x,y) = E(x,y)e^{i\phi(x,y)}. \quad (5.10)$$

$E(x,y) = |\mathcal{E}(x,y)|$  είναι το πλάτος κύματος και  $\varphi(x,y)$  η φάση του σαν συνάρτηση της θέσης  $(x,y)$  πάνω στο φιλμ (Σχ.6). Εχουμε δεχτεί ότι το κύμα είναι τελείως σύμφωνο. Έτσι αγνοούμε τον παράγοντα  $e^{i\omega t}$  στη φάση του κύματος αφού είναι ενιαίος για όλους τους όρους. Η συμφωνη δέσμη αναφοράς από την άλλη μεριά θα περιγράφεται από ένα επίπεδο κύμα της μορφής

$$\mathcal{E}_0 = E_0 e^{-ikx} \tag{5.11}$$

όπου  $k = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \approx \frac{2\pi}{\lambda} \theta$  (για μικρές τιμές του  $\theta$ ).



Σχ.6 Κατασκευή επίπεδου ολογράμματος H στο επίπεδο xy (άξονας y κάθετος στο επίπεδο του σχήματος)<sup>2</sup>. Ένα μέρος της δέσμης (RB) ανακλάται από τον καθρέπτη M και αποτελεί τη δέσμη αναφοράς. Το υπόλοιπο της δέσμης σκεδάζεται από το αντικείμενο O και προσπίπτει πάνω στο επίπεδο xy.

Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο πάνω στο φιλμ θα είναι ίσο με

$$u(x,y) = E_0 e^{-ikx} + E(x,y) e^{i\varphi(x,y)}. \tag{5.12}$$

Το φιλμ όμως επηρεάζεται από το τετράγωνο της έντασης του κύματος

$$I(x,y) = u \cdot u^* = E_0^2 + E^2(x,y) + E_0 E(x,y) \left[ e^{i(\varphi+kx)} + e^{-i(\varphi+kx)} \right]. \tag{5.13}$$

Στην απλή περίπτωση επίπεδου ολογράμματος το φωτογραφικό φιλμ είναι σταθερού πάχους και η συνεχής μεταβολή της αμαύρωσης που θα έχει αποτυπωθεί πάνω σ' αυτό μετά την εμφάνιση θα εξαρτάται μόνο από την

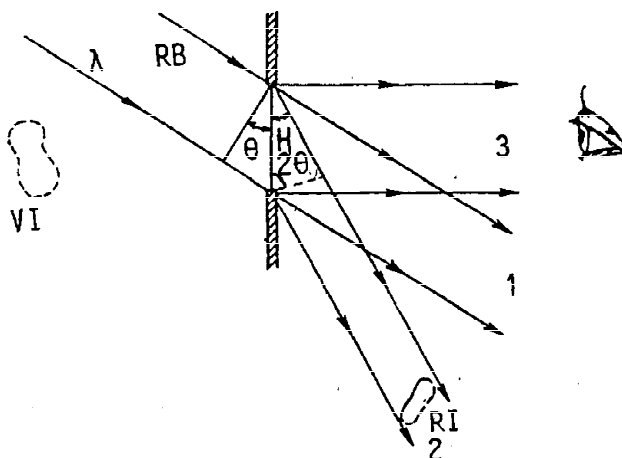
κατανομή της έντασης του φωτός  $I(x,y)$ . Υπάρχουν μάλιστα ορισμένα είδη φιλμ στα οποία οι δύο ποσότητες είναι ίσες μεταξύ τους. Αν φωτιστεί το ολόγραμμα που φτιάχτηκε πάνω σ'ένα τέτοιο φιλμ από κάποια πηγή (π.χ. ένα επίπεδο κύμα  $e^{-ikx}$ ), το πεδίο του κύματος που διέρχεται μέσα από το φιλμ θα είναι ανάλογο της κατανομής της αμαύρωσης άρα και της  $I(x,y)$ . Χρησιμοποιώντας λοιπόν τη δέσμη αναφοράς για το φωτισμό του ολογράμματος (Σχ.7) θα έχουμε

$$\begin{aligned} \mathcal{E}'(x,y) = e^{-ikx} I(x,y) = e^{-ikx} \left[ E_0^2 + E^2(x,y) \right] + E_0 E(x,y) e^{i\varphi(x,y)} + \\ + e^{-2ikx} e^{-i\varphi(x,y)} E_0 E(x,y) \end{aligned} \quad (5.14)$$

το οποίο περιγράφει τρία εξερχόμενα κύματα σε διαφορετική κατεύθυνση το καθένα:

- (a) Ένα κύμα  $[e^{-ikx}(E_0^2 + E^2(x,y))]$  που κινείται στην κατεύθυνση της δέσμης αναφοράς (Σχ.7, το 1), όπως δηλώνει ο εκθετικός παράγοντας  $e^{-ikx}$ . Το πλάτος του είναι διαφοροποιημένο ως προς εκείνο της δέσμης αναφοράς και δεν περιέχει καμιά πληροφορία για την κατανομή των φάσεων  $\varphi(x,y)$ .
- (b) Ένα κύμα  $[E_0 E(x,y) e^{i\varphi(x,y)}]$  ανάλογο της αρχικής συνάρτησης του αντικειμένου (5.10). Η απουσία κάποιου παράγοντα  $e^{-ikx}$  δηλώνει ότι είναι ίσος με τη μονάδα, δηλαδή το κυματόνισμα (κι επομένως η διεύθυνση διάδοσης αυτού του κύματος) είναι κάθετο στον άξονα  $x$  (Σχ.7, το 3). Το είδωλο σχηματίζεται πίσω από το ολόγραμμα και είναι φανταστικό.
- (c) Το τρίτο κύμα κινείται υπό γωνία  $2\theta$  ως προς τον άξονα  $x$  όπως προκύπτει από τον παράγοντα  $e^{-2ikx}$ . Έχει πλάτος ανάλογο της συζυγούς συνάρτησης του αντικειμένου. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα άλλο είδωλο του αντικειμένου (Σχ.7, το 2) που είναι πραγματικό.

Αν τώρα το φιλμ υφίσταται **μεταβολή του πάχους** ανάλογα με τη φάση του συνολικού προσπίπτοντος τότε έχουμε δημιουργία ολογράμματος όγκου. Σ'αυτή την περίπτωση αποδεικνύεται ότι κατά την ανακατασκευή δημιουργείται μόνο ένα είδωλο πραγματικό ή φανταστικό, ανάλογα με την κατεύθυνση της δέσμης αναφοράς.



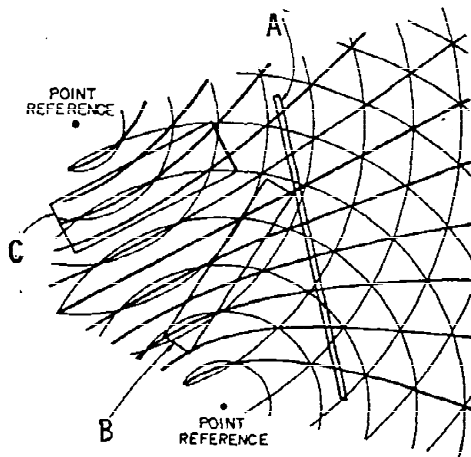
Σχ.7 Στην ανακατασκευή αντικειμένου από το επίπεδο ολόγραμμα Η δημιουργούνται τρεις φωτεινές δέσμες<sup>2</sup>: 1: ανάλογη της αρχικής δέσμης. 2: Πραγματικό είδωλο (RI) του αρχικού αντικειμένου. 3: Φανταστικό είδωλο (VI) του αρχικού αντικειμένου.

### 2.3 Κατηγορίες ολογραμμάτων

Εχουν ήδη αναφερθεί διάφορα είδη ολογραμμάτων ταξινομημένα ανάλογα με το πάχος του γαλακτώματος του φωτογραφικού φιλμ ή τον τρόπο παρατήρησής τους. Εδώ δίνεται μια πιο σημαντική ταξινόμηση των διαφόρων ολογραμμάτων ώστε να υπάρχει μια πληρέστερη εικόνα όλων των διαφορετικών ειδών.

(1) Ανάλογα με το πάχος του γαλακτώματος έχουμε λεπτά (πάχος  $d \ll \frac{\lambda}{2}$ ) και παχιά ή ολογράμματα όγκου ( $d \gg \frac{\lambda}{2}$ ). Κατά βάση αυτό που κατατάσσει ένα ολόγραμμα στη μία ή την άλλη κατηγορία είναι η ποσότητα του φωτογραφικού υλικού που χρησιμοποιείται στην αποτύπωση των επιφανειών ισοκατανομής φωτεινότητας. Εχουμε δει ότι στα επίπεδα (λεπτά) ολογράμματα έχουμε τη δημιουργία δύο ειδώλων (ενός πραγματικού και ενός φανταστικού) για κάθε τρόπο φωτισμού με τη δέσμη αναφοράς. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στα ολογράμματα όγκου όπου δημιουργείται μόνο ένα είδωλο (πραγματικό ή φανταστικό). Στο Σχ.8 φαίνονται τρία είδη ολογραμμάτων από την ίδια εικόνα συμβολής.

(2) Ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας του ειδώλου έχουμε ολογράμματα ανάκλασης (reflection) ή διέλευσης (transmission). Η παρατήρηση του ειδώλου στην πρώτη περίπτωση γίνεται έτσι ώστε το φως της δέσμης ανα-



Σχ.8 Μέγιστα συμβολής που παράγονται πάνω στο φιλμ ανάλογα με τη θέση και το πάχος του, από δύο σημειακές πηγές<sup>3</sup>.  
 A: επίπεδο (λεπτό) ολόγραμμα  
 B: ολόγραμμα όγκου (τρισδιάστατο) διέλευσης (transmission)  
 C: ολόγραμμα όγκου ανακλαστικό (reflection).

φοράς να ανακλάται πάνω στις επιφάνειες ισοκατανομής του φιλμ (έτσι η παρατήρηση γίνεται από την ίδια πλευρά που έρχεται η δέση αναφοράς). Στη δεύτερη κατηγορία το φως περνά μέσα από το φιλμ για να φτάσει στα μάτια του παρατηρητή.

Συνήθως στην περίπτωση της ανακλαστικής ολογραφίας έχουμε μικρότερες απώλειες φωτός.

(3) Ανάλογα με τον τρόπο που το φωτογραφικό φιλμ αντιδρά στην προσπίπτουσα φωτεινή ακτινοβολία (κατά τη διαδικασία κατασκευής ενός ολογράμματος) και το είδος της πληροφορίας που καταγράφει, το ολόγραμμα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- (α) **Ολογράμματα φάσης**, όπου καταγράφεται μόνο η πληροφορία για τη φάση του προσπίπτοντος κύματος.
- (β) **Ολογράμματα πλάτους**, όπου καταγράφεται μόνο το πλάτος του κύματος.

Συνήθως σε ένα κοινό ολόγραμμα έχουμε καταγραφή και του πλάτους και της φάσης.

(4) Ανάλογα με τον τρόπο που έχει δημιουργηθεί το ολόγραμμα (έκθεση στο φως και εμφάνιση), η δέση αναφοράς κατά τη διαδικασία ανακατασκευής θα διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να δημιουργεί το είδωλο του αντικειμένου. Αν η διαμόρφωση γίνεται στο πλάτος της δέσης αναφοράς έχουμε **ολόγραμμα διαμόρφωσης πλάτους (AM-Amplitude Modulation)** ενώ αν η διαμόρφωση αφορά μόνο τη φάση του εισερχόμενου κύματος θα έχουμε **ολόγραμμα διαμόρφωσης φάσης (PM-phase Modulation)**.



Η διαμόρφωση κατά πλάτος μπορεί εύκολα να γίνει με φωτογραφικό υλικό ανακλαστικότητας ανάλογης της έντασης του προσπίπτοντος φωτός, ενώ διαμόρφωση φάσης επιτυγχάνεται με μεταβαλλόμενο πάχος του φωτογραφικού φιλμ από σημείο σε σημείο.

Τα ολογράμματα φάσης εισάγουν λιγότερο θόρυβο από τα ολογράμματα πλάτους αλλά και τα δύο είδη δημιουργούν διπλό (φανταστικό και πραγματικό) είδωλο του αντικειμένου. Μπορούμε όμως να έχουμε διαμόρφωση κατά φάση και πλάτος με ταυτόχρονη μεταβολή του πάχους και της ανακλαστικότητας του φιλμ κατά τη διαδικασία κατασκευής του ολογράμματος. Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε τη δημιουργία ενός μόνο ειδώλου του αντικειμένου (όπως είναι το ολόγραμμα που θα κατασκευαστεί εδώ).

(5) Ανάλογα με το είδος της σκέδασης φωτός που δημιουργεί την εικόνα συμβολής πάνω στο φωτογραφικό φιλμ τα ολογράμματα διακρίνονται σε ολογράμματα Fresnel, Fraunhofer, Fourier και quasi-Fourier.

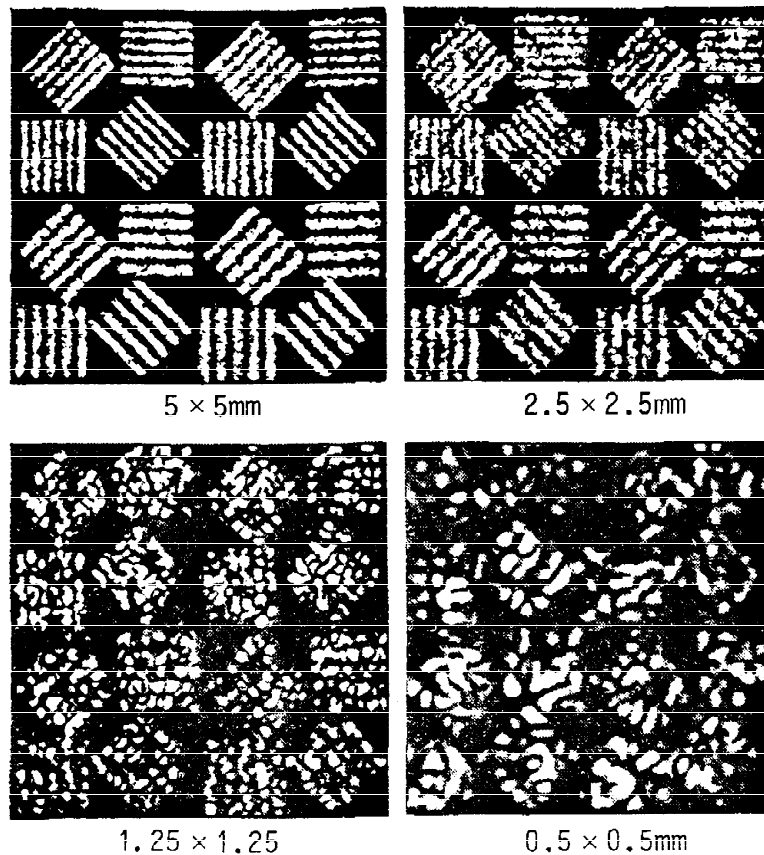
Στα πιο πολλά ολογράμματα έχουμε συνδυασμό όλων των παραπάνω τύπων, αλλά σε πολλές περιπτώσεις ένα είδος υπερτερεί έναντι των άλλων οπότε και χαρακτηρίζεται αντίστοιχα. Έτσι όταν το αντικείμενο είναι κοντά στο φιλμ έχουμε ολόγραμμα Fresnel. Αν είναι μακριά ή οι διαστάσεις του είναι μικρές ως προς την απόσταση, δημιουργείται με συνθήκες περίθλασης Fraunhofer και ονομάζεται αντίστοιχα. Αν χρησιμοποιούνται φακοί για τη δημιουργία ειδώλου πάνω στο ολόγραμμα λέγεται ολόγραμμα Fourier. Αν τέλος δημιουργείται με άλλους τρόπους εκτός από φακό (π.χ. με οπτικό φράγμα περίθλασης) λέγεται ολόγραμμα quasi-Fourier. Έτσι ένα επίπεδο ολόγραμμα που συμπεριφέρεται σαν ένα οπτικό φράγμα περίθλασης δημιουργεί ολογράμματα quasi-Fourier.

## 2.4 Ιδιότητες ολογραμμάτων

Θα αναφερθούμε τώρα για λίγο σε μερικές από τις πιο χαρακτηριστικές ιδιότητες των ολογραμμάτων (χωρίς αυτό να σημαίνει ότι εξαντλούμε όλο το φάσμα των ιδιοτήτων).

(1) Κάθε μικρό κομμάτι ενός ολογράμματος μπορεί να αναπαράγει μια πλήρη εικόνα ολόκληρου του αντικειμένου, αν φωτιστεί από κατάλληλη γωνία με τη δέση αναφοράς. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να εξηγηθεί εύκολα από

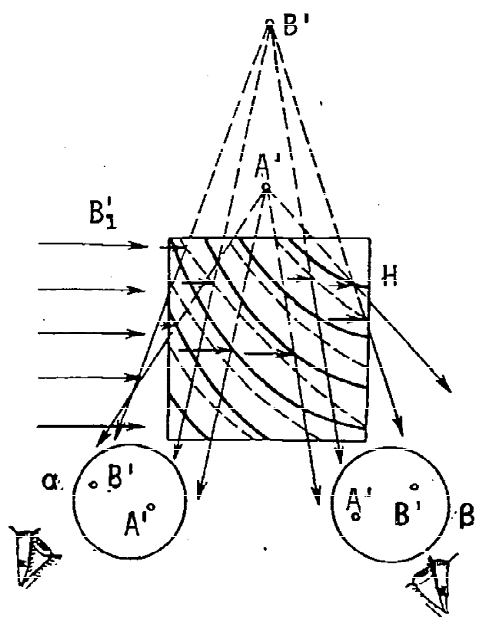
το γεγονός ότι σε κάθε περιοχή του ολογράμματος έχει αποτυπωθεί η πλήρης εικόνα του κύματος. Φυσικά ένα μικρότερο κομμάτι ολογράμματος αναγκαστικά αναπαράγει το αντικείμενο υπό μικρότερη οπτική γωνία και



Σχ.9 Διάφορες όψεις του ανακατασκευασμένου αντικειμένου όπως φαίνεται από διαδοχικά μικρότερα κομμάτια του αρχικού ολογράμματος<sup>1</sup>.

η πιστότητα της αναπαραγωγής του αντικειμένου δεν είναι τόσο καλή όσο με ολόκληρο το ολόγραμμα αφού στη μικρότερη επιφάνεια του φιλμ, έχει αποτυπωθεί λιγότερη ποσότητα κύματος.

(2) Ένα ολόγραμμα μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα της σύγχρονης συμβολής πολλών ολογραμμάτων που δημιουργούνται από κάθε σημείο του σώματος. Τα πλάτη των κυμάτων προστίθενται σύμφωνα με τον τρόπο υπέρθεσης των πλατών. Αν τώρα προσθέσουμε ασύμφωνα περισσότερες από μία εικόνες πάνω στο ίδιο ολόγραμμα, οι επιμέρους εικόνες μπορούν να αναπαραχθούν μία προς μία. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να καταγράψουμε διαφορετικά αντικείμενα στο ίδιο ολόγραμμα ή το ίδιο αντικείμενο σε διαδοχικές θέσεις, επιτυγχάνοντας έτσι έναν τρόπο σύγκρισης για τις



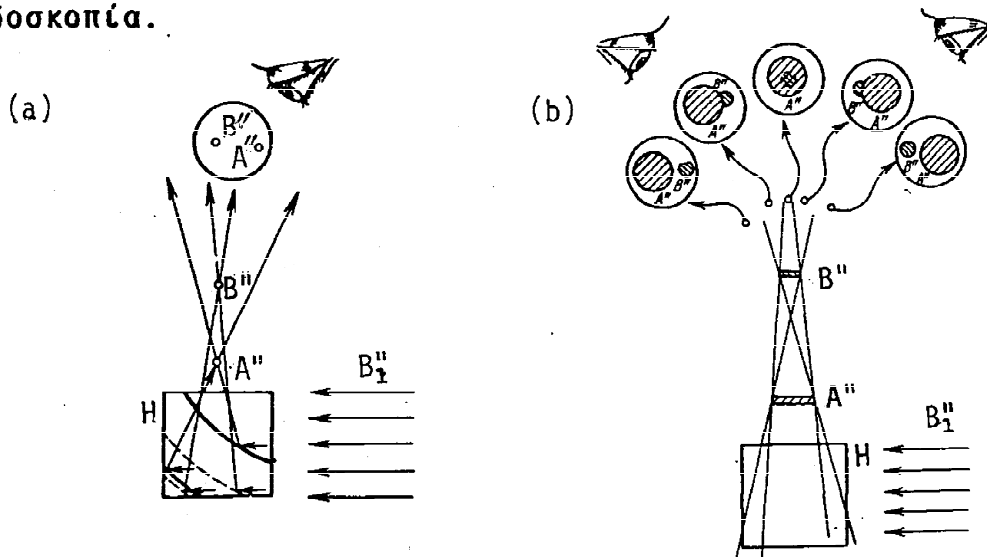
Σχ. 10 Ανακατασκευή δύο σημείων ( $A', B'$ ) του αντικειμένου από δύο διαφορετικές θέσεις παρατήρησης ( $\alpha, \beta$ )<sup>2</sup>. Τα είδωλα είναι φανταστικά. Σαν δέσμη αναφοράς χρησιμοποιείται η αρχική δέσμη  $B_1'$ .

τυχόν μεταβολές που επήλθαν στο μεταξύ (π.χ. ταλάντωση ή μετακίνηση του αντικειμένου, ανάπτυξη φυτού κλπ.).

(3) Το ολόγραμμα δημιουργεί μια πραγματική τρισδιάστατη αντίληψη του αντικειμένου. Έτσι ο παρατηρητής μπορεί να δει δύο αντικείμενα με διαφορετική διάταξη (Σχ.10) ακριβώς όπως θα τα έβλεπε από διαφορετικές θέσεις.

(4) Αν αντιστρέψουμε τη δέσμη αναφοράς στο ολόγραμμα της προηγούμενης περίπτωσης δημιουργούνται δύο πραγματικά αντικείμενα  $A'', B''$  (Σχ. 11a). Ο παρατηρητής βλέπει το αντικείμενο που είναι κοντύτερα σ' αυτόν  $B''$  να επικαλύπτεται από το μακρύτερο αντικείμενο  $A''$  όπως φαί-

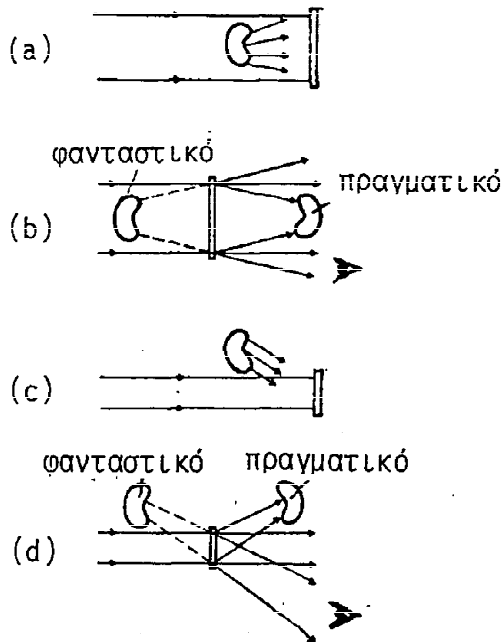
νεται στο Σχ.11b. Για το φαινόμενο αυτό έχει υιοθετηθεί ο όρος ψευδοσκοπία.



Σχ. 11 (a) Ανακατασκευή πραγματικού αντικειμένου (δύο σημεία  $A'', B''$ ) με φωτισμό  $B_1''$  από την αντίθετη φορά της δέσμης αναφοράς  $B_1'^2$ . Ο παρατηρητής βλέπει τώρα το σημείο  $B''$  πιο κοντά από το  $A''$  (σύγκρισε με Σχ.10). (b) Παρατήρηση δύο πραγματικών αντικειμένων  $A'', B''$  από απόσταση. Το κοντινότερο αντικείμενο  $B''$  επικαλύπτεται από το πιο μακρινό  $A''$ .

## 2.5 Τρόποι κατασκευής ολογραμμάτων

Η διαδικασία που αρχικά προτάθηκε από τον Gabor για τη δημιουργία ολογραμμάτων απαιτούσε οι δύο δέσμες αντικειμένου και αναφοράς να είναι στην ίδια ευθεία (Σχ.12a,b). Ένα μέρος της δέσμης σκεδάζεται από



Σχ. 12 Κατασκευή ολογράμματος (a,c) και ανακατασκευή αντικειμένου (b,d) σύμφωνα με την αρχική διάταξη των Gabor (a,b) και Leith, Upatnieks (c,d)<sup>1</sup>.

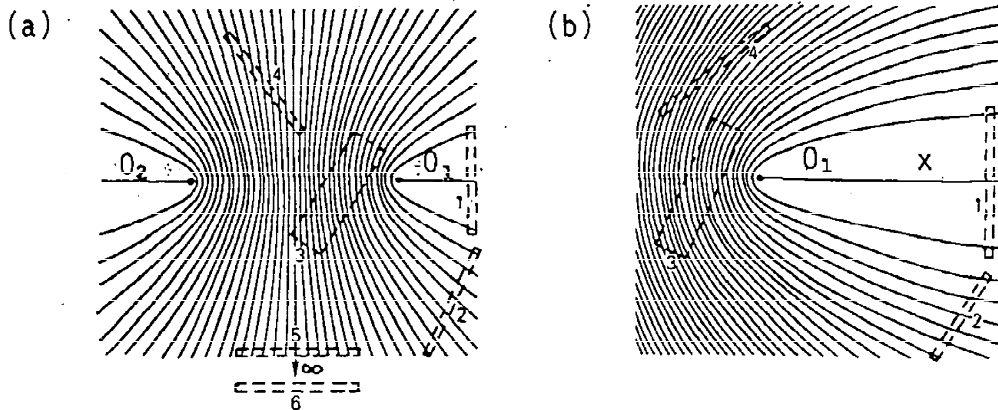
το αντικείμενο και δημιουργεί τη δέση του αντικειμένου που συμβάλλει με την υπόλοιπη δέση (αναφοράς). Η μεγάλη δυσκολία με αυτή τη διάταξη είναι πραγματικά ότι στην ανακατασκευή οι δύο δέσμες που δημιουργούν το φανταστικό και πραγματικό είδωλο διαδίδονται στην ίδια ευθεία με τη δέση αναφοράς, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τη διακριτικότητα της εικόνας.

Σε μια βελτιωμένη έκδοση ο Leith και Upatnieks εισήγαγαν την **ολογραφία χωρισμένης δέσμης (split-beam holography)** ή **έκκεντρη (off axis) ολογραφία**. Σ' αυτή τη διάταξη το αντικείμενο φωτίζεται από διαφορετική γωνία από αυτή της δέσμης αναφοράς (Σχ.12c,d). Αυτό επι-

τυγχάνεται με ένα διαχωριστή δέσμης οπότε προκύπτουν δύο νέα τμήματα. Το φωτογραφικό φιλμ μπορεί να τοποθετηθεί υπό οποιαδήποτε γωνία ως προς τη δέση αναφοράς. Μπορεί ακόμη να τοποθετηθεί ανάμεσα στη δέση αναφοράς και στο αντικείμενο.

Οι διαφορετικοί τρόποι δημιουργίας ολογραμμάτων σε δύο συγκεκριμένες γεωμετρίες φαίνονται στο Σχ.13. Πρόκειται για (a) δύο σημειακές πηγές  $O_1$ ,  $O_2$  και (b) μια επίπεδη δέση και μια σημειακή πηγή  $O_1$ . Για όλες τις θέσεις όπου το επίπεδο του ολογράμματος είναι κάθετο στη γραμμή που ενώνει τις δύο σημειακές πηγές έχουμε τη δημιουργία μιας εικόνας συμβολής με συγκεντρικούς δακτύλιους (ζώνες Fresnel) ή τμήματα

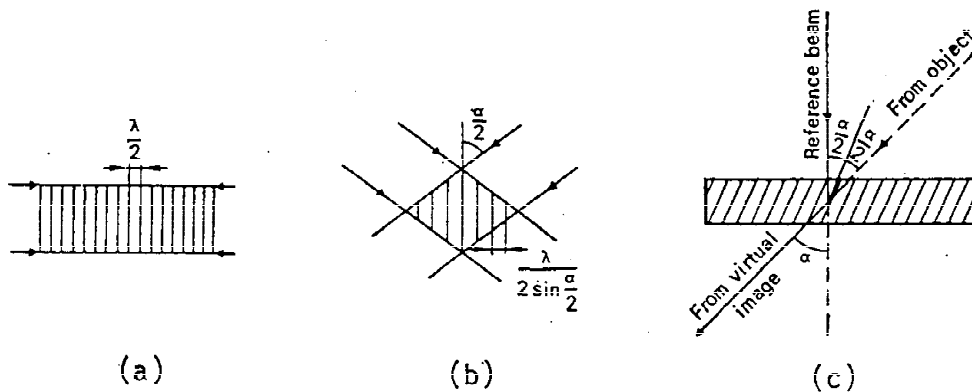
αυτών. Αν το επίπεδο του ολογράμματος είναι παράλληλο στην ευθεία αυτή (Σχ.13,5-6), τότε η εικόνα συμβολής είναι μια οικογένεια από υπερβολές. Αυτή η διάταξη οδηγεί στη δημιουργία ολογράμματος quasi-Fourier (Σχ.13,5).



Σχ.13 Επιφάνειες συμβολής ισοκατανομής έντασης<sup>1</sup> (α) από δύο σημειακές πηγές (υπερβολοειδή εκ περιστροφής με άξονα συμμετρίας τον  $O_1O_2$ ) (β) από μια επίπεδη δέσμη και μια σημειακή πηγή  $O_1$  (παρβολοειδή εκ περιστροφής με άξονες συμμετρίας τον  $O_1X$ ). 1. Ολόγραμμα Gabor. 2. Ολόγραμμα Leith, Upatnieks. 3. Ολόγραμμα Denisjuk. 4. Επίπεδο ολόγραμμα με ανεστραμμένη δέσμη αναφοράς. 5. Ολόγραμμα quasi-Fourier. 6. Ολόγραμμα Fraunhofer.

Αν το φωτογραφικό υλικό έχει πάχος  $d \gg \frac{\lambda}{2}$  έχουμε ως γνωστό τη δημιουργία ολογράμματος όγκου. Ο Denisjuk είχε την ιδέα να χρησιμοποιήσει παχύ φωτογραφικό υλικό για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μέσου αποτύπωσης των κροσσών συμβολής. Η δέσμη αναφοράς και το σκεδαζόμενο φως του αντικειμένου συναντώνται υπό γωνία  $180^\circ$  (Σχ.13,3 και 14a). Οι επιφάνειες σταθερής έντασης φωτός είναι παράλληλες στο επίπεδο του φιλμ και απέχουν απόσταση  $\frac{\lambda}{2}$ . Αν οι δέσμες αναφοράς και αντικειμένου συναντώνται υπό γωνία  $\alpha \neq 180^\circ$  η απόσταση ανάμεσα στις διαδοχικές επιφάνειες θα είναι  $\frac{\lambda}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$  (Σχ.14b), και οι επιφάνειες έντασης θα εί-

ναι παράλληλες της διχοτόμου της γωνίας  $\alpha$  (Σχ.14c). Οι δέσμες που ανακλώνται από διαφορετικές επιφάνειες μιας τέτοιας γεωμετρίας θα συμβάλουν προσθετικά μόνο αν είναι σε φάση, δηλαδή αν η διαφορά των οπτικών τους δρόμων είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος.



Σχ.14 (α) Εικόνα συμβολής δύο αντιθέτων δεσμών φωτός<sup>1</sup>.  
 (β) Συγκλίνουσες δέσμες με γωνία  $\alpha \neq 180^\circ$ .  
 (γ) Ανακατασκευή της δέσμης από ένα τρισδιάστατο ολόγραμμα (όγκου).

Αυτή η συνθήκη, γνωστή ευρύτατα ως **συνθήκη Bragg**, μας εξασφαλίζει ότι έστω κι αν φωτιστεί το ολόγραμμα με φυσικό (λευκό) φως μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος θα ανακατασκευάσει το είδωλο του αντικειμένου. Αλλάζοντας βέβαια τη γωνία πρόσπτωσης θα αλλάζει και το μήκος κύματος που συντονίζεται στις επιφάνειες ισοκατανομής πυκνότητας. Αυτό είναι το είδος ολογράμματος που πρόκειται να κατασκευαστεί στην ενότητα αυτή μάλιστα με διάταξη παρόμοια αυτής που χρησιμοποίησε ο Denisyuk. Δηλαδή το φως του laser θα συναντά το αντικείμενο αφού περάσει μέσα από το φιλμ. Επομένως οι δέσμες αναφοράς και αντικειμένου θα συναντώνται υπό γωνία  $180^\circ$  περίπου. Αν η γωνία ανάμεσα στη δέσμη αναφοράς και αντικειμένου δεν είναι κοντά στις  $180^\circ$  θα έχουμε διαφορετική συμπεριφορά του ολογράμματος όγκου. Έτσι για  $\alpha \leq 10^\circ$  το ολόγραμμα συμπεριφέρεται σαν επίπεδο ολόγραμμα ενώ για  $\alpha \approx 90^\circ$  έχουμε την πιο ευνοϊκή περίπτωση για πολλαπλές εγγραφές ολογραμμάτων υπό διαφορετική γωνία πρόσπτωσης. Αυτή η τεχνική θα μπορούσε πιθανώς να χρησιμοποιηθεί στην ολογραφική κινηματογράφηση. Δεν θα επεκταθούμε όμως περισσότερο στην ανάλυση αυτή αφού ο ενδιαφερόμενος μπορεί να βρει πιο πολλές πληροφορίες στις βιβλιογραφικές αναφορές 1,2,3.

### §3. Περιγραφή οργάνων

Για το ανακλαστικό ολόγραμμα που θα ληφθεί εδώ είναι απαραίτητα τα εξής όργανα και εξαρτήματα.

- Ένας Laser He-Ne ισχύος 1mW (βλ. ενότητα ασκήσεων 1). Ο λόγος που χρησιμοποιούμε Laser για τη δημιουργία ολογραμμάτων ξεκινά από την ανάγκη ύπαρξης χωρικής συμφωνίας (*spatial coherence*) ανάμεσα στη δέσμη αναφοράς και το σκεδαζόμενο φως. Η χωρική συμφωνία της δέσμης προσδιορίζει την ικανότητα ενός τμήματος της δέσμης να συμβάλλει με κάποιο άλλο τμήμα της αφού διανύσουν διαφορετικούς οπτικούς δρόμους. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό μόνο εφόσον η διαφορά φάσης των δύο τμημάτων είναι ανεξάρτητη από το χρόνο. Μια άλλη αιτία για την εκλογή του Laser είναι η χρονική συμφωνία (*time coherence*) που έχει να κάνει με τη μονοχρωματικότητα της δέσμης. Περισσότερα για τις φυσικές ιδιότητες της δέσμης Laser περιλαμβάνονται στην ενότητα 4. Αντί για Laser θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες μονοχρωματικές σημειακές πηγές σε ειδική διάταξη (μικρή γωνία δέσμης). Κάτι τέτοιο θα εξασφάλιζε τη χωρική συμφωνία, αλλά δεν θα επέτρεπε τη χρησιμοποίηση δέσμης μεγάλης ισχύος.
- Ο φορέας μαγνητικής στήριξης των οπτικών οργάνων και του Laser (βλ. ενότητα 1). Στην άκρη του φορέα έχει προσαρμοστεί μια θήκη για την τοποθέτηση των ολογραφικών φιλμ ανάμεσα σε δύο πλάκες από γυαλί. Αυτές έχουν πάχος  $\sim 2.5\text{mm}$  και χρησιμεύουν για να κρατούν επίπεδο και σταθερό το φιλμ ανάμεσά τους. Θα πρέπει να έχουν καθαριστεί προσεκτικά πριν τοποθετηθεί το φιλμ ανάμεσά τους.
- Υπάρχει ένας συγκλίνων φακός εστιακής απόστασης 18 ή 48mm ή ένας αποκλίνων των 22mm. Με τους φακούς αυτούς μπορούμε να δημιουργήσουμε μια αποκλίνουσα δέσμη Laser τόσο ανοικτή όσο χρειάζεται για να καλύπτει το φιλμ. Ο φακός στηρίζεται πάνω σε μαγνητικές βάσεις (βλ. ενότητα 1) και πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε η επιφάνειά του να είναι κάθετη στη δέσμη του Laser. Θα πρέπει να είναι καθαρός προτού χρησιμοποιηθεί. Αν τα διάφορα οπτικά εξαρτήματα δεν είναι καθαρά αποτανθείτε στον επιβλέποντα. Μην ακουμπήσετε το φακό ή τα γυαλιά με τα χέρια σας γιατί είναι δύσκολο να καθαριστούν τα δακτυλικά αποτυπώματα.

- Υπάρχει μια συρταρωτή θήκη όπου μπορείτε να τοποθετήσετε το φιλμ μετά την έκθεσή του για μεταφορά στο σκοτεινό θάλαμο όπου θα εμφανιστεί. Το φιλμ θα σας το παραδώσει αρχικά ο επιβλέπων αφού προηγουμένως ελέγξει αν η διάταξη είναι έτοιμη. Διαλέξτε εσείς το αντικείμενο που θα θέλατε να ολογραφήσετε. Με την ισχύ του laser που διαθέτουμε, για να μην χρειαστεί μεγάλος χρόνος έκθεσης είναι καλύτερα το αντικείμενο να έχει διαστάσεις  $<10\text{cm}$  και να είναι αρκετά ανακλαστικό π.χ. ένα κέρμα ή ένα άλλο μεταλλικό αντικείμενο είναι μια καλή ιδέα. Επίσης υπάρχει καλύτερη φωτεινότητα, αν τοποθετήσουμε ένα άσπρο φύλλο χαρτί πάνω στο τραπέζι και κάτω από τη βάση στήριξης του αντικειμένου.
- Το ειδικό ολογραφικό φιλμ είναι του τύπου Agfa-Gevaert 8E-75HD. Το φιλμ φυλάσσεται σε στεγανή θήκη και σε χαμηλή θερμοκρασία ψυγείου ( $0-7^{\circ}\text{C}$ ) ως την ώρα που θα χρησιμοποιηθεί. Ο επιβλέπων θα σας παραδώσει ένα κομμάτι φιλμ διαστάσεων περίπου  $10 \times 10\text{cm}^2$ . Δεδομένου ότι το φιλμ είναι ευαίσθητο κυρίως στο κόκκινο φως, είναι απαραίτητο να ανοιχτεί και να χρησιμοποιηθεί σε πολύ **χαμηλό**, βοηθητικό φωτισμό μιας **πράσινης** λάμπας. Εμπειρικά μπορούμε να πούμε ότι ένας βοηθητικός φωτισμός από πράσινη λάμπα όπου μόλις διακρίνονται τα αντικείμενα (όταν συνηθίσει το μάτι) είναι κατάλληλος για τη δημιουργία του ολογράμματος. Ολόκληρος ο χώρος του εργαστηρίου θα φωτίζεται με πράσινο φως από τις ειδικές λάμπες των πορτατίφ που θα έχουν προβλεφτεί. Με τη βοήθεια του ρεοστάτη κατεβάστε την ένταση του φωτισμού στο χαμηλότερο αναγκαίο επίπεδο. Για την εμφάνιση του φιλμ υπάρχουν διάφορα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στον ειδικό σκοτεινό θάλαμο του εργαστηρίου. Ο τρόπος εμφάνισης και τα υλικά αναφέρονται παρακάτω στη διεξαγωγή της άσκησης.

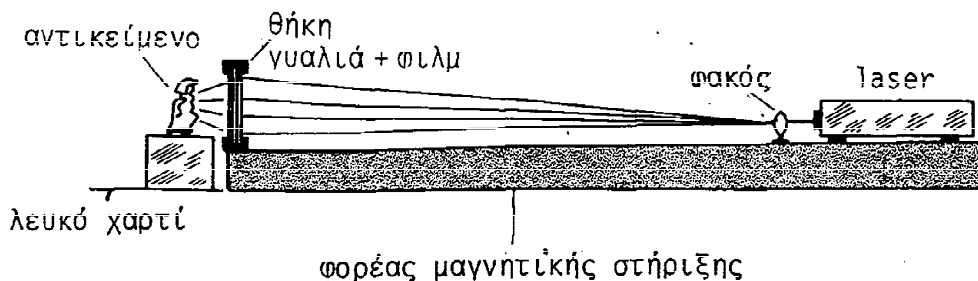
#### §4. Λήψη ολογράμματος

##### 4.1 Διάταξη - Προετοιμασία - Λήψη ολογράμματος

- Τοποθετείστε στην άκρη του φορέα τον laser και ανάψτε τον αμέσως. Χρειάζεται τουλάχιστον μισή ώρα για να σταθεροποιηθεί η έντασή του. Στην άλλη άκρη του φορέα βρίσκεται η θήκη που θα μπουν τα γυαλιά με το φιλμ.



- Βεβαιωθείτε ότι ο φακός που θα χρησιμοποιήσετε καθώς και τα γυαλιά που θα συγκρατούν το φιλμ της ολογραφίας είναι καθαρά. Αν χρειάζεστε βοήθεια δείτε τον επιβλέποντα.
- Ζητείστε από τον επιβλέποντα να σας δώσει ένα φωτόμετρο για να μετρήσετε την ισχύ του laser ως και την απόδοση (ο λόγος της εξερχόμενης προς την εισερχόμενη ισχύ) των οπτικών (φακός και γυαλιά). Αυτές οι μετρήσεις θα σας χρειαστούν για να εκτιμήσετε πόση είναι η ωφέλιμη ισχύς για τη δημιουργία του ολογράμματος. Οι πληροφορίες αυτές πιθανόν να σας δοθούν και απευθείας από τον επιβλέποντα.
- Τοποθετήστε το φακό στη δέσμη του laser έτσι ώστε η ανακλώμενη κωνική δέσμη να επιστρέφει στην έξοδο της δέσμης (η δέσμη τότε πρέπει να περνά περίπου από το κέντρο του φακού). Με σβηστά φώτα παρατηρείστε το φως του laser όπως προβάλλεται σε μακρινή απόσταση (π.χ. τον απέναντι τοίχο). Εχει ανοίξει αρκετά; Είναι συμμετρική η εικόνα; Από την εικόνα της ανοιγμένης δέσμης θα καταλάβετε επίσης πόσο καθαρός είναι ο φακός. Αν δείτε μεγάλη ανομοιομορφία στην κατανομή της έντασης ξανακαθαρίστε το φακό πολύ προσεκτικά. Τονίζεται ότι η οποιαδήποτε διακύμανση στην κατανομή της έντασης θα επηρεάσει την ποιότητα του ολογράμματος που θα κατασκευάσετε.
- Ρυθμίστε την απόσταση του φακού από τα γυαλιά έτσι ώστε η διάμετρος της δέσμης πάνω στα γυαλιά μόλις να ξεπερνά τις τυπικές διαστάσεις του αντικειμένου. Μετρείστε τη διάμετρο της δέσμης πάνω στα γυαλιά. Από την απόδοση των οπτικών (φακού, γυαλιών) και την ισχύ της δέσμης του laser υπολογίστε τη φωτεινή ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας πάνω στο φιλμ. Το φιλμ που θα χρησιμοποιήσετε χρειάζεται, στη συχνότητα του φωτός του laser He-Ne ( $6328 \text{ \AA}$ ), περίπου  $800 \text{ erg/cm}^2$  για μια καλή ολογράφηση. Από την τιμή αυτή υπολογίστε πόσο χρόνο έκθεσης χρειάζεστε για ένα καλό ολόγραμμα. Περισσότερος χρόνος έκθεσης θα μειώσει το contrast του ολογράμματος.
- Βρείτε ένα τρόπο στήριξης του αντικειμένου που θα ολογραφήσετε. Τοποθετήστε κάτω από τη βάση στήριξης του ένα άσπρο χαρτί για να αυξηθεί η ανακλαστικότητα της περιοχής. Τοποθετήστε το αντικείμενο περίπου 5cm πίσω από την επιφάνεια των γυαλιών (Σχ.15). Όταν είστε



Σχ.15 Διατάξη έτοιμη για τη λήψη ολογράμματος.

έτοιμοι καλέστε τον επιβλέποντα να ελέγξει τη διάταξη και το χρόνο έκθεσης που υπολογίσατε.

- Ελέγξτε αν έχετε τον κατάλληλο φωτισμό δωματίου (πολύ αμυδρό πράσινο φως από το πορτατίφ και σβηστά όλα τα λευκά φώτα της οροφής). Βεβαιωθείτε ότι έχετε μηχανική σταθερότητα σε όλο το μήκος της διάταξης.
- Διακόψτε την πορεία της δέσμης προς τα γυαλιά με κάποιο σκούρο χαρτόνι ή ένα οποιοδήποτε αδιαφανές αντικείμενο. Βεβαιωθείτε όμως ότι η προσθαφαίρεση αυτού, δεν θα δημιουργήσει τον παραμικρό κραδασμό.
- Με μόνο το βοηθητικό φωτισμό (αμυδρό πράσινο φως) παραλάβετε το φιλμ. Στο σημείο αυτό κάποιος θα πρέπει να προσέχει ώστε μην μπει κανείς στο χώρο σας για τα επόμενα 5 λεπτά περίπου. Αποσφραγίστε το φιλμ και τοποθετείστε το προσεκτικά ανάμεσα στα δύο παράθυρα χωρίς να ακουμπήσετε με τα δάκτυλά σας παρά τις άκρες του φιλμ και των γυαλιών. Σφίξτε τα γυαλιά με το φιλμ πολύ δυνατά (χρησιμοποιώντας χαρτί για να μη λερωθούν τα γυαλιά) έτσι ώστε να αφαιρεθεί όλος ο αέρας από το χώρο ανάμεσα στο φιλμ και τα γυαλιά. Η ύπαρξη μικρής ποσότητας αέρα είναι ικανή να αλλοιώσει την εικόνα του ολογράμματος.
- Τοποθετείστε τα παράθυρα με το φιλμ στη θέση της θήκης και περιμέ-

νετε 1-2 λεπτά να πάψει να ταλαντεύεται το σύστημα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αποφεύγονται οποιεσδήποτε απότομες κινήσεις που μπορούν να προκαλέσουν ταλαντώσεις του οπτικού συστήματος. Προφανώς δεν θα πρέπει να ακουμπά κανείς πάνω στη μεταλλική μαύρη πλατφόρμα του εργαστηριακού πάγκου.

- Ανασηκώστε λίγο το σκούρο χαρτόνι που μπλοκάρει τη δέσμη χωρίς να αφήσετε να περάσει το φως. Περιμένετε περίπου 30sec και τότε ανασηκώστε τελείως το χαρτόνι και εκθέστε το φιλμ στη δέσμη, για όσο χρονικό διάστημα έχετε υπολογίσει. Ξανακαλύψτε τη δέσμη του laser.
- Ελευθερώστε προσεκτικά το φιλμ από τα γυαλιά χωρίς να το ακουμπήσετε με τα χέρια σας παρά μόνο στις άκρες του και τοποθετείστε το στην ειδική θήκη που έχει προβλεφτεί. Δώστε το στον επιβλέποντα για εμφάνιση.

#### 4.2 Εμφάνιση του φιλμ

Η εμφάνιση θα γίνει από τον επιβλέποντα παρουσία των σπουδαστών. Περιλαμβάνει τις εξής διαδικασίες:

- Εμφάνιση σε υλικό Kodak D-8 για 5 λεπτά.
- Ξέβγαλμα του φιλμ σε τρεχούμενο νερό για 5 λεπτά περίπου.
- Ξάσπρισμα για 2 λεπτά ή ωσότου γίνει διαφανές.
- Ξέβγαλμα πάλι σε τρεχούμενο νερό (~2 λεπτά).
- Στράγγισμα του φιλμ από το νερό και στέγνωμα.

#### §5. Παρατήρηση του ολογράμματος

- Στεγνώστε καλά το φωτογραφικό φιλμ (περίπου για 15 λεπτά) μετά το μπάνιο σε νερό). Αλλάξτε την πράσινη λάμπα του πορτατίφ και βάλτε λευκή. Κρατείστε το φιλμ προσεκτικά από την άκρη και φωτίστε το με το λευκό φως υπό γωνία. Πιθανό να μην δείτε τίποτε αν το φιλμ δεν έχει στεγνώσει τελείως. Κανονικά θα πρέπει να δείτε **από τη μεριά της πηγής μέσα από το ολόγραμμα** μια τρισδιάστατη αναπαράσταση του αρχικού αντικειμένου. Το χρώμα του αντικειμένου θα είναι κόκ-

κινο, αλλά μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης του λευκού φωτός θα πρέπει να βλέπετε επίσης πράσινες αποχρώσεις του αντικειμένου.

Εκ κατασκευής το ολόγραμμά σας είναι ανακλαστικό ολόγραμμα. Γι' αυτό θα παρατηρείτε φανταστικό είδωλο. Επίσης είναι ολόγραμμα όγκου αφού το φιλμ είναι παχύ και οι διάφορες επιφάνειες ισοκατανομής πυκνότητας μέσα στο υλικό του φιλμ δρουν σαν φίλτρο και ανακλούν μόνο μια συχνότητα από το προσπίπτον λευκό φως για κάθε προσανατολισμό του ολογράμματος.

- Φωτίστε το ολόγραμμά σας από την αντίθετη πλευρά παρατήρησης. Κανονικά δεν θα πρέπει να βλέπετε τίποτε. Αν το φωτίσετε από την αντίθετη πλευρά και το παρατηρήσετε από την ίδια μεριά βλέπετε τίποτε; Σχολιάστε.
- Καλύψτε το μεγαλύτερο κομμάτι από το ολόγραμμά σας με κάποια αδιαφανή επιφάνεια και φωτίστε το υπόλοιπο μικρό κομμάτι με τη λευκή λάμπα. Θα πρέπει να βλέπετε πάλι το αρχικό αντικείμενο. Χρησιμοποιείστε ένα διαφορετικό μικρό κομμάτι του φιλμ. Θα πρέπει πάλι να βλέπετε το αντικείμενο από διαφορετική γωνία. Και στις δύο περιπτώσεις το αντικείμενο θα αναπαριστάται πιο άσχημα από ότι με ολόκληρο το ολόγραμμα. Αν υπάρχουν κεντρικά τμήματα του ολογράμματος όπου το αντικείμενο δεν αναπαράγεται ή αναπαράγεται πολύ θολά αυτό θα σημαίνει ότι κάποιο λάθος έχετε κάνει στη διάρκεια της κατασκευής του. Μπορείτε να κρίνετε τότε ποιά είναι η πιθανή αιτία;
- Γενικά κρίνετε πόσο καλά αναπαριστά το ολόγραμμά σας το αντικείμενο.

## §6. Ερωτήσεις

Με τη βοήθεια της θεωρίας που αναπτύσσεται σ' αυτή την ενότητα και τη δική σας εμπειρία από την ολογραφία προσπαθείστε να απαντήσετε τις παρακάτω ερωτήσεις:

- Πόσο εξαρτάται η επιτυχία του ολογράμματος από τυχόν ταλαντώσεις του τραπεζιού, της δέσμης, του φιλμ και του αντικειμένου (τέσσερις απαντήσεις). Πόσο πλάτος ταλάντωσης του αντικειμένου αρκεί για να χαλάσει το ολόγραμμα; Καταλαβαίνετε ποιά είναι η αρχή της **ολογραφικής συμβολομετρίας**;

- Αν αντί για ολόγραμμα ανάκλασης κάνατε ολόγραμμα διέλευσης θα ήταν πιο ευαίσθητο στις ταλαντώσεις των διαφόρων τμημάτων και γιατί;
- Πόσο νομίζετε μπορεί να επηρεάσει την επιτυχία του ολογράμματος ένα απρόσεκτο στέγνωμα του φιλμ και γιατί;
- Αν φωτίσετε το ολόγραμμά σας με μονοχρωματικό φως τί περιμένετε να δείτε και γιατί;
- Μπορείτε να δημιουργήσετε με το ολόγραμμά σας ένα πραγματικό είδωλο;
- Αν αντί για τον μικρό laser He-Ne χρησιμοποιούσατε ένα ισχυρότερο laser (π.χ. τον Dye laser του εργαστηρίου, Φυσικής ΙΙΙ ισχύος ~200 mW) τί θα κερδίζατε;
- Πόσο ισχυρό laser νομίζετε ότι θα θέλατε για το πλήρες ολόγραμμα ενός ανθρώπου;
- Βρήκατε την άσκηση ενδιαφέρουσα; Έχετε δικές σας ιδέες για την ολογραφία;

### §7. Βιβλιογραφία

1. Yu.Ostrovsky, *Holography and its Applications*, Mir Publ., Moscow, 1977.
2. L.M.Soroko, *Holography and Coherent Optics*, Plenum Press, 1980.
3. *Handbook of Optical Holography*, 1979 Academic Press, edited by H.J.Caulfield.
4. Tung H.Jeong, *Holography using a He-Ne laser*, (private).