



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

υπό
ΦΩΤΙΟΥ ΣΤΡΑΤΗΓΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

υπό
ΦΩΤΙΟΥ ΣΤΡΑΤΗΓΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021

© 2021 Φώτιος Στρατηγός

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Γεώργιος Σαχαρίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Δημήτριος Παντελής
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΦΩΤΙΟΣ ΣΤΡΑΤΗΓΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Σαχαρίδης,
Αναπληρωτής Καθηγητής Επιχειρησιακής Έρευνας

Περίληψη

Η ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο οπτικής μετρολογίας που χρησιμοποιείται στον μη καταστρεπτικό έλεγχο και την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού. Συνιστά αντικείμενο έρευνας για την μελέτη σύνθετων υλικών στους τομείς της μηχανικής και της βιομηχανικής.

Στην εργασία αρχικά αναπτύσσονται οι βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, της οπτικής και της μικροσκοπικής ανάλυσης του φωτός στις οποίες στηρίζεται η τεχνολογία της ολογραφίας. Στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος της αναλογικής ολογραφίας. Με βάση την προηγούμενη ενότητα παρουσιάζεται η εξέλιξη στην ψηφιακή ολογραφία. Αναπτύσσονται οι βασικές διαφορές με την αναλογική ολογραφία καθώς και τα χαρακτηριστικά που προσφέρει στην μέθοδο η επεξεργασία μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η εργασία ολοκληρώνεται με την περιγραφή των θεμελιωδών αρχών της ψηφιακής ολογραφικής συμβολομετρίας και την παρουσίαση από την βιβλιογραφία, δύο πειραματικών δοκιμών ανάλυσης παραμορφώσεων σε δύο διαφορετικά υλικά.

Τα αποτελέσματα συγκρινόμενα με αυτά της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, επιβεβαιώνουν την απόδοση και την ακρίβεια της μεθόδου.

Λέξεις-κλειδιά: περίθλαση, συμβολή, ολογραφία, ψηφιακή ολογραφία, ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία μη καταστρεπτικός έλεγχος, μη καταστρεπτική εκτίμηση, ανάλυση παραμορφώσεων

DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY IN STRAIN ANALYSIS

FOTIOS STRATIGOS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2021

Supervisor: Dr. Georgios Saharidis,
Associate Professor of Operational Research

Abstract

Digital holographic interferometry is a contemporary method of optical metrology used in non destructive testing and evaluation of mechanical properties. It became a point for the studies on complex engineering and bioengineering materials.

The present study begins by exposing the fundamentals of electromagnetic, optic and light microscopic theory which consist the basis of holography. Then the method of analog holography. Based on the above, the study continues by presenting digital holography. The basic differences with optical holography are noticed as well as the characteristics that digital processing added to the method. Finally, the description of digital holographic interferometry (DHI) fundamentals is leading to the presentation of two experimental measurements for strain analysis in two different materials, from optical metrology bibliography.

The experiment results are compared with these of a finite element method, validating DHI as a precise and efficient evaluating method.

Keywords: diffraction, interference, holography, digital holography, digital holographic interferometry non destructive testing, non destructive evaluation, strain analysis

Πίνακας περιεχομένων

1	Φως	1
1.1	Εισαγωγή	1
1.1.1	Ηλεκτρομαγνητισμός και κυματική θεωρία	1
1.1.2	Ένταση Ακτινοβολίας (Irradiance)	8
1.1.3	Σωματιδιακή φύση και φωτόνια	9
1.1.4	Εκπομπή φωτονίων	10
1.1.5	Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	14
1.2	Φαινόμενα διάδοσης του φωτός	18
1.2.1	Ανάκλαση	19
1.2.2	Διάθλαση	19
1.2.3	Συμβολή	22
1.2.4	Περίθλαση	26
1.3	Τεχνολογία LASER	30
1.4	Συμπεράσματα	32
2	Ολογραφία	33
2.1	Εισαγωγή	33
2.2	Βασικές αρχές ολογραφίας	33
2.3	Ιστορική αναδρομή	39
2.4	Βασικές κατηγορίες ολογραμμάτων	47
2.4.1	Βάθος εγγραφής και Ανασκευή	47
2.4.2	Διαμορφωμένη παράμετρος (Modulated parameter)	48
2.4.3	Διάταξη	49
2.4.4	Τμηματικές και πολλαπλές εγγραφές	51
2.4.5	Χαρακτηριστικά πηγής	51
2.5	Το μέσον εγγραφής	52
2.5.1	Διαλύματα αλογονιδίων του αργύρου (Silver halide emulsions)	52
2.5.2	Διεργασία διαλυμάτων αλογονιδίων αργύρου (Silver halide emulsion processing)	57
2.5.3	Διχρωμικές ζελατίνες (Dichromated gelatins DCG)	61
2.5.4	Φωτοπολυμερή (Photopolymers)	64
2.5.5	Φωτοαντιστατικά υλικά (Photoresists)	65
2.5.6	Θερμοπλαστικά (Thermoplastics)	66

2.6	Συμπεράσματα.....	68
3	Ψηφιακή ολογραφία.....	69
3.1	Εισαγωγή.....	69
3.2	Θεωρία ανάλυσης εικόνας.....	70
3.3	Επεξεργασία ψηφιακής εικόνας - Χωρικά φίλτρα.....	74
3.4	Αισθητήρες.....	76
3.4.1	Αισθητήρες CCD.....	76
3.4.2	Αισθητήρες CMOS.....	78
3.5	Εγγραφή ψηφιακού ολογράμματος.....	79
3.5.1	Βασικές εξισώσεις ψηφιακής ολογραφίας.....	79
3.5.2	Συνθήκη Shannon.....	81
3.5.3	Χρόνος έκθεσης.....	82
3.5.4	Αποδιαμόρφωση ψηφιακού ολογράμματος.....	83
3.6	Ανασκευή ψηφιακού ολογράμματος.....	87
3.6.1	Διάδοση οπτικού κύματος.....	87
3.6.2	Αριθμητική ανασκευή.....	91
3.6.3	Διακριτή μετατροπή Fresnel (Discrete Fresnel Transform - DFT)	91
3.6.4	Συνέλιξη (Convolution)	94
3.7	Συμπεράσματα.....	95
4	Ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων.....	96
4.1	Εισαγωγή.....	96
4.2	Βασικές αρχές ολογραφικής συμβολομετρίας.....	96
4.3	Ολογραφική συμβολομετρία στον μη καταστρεπτικό έλεγχο.....	101
4.4	Ολογραφική συμβολομετρία στην εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων.....	104
4.4.1	Ειδική θεωρία τρισδιάστατης ψηφιακής ολογραφικής συμβολομετρίας για την ανάλυση παραμορφώσεων.....	104
4.4.2	Πειραματική διάταξη.....	108
4.4.3	Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων σε πλάκα αλουμινίου.....	110
4.4.4	Αποτελέσματα ανάλυσης παραμορφώσεων σε οστικό ιστό.....	116
4.5	Συμπεράσματα.....	123
	Βιβλιογραφία.....	125
	Παράρτημα.....	130

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1	Ορατό φως: Μήκη κύματος και συχνότητες χρωμάτων	16
Πίνακας 2.1	Συστατικά διαλυμάτων ανάπτυξης για διαλύματα αλογονιδίων αργύρου	59

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Ηλεκτρομαγνητικό κύμα	5
Σχήμα 1.2	Επίπεδο κύμα	6
Σχήμα 1.3	Αλλοίωση σφαιρικού μετώπου	7
Σχήμα 1.4	Κυλινδρικό κύμα	7
Σχήμα 1.5	Ατομικό μοντέλο του Schrödinger	10
Σχήμα 1.6	Ατομική εκπομπή φωτονίου	12
Σχήμα 1.7	Ατομική εκπομπή φωτονίου	13
Σχήμα 1.8	Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και ορατό φως	14
Σχήμα 1.9	Θερμογραφία ανθρώπινου σώματος	15
Σχήμα 1.10	Ορατό φως	16
Σχήμα 1.11	Ανάκλαση και διάθλαση	20
Σχήμα 1.12	Αρχή του Huygens	21
Σχήμα 1.13	Διάταξη πειράματος Young και προφίλ συμβολής	25
Σχήμα 1.14	Ενισχυτική και Καταστρεπτική συμβολή	25
Σχήμα 1.15	Συμβολή δύο σημειακών πηγών σφαιρικών κυμάτων	26
Σχήμα 1.16	Περίθλαση δέσμης φωτός από δύο οπές	27
Σχήμα 1.17	Πηγή laser και φράγμα περίθλασης	28
Σχήμα 1.18	Ατομικό πλέγμα και γωνία Bragg	29
Σχήμα 1.19	Τομή διάταξης laser Ηλίου - Νέου	31
Σχήμα 2.1	Εγγραφή ολογράμματος	34
Σχήμα 2.2	Ανασκευή ολογράμματος	35
Σχήμα 2.3	Φράγμα περίθλασης και τάξεις περίθλασης	36
Σχήμα 2.4	Τάξεις περίθλασης	36
Σχήμα 2.5	Ανασκευή ολογράμματος	37
Σχήμα 2.6	Διάταξη εγγραφής ολογράμματος του Gabor (in line holography)	39
Σχήμα 2.7	Το πρώτο ολόγραμμα του Gabor	40

Σχήμα 2.8	Διάταξη ανασκευής ολογράμματος του Gabor (in line holography)	41
Σχήμα 2.9	Διάταξη εγγραφής των Leith & Upatnieks (off axis holography)	42
Σχήμα 2.10	Διάταξη ανασκευής των Leith & Upatnieks (off axis holography)	42
Σχήμα 2.11	Ανασκευή ολογράμματος εκτός άξονα	43
Σχήμα 2.12	Διάταξη εγγραφής ολογράμματος Denisjuk (reflection holography)	43
Σχήμα 2.13	Εγγραφή, Ανασκευή και Παρατήρηση ολογραμμάτων Gabor (in line), Denisjuk (reflection), Leith/Upatnieks (off axis)	44
Σχήμα 2.14	(a) Προφίλ Συμβολής. (b) Εγγραφή ολογράμματος μετάδοσης - Κάθετη διεύθυνση κροσσών (c) Ανασκευή ολογράμματος μετάδοσης. (d) Εγγραφή ολογράμματος ανάκλασης - Παράλληλη διεύθυνση κροσσών (e) Ανασκευή ολογράμματος ανάκλασης	45
Σχήμα 2.15	Βάθος εγγραφής και κατεύθυνση κροσσών συμβολής	48
Σχήμα 2.16	Βασική δομή διαλύματος αλογονιδίων αργύρου σε φιλμ	53
Διάγραμμα 2.1	Τυπική καμπύλη H & D για φωτογραφικό φιλμ	55
Διάγραμμα 2.2	Χαρακτηριστικές καμπύλες για ολογραφικά διαλύματα VRP-M (μαύρη γραμμή) και PFG-01 (γκρι γραμμή) της εταιρίας Slavich	56
Σχήμα 2.17	Διεργασία διαλυμάτων αλογονιδίων του αργύρου	58
Σχήμα 2.18	Έκθεση κι ανάπτυξη DCG ολογράμματος	62
Διάγραμμα 2.3	Απόδοση περίθλασης προς ενέργεια έκθεσης για τρεις διαφορετικές DCG	63
Διάγραμμα 2.4	Απόδοση περίθλασης προς το χρόνο έκθεσης σε υψηλή υγρασία για DCG ολογράμματα διαφορετικών συνθηκών ξήρανσης σε φούρνους	63
Σχήμα 2.19	Διαστρωμάτωση φωτοπολυμερούς μέσου εγγραφής	64
Σχήμα 2.20	Εγγραφή ολογράμματος σε φωτοπολυμερές	65
Σχήμα 2.21	Συμπεριφορά θετικού και αρνητικού φωτοαντιστατικού υλικού στην ολογραφική έκθεση	66
Διάγραμμα 2.5	Απόδοση περίθλασης και λόγος σήματος/θορύβου για θερμοπλαστικό υλικό	67
Σχήμα 3.1	Δημιουργία ψηφιακής εικόνας	70
Σχήμα 3.2	Ανάλυση εικόνας	71
Σχήμα 3.3	Εικόνα και βάθος ψηφίων	72
Σχήμα 3.4	Μοντέλα RGB και CMYK	73
Σχήμα 3.5	Μοντέλα HSV και L*a*b*	73

Σχήμα 3.6	Φίλτρο συνέλιξης	75
Διάγραμμα 3.1	Κβαντική απόδοση για αισθητήρες CCD	77
Σχήμα 3.7	Διάταξη CCD	78
Σχήμα 3.8	Γεωμετρία εγγραφής ψηφιακού ολογράμματος	80
Σχήμα 3.9	Όροι περίθλασης στο επίπεδο των συχνοτήτων	83
Σχήμα 3.10	Ολόγραμμα παράλληλης μεταβολής φάσης	85
Σχήμα 3.11	Ολόγραμμα παράλληλης μεταβολής φάσης	86
Διάγραμμα 3.2	Ροή για τον αλγόριθμο S - FFT	92
Σχήμα 3.12	Μηδενική Επένδυση (Zero – Padding Effect) στην ανασκευασμένη εικόνα νομίσματος	93
Διάγραμμα 3.3	Ροή για τον αλγόριθμο D - FFT	94
Σχήμα 4.1	Απεικόνιση γεωμετρικών μεγεθών για τον υπολογισμό της σχέσης φάσης και μεταβολής οπτικής διαδρομής	96
Σχήμα 4.2	(α) Ολόγραμμα αναφοράς, (β) Ολόγραμμα διέγερσης, (γ) Φάση αναφοράς, (δ) Φάση διέγερσης, (ε) Φάση Συμβολής	99
Σχήμα 4.3	Μέθοδος αφαίρεσης φάσεων	99
Σχήμα 4.4	Δεξαμενή καυσίμων δορυφόρου	102
Σχήμα 4.5	Συμβολόγραμμα δοχείου πίεσης	103
Σχήμα 4.6	Συμβολόγραμμα δοχείου πίεσης	103
Σχήμα 4.7	Περιθλαστικοί όροι κάθε ζεύγους δεσμών (τρία ζεύγη) σε ένα ολόγραμμα	106
Διάγραμμα 4.1	Δεσμευμένη και αποδεσμευμένη φάση ολογράμματος	107
Σχήμα 4.8	Συμβολομετρική διάταξη πειραμάτων	108
Σχήμα 4.9	Συμβολομετρική διάταξη πειραμάτων	110
Σχήμα 4.10	Πλάκα αλουμινίου	111
Σχήμα 4.11	(a) Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων - Πλέγμα εξεταζόμενης περιοχής. (b) Διαστάσεις Δοκιμίου	112
Σχήμα 4.12	Αποτελέσματα συνιστωσών μετατόπισης	113
Σχήμα 4.13	Αποτελέσματα παραμορφώσεων	114
Σχήμα 4.14	Μελέτη εξωτερικού κελύφους μηριαίου οστού βοοειδούς	117
Σχήμα 4.15	Αποτελέσματα συνιστωσών μετατόπισης για το κέλυφος του οστού (τριδιάστατη αποτύπωση).	118
Σχήμα 4.16	Αποτελέσματα παραμορφώσεων για το κέλυφος του οστού	119

Σχήμα 4.17	Μελέτη μυελώδους κοιλότητας μηριαίου οστού βοοειδούς	120
Σχήμα 4.18	Αποτελέσματα συνιστωσών μετατόπισης για τη μυελώδη κοιλότητα (τρισεδιάστατη αποτύπωση)	121
Σχήμα 4.19	Αποτελέσματα παραμορφώσεων για τη μυελώδη κοιλότητα	122

ΦΩΣ

1.1 Εισαγωγή

Το φως αποτελεί μια από τις πολυπλοκότερες φυσικές υποστάσεις που έχουν μελετηθεί. Έως σήμερα η επιστήμη κατάφερε να το μοντελοποιήσει προσεγγίζοντάς το από δύο οδούς αναλόγως τη φύση του φαινομένου που μελετούνταν. Η πρώτη μεταχειρίζεται το φως ως μια κυματική διαταραχή και ονομάζεται μακροσκοπική, συνεχής ή κυματική προσέγγιση. Η δεύτερη το αντιλαμβάνεται ως ροή στοιχειωδών σωματιδίων μηδενικής μάζας και συγκεκριμένης ενεργειακής στάθμης - ονομαζόμενα φωτόνια - και συνεπώς καλείται μικροσκοπική, κβαντική ή σωματιδιακή προσέγγιση.

Η διττή φύση του φωτός αποτελεί τη βάση για την κατανόηση και μελέτη πολλών φαινομένων που συμβάλλουν στην μέθοδο της ολογραφίας. Συνεπώς το παρόν κεφάλαιο στοχεύει στην εισαγωγή του αναγνώστη στα βασικά πεδία της οπτικής, του ηλεκτρομαγνητισμού και της κβαντικής θεωρίας που οδήγησαν στη δημιουργία κι ανάπτυξη της μεθόδου.

1.1.1 Ηλεκτρομαγνητισμός και κυματική θεωρία

Η σύνδεση του φωτός με τον ηλεκτρομαγνητισμό θεμελιώθηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα με το έργο του σκοτσέζου φυσικού James Clerk Maxwell. Η συγκεκριμένη προσέγγιση δίνει την εικόνα μιας συνεχούς μεταφοράς ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυματικών διαταραχών. Οι εξισώσεις Maxwell περιγράφουν την κυματική φύση του φωτός μέσω θεμελιωδών εξισώσεων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στο σημείο αυτό ορίζονται τα εξής διανυσματικά πεδία:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k} \quad [1.1]$$

$$\vec{B}(x, y, z, t) = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} \quad [1.2]$$

Η εξίσωση [1.1] περιγράφει τρισδιάστατο ηλεκτρικό πεδίο, ενώ η εξίσωση [1.2] αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο. Το χαρακτηριστικό των δύο πεδίων που αποτελεί το κλειδί για την περιγραφή του φωτός είναι η αλληλεξάρτησή τους. Πιο συγκεκριμένα ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο διεγείρει ένα μαγνητικό πεδίο κι αντίστοιχα ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο διεγείρει ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Κεφάλαιο 1: Φως

Η μαθηματική διατύπωση της παραπάνω έκφρασης βρίσκεται στις εξισώσεις Maxwell που ακολουθούν:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad [1.3]$$

$$\Phi_E = \oiint_A \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0 \quad [1.4]$$

$$\Phi_B = \oiint_A \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad [1.5]$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \iint_A \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad [1.6]$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τις ολοκληρωτικές μορφές των θεμελιωδών νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού. Λαμβάνεται υπόψη πως στις περιοχές ολοκλήρωσης δεν περιέχονται ηλεκτρικά ρεύματα ή φορτία και οι χαρακτηριστικές ποσότητες αναφέρονται στον ελεύθερο χώρο, δηλαδή στο μέσον του κενού ή του αέρα.

Η εξίσωση [1.3] συνιστά το νόμο επαγωγής ή νόμο Faraday και αποδεικνύει πως ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ένα ηλεκτρικό πεδίο. Η επόμενη εξίσωση είναι ο νόμος του Gauss για ένα ηλεκτρικό πεδίο [1.4] και εκφράζει το ισοζύγιο μεταξύ της ηλεκτρικής ροής εισόδου και εξόδου από μια επιφάνεια A. Την ακριβή αναλογία για το μαγνητικό πεδίο εκφράζει ο νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο [1.5]. Τέλος η εξίσωση [1.6] ή αλλιώς ο νόμος κυκλωμάτων του Ampère, ο οποίος επαναδιατυπώθηκε από τον ίδιο τον Maxwell, εκφράζει το ακριβές αντίστοιχο του νόμου Faraday για τη διέγερση μαγνητικού πεδίου από ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Το διάνυσμα \vec{l} είναι εφαπτόμενο στην κλειστή καμπύλη ολοκλήρωσης C, ενώ το \vec{S} είναι κάθετο και στρέφεται εξωτερικά της επιφάνειας ολοκλήρωσης A. Οι εκφράσεις Φ_E , Φ_B συμβολίζουν την ηλεκτρική και μαγνητική ροή των αντίστοιχων πεδίων που διαπερνούν την επιφάνεια ολοκλήρωσης A. Τέλος οι ποσότητες μ_0 , ϵ_0 συνιστούν την ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα του μέσου στο οποίο λαμβάνει χώρα το ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο.

Κεφάλαιο 1: Φως

Συγκεκριμένα οι δύο αυτές ποσότητες εκφράζουν την ηλεκτρική και μαγνητική συμπεριφορά του μέσου κι αποτελούν ένα μέτρο του βαθμού στον οποίο αυτό θα διαπεραστεί από το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα. Η τιμές των μ_0, ϵ_0 αναφέρονται στον ελεύθερο χώρο με $\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ και $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Ns^2}{C^2}$. Λόγω της ανάγκης πινακοποίησης των παραπάνω παραμέτρων για διάφορα μέσα και για την ανεξαρτησία σε σχέση με το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιείται, εισήχθησαν οι αδιάστατες σχετικές διαπερατότητες K_E και K_M όπου:

$$\epsilon = K_E \epsilon_0 \quad [1.7]$$

$$\mu = K_M \mu_0 \quad [1.8]$$

Οι εξισώσεις Maxwell εκφράστηκαν με την ολοκληρωτική τους μορφή χρησιμοποιώντας καμπύλες και επιφάνειες ολοκλήρωσης. Για τη χρήση τους στα πεδία που θα ακολουθήσουν και κυρίως για τη σύνδεση των νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού με τις κυματικές διαταραχές χρειάζεται να μεταφερθούν στη διαφορική τους μορφή. Χρησιμοποιώντας τον τελεστή $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ οι ολοκληρωτικές μορφές θα εκφραστούν σε όρους απόκλισης (*εσωτερικό γινόμενο*) και στροβιλισμού (*εξωτερικό γινόμενο*) των διανυσματικών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Η διαφορική μορφή των εξισώσεων Maxwell είναι:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad [1.9]$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad [1.10]$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad [1.11]$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad [1.12]$$

Κεφάλαιο 1: Φως

Συνεχίζοντας τη διαφορική επεξεργασία των σχέσεων, είναι αποδεδειγμένο πως τελικά οι εξισώσεις Maxwell για τον ελεύθερο χώρο μπορούν να μορφοποιηθούν με τον εξής τρόπο, οδηγώντας στη συσχέτιση τους με τις κυματικές διαταραχές:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad [1.13]$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad [1.14]$$

Που αναλύονται περαιτέρω σε έξι διαφορικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} \end{aligned} \quad [1.15]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial z^2} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B_x}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B_y}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2} \end{aligned} \quad [1.16]$$

Ήταν γνωστό από προγενέστερες μελέτες του Maxwell πως μια κυματική διαταραχή περιγράφεται μαθηματικά με τον εξής τρόπο:

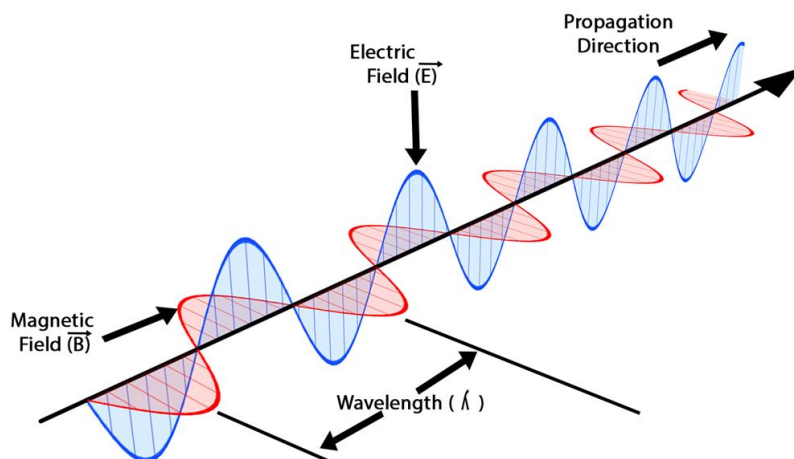
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad [1.17]$$

Κεφάλαιο 1: Φως

Η ομοιότητα των εξισώσεων [1.15] - [1.17] οδηγούν στο συμπέρασμα πως τα χρονικά εναλλασσόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μπορούν να μελετώνται ως δύο συνισταμένες ενός ενιαίου φυσικού φαινομένου που ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και πηγάζει από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Η ηλεκτρομαγνητική διαταραχή έχει τη μορφή ενός κύματος που διαδίδεται πέραν της πηγής του και ανεξάρτητα αυτής. Ένα ακόμη στοιχείο που επισφράγισε τη σχέση φωτός και ηλεκτρομαγνητισμού είναι αυτό της ταχύτητας. Από τις εξισώσεις [1.15] - [1.17] προκύπτει ότι:

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = c \quad [1.18]$$

Είναι απλό να αποδειχθεί πως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια. Δεν υπάρχει καμία συνιστώσα του πεδίου παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Σε μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή υπάρχουν τρεις καθετότητες που συμπυκνώνονται στη μορφή $\vec{E} \times \vec{B} = \vec{v}$. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο, ενώ και τα δύο είναι κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 1.1). Από εδώ και στο εξής ορίζεται ως *οπτικό πεδίο* η ηλεκτρική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και είναι αυτή που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς των χαρακτηριστικών ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η διεύθυνση της συνιστώσας αποτελεί το επίπεδο πόλωσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.



Σχήμα 1.1 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα: ηλεκτρικό πεδίο, μαγνητικό πεδίο, διεύθυνση διάδοσης και μήκος κύματος

<https://www.toppr.com/guides/physics/communication-systems/propagation-of-electromagnetic-waves/>

Κεφάλαιο 1: Φως

Οι λύσεις που ικανοποιούν τις εξισώσεις Maxwell είναι αυτές του επίπεδου, σφαιρικού και κυλινδρικού κύματος. Οι εξιδανικευμένες αυτές μορφές συνεισφέρουν στην ανάλυση φαινομένων όπως αυτά της διάθλασης, ανάκλασης, συμβολής και περίθλασης του φωτός. Τα φαινόμενα συμβολής και περίθλασης αποτελούν τη βάση για την ολογραφία. Οι λύσεις που προαναφέρθηκαν διατυπώνονται μαθηματικά ως εξής:

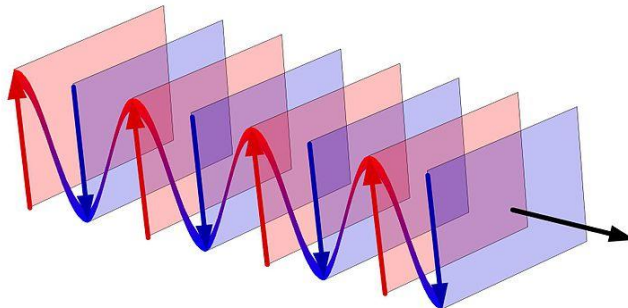
$$\begin{aligned} E(\vec{r}, t) &= E_0 \cos(k\vec{r} \mp \omega t) \\ E(\vec{r}, t) &= E_0 e^{i(k\vec{r} \mp \omega t)} \end{aligned} \quad [1.19]$$

$$\begin{aligned} E(r, t) &= \frac{E_0}{r} \cos(kr \mp \omega t) \\ E(r, t) &= \frac{E_0}{r} e^{i(kr \mp \omega t)} \end{aligned} \quad [1.20]$$

$$\begin{aligned} E(r, t) &= \frac{E_0}{\sqrt{r}} \cos(kr \mp \omega t) \\ E(r, t) &= \frac{E_0}{\sqrt{r}} e^{i(kr \mp \omega t)} \end{aligned} \quad [1.21]$$

Οι εξισώσεις [1.19] - [1.21] περιγράφουν τις μορφές του επίπεδου, σφαιρικού και κυλινδρικού τρισδιάστατου αρμονικού κύματος σε τριγωνομετρική αλλά και μιγαδική μορφή. Ο κυματάριθμος ορίζεται ως $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, όπου λ το μήκος κύματος. Συμβολίζεται με ω η κυκλική συχνότητα ή ταχύτητα φάσης του κύματος. Το διάνυσμα $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ είναι το διάνυσμα θέσης κύματος.

Ένα επίπεδο κύμα ορίζεται όταν για χρονική τιμή t όλες οι επιφάνειες σταθερής φάσης σχηματίζουν επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Οι επιφάνειες σταθερής φάσης ονομάζονται μέτωπα κύματος (wavefronts) ή μέτωπα φάσης (Σχήμα 1.2).

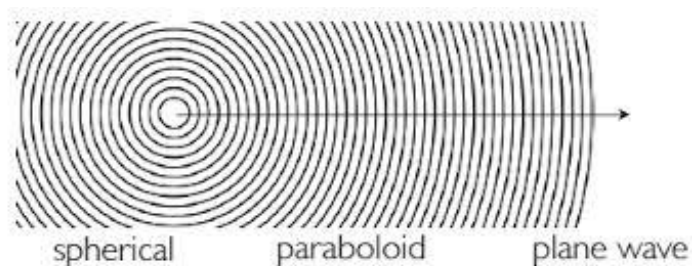


Σχήμα 1.2 Επίπεδο κύμα: Επιφάνειες Σταθερής Φάσης - Μέτωπα Κύματος

<https://www.quora.com/What-are-the-properties-of-uniform-plane-waves>

Κεφάλαιο 1: Φως

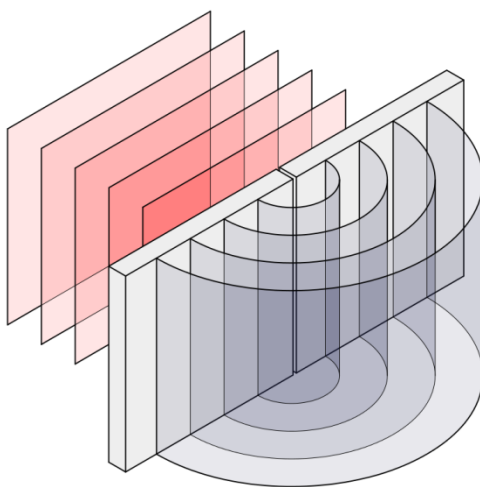
Ένα σφαιρικό κύμα προκύπτει από μια σημειακή πηγή φωτός. Τα μέτωπα ενός σφαιρικού κύματος σχηματίζουν ομόκεντρες σφαιρικές επιφάνειες. Το πρόσημο (-) περιγράφει ένα αποκλίνον (divergent) σφαιρικό κύμα, ενώ το πρόσημο (+) ένα συγκλίνον (convergent). Η σταθερά E_0 ονομάζεται ισχύς πηγής και καθώς το πλάτος της ταλάντωσης (E_0/r) είναι αντιστρόφως ανάλογο της ακτινικής συνιστώσας r , το σφαιρικό κύμα είναι ένα φθίνον κύμα. Ένα σφαιρικό κύμα αποτελεί ένα μοντέλο κυματομορφής. Στην πραγματικότητα όπως ακριβώς και το επίπεδο κύμα, αποτελούν ιδανικές προσεγγίσεις. Όσο ένα αποκλίνον κύμα διαδίδεται μακριά από την πηγή, τόσο αυξάνει η ακτίνα του μετώπου ώσπου μπορεί να θεωρηθεί πως προσεγγίζει ένα επίπεδο μέτωπο κύματος (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3 Αλλοίωση σφαιρικού μετώπου: Σφαιρικό, Παραβολοειδές, Επίπεδο

<http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=447&fileid=2933>

Το κυλινδρικό μέτωπο κύματος είναι μια ακόμη εξιδανικευμένη προσέγγιση και στην πιο απλή μορφή προκύπτει όταν ένα επίπεδο κύμα προσπίπτει σε επιφάνεια με σχισμή (slit) (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4 Κυλινδρικό κύμα: Πρόσπτωση επίπεδου κύματος σε σχισμή (Slit)

<https://physics.stackexchange.com/questions/541005/source-of-cylindrical-electromagnetic-waves>

Κεφάλαιο 1: Φως

Το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα και η προσέγγιση αυτή οδηγεί στην ανάλυση σημαντικών φαινομένων που σχετίζονται με την οπτική. Ως κύμα μεταφέρει κατά τη διάδοσή του ενέργεια και ορμή. Το μέγεθος που περιγράφει την ενέργεια που μεταφέρεται ανεξάρτητα από τον χρόνο ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας (irradiance) και αποτελεί κύρια στάθμη για την ενεργειακή ανάλυση μιας εκπομπής φωτός.

1.1.2 Ένταση ακτινοβολίας (Irradiance)

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ένα τοπικό φαινόμενο που μεταφέρει ενέργεια και ορμή. Για την μέτρηση της ενέργειας ορίζεται η συνολική ηλεκτρομαγνητική ενέργεια:

$$u = u_E + u_B = 2u_E = 2u_B = \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{\mu_0} B^2 \quad [1.22]$$

Από τις παραπάνω διατυπώσεις μπορεί να σχολιαστεί πως η ενέργεια που μεταφέρεται σε μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή είναι ισοσκελής ως προς το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.

Λόγω της εξαιρετικά γρήγορης μεταβολής των πεδίων σε σχέση με το χρόνο είναι αναγκαία η επινόηση ενός χαρακτηριστικού μεγέθους που να στηρίζεται σε μέσες τιμές, έτσι ώστε να αναφέρεται προσεγγιστικά στο σύνολο της ροής ενέργειας ανεξάρτητα του χρόνου. Με τη σκέψη αυτή ορίζεται η ένταση ακτινοβολίας (irradiance). Όταν γίνεται λόγος για την ποσότητα του φωτός που προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια αναφερόμαστε σε αυτό το μέγεθος. Εκφράζεται η μέση ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, ανά μονάδα χρόνου:

$$I = \varepsilon_0 c \langle E^2 \rangle \quad [1.23]$$

Παρατηρείται πως η ένταση ακτινοβολίας (irradiance) είναι ανάλογη του μέσου πλάτους έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Κεφάλαιο 1: Φως

Όσον αφορά την κυματική φύση του φωτός, η παραπάνω ανάλυση θέτει τις βάσεις για να μελετηθούν τα φαινόμενα διάθλασης, ανάκλασης, συμβολής και περίθλασης που αντιλαμβάνονται το φως ως συνεχές κύμα και ενδιαφέρουν άμεσα την παρούσα μελέτη. Συγχρόνως όμως μια άλλη προσέγγιση βοηθά στην ανάπτυξη τεχνολογιών επίσης χρήσιμων, όπως αυτή του LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Φυσικά γίνεται λόγος για τη σωματιδιακή φύση του φωτός, τμήμα της οποίας παρουσιάζεται ακολούθως.

1.1.3 Σωματιδιακή φύση και φωτόνια

Σε αυτή την προσέγγιση το φως απορροφάται και εκπέμπεται σε διακριτές ποσότητες με τη μορφή σωματιδίων ηλεκτρομαγνητικής φύσης που ονομάζονται φωτόνια. Μια δέσμη φωτός μεταφέρει μια τέτοια ποσότητα φωτονίων που μακροσκοπικά γίνεται αντιληπτή σαν ένα συνεχές ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτή είναι η οδός μέσω της οποίας οι δύο προσεγγίσεις της φύσης του φωτός συνεργάζονται χωρίς η μία να απορρίπτει την άλλη.

Τα φωτόνια ανακαλύφθηκαν από τις μελέτες των Planck, Thomson και Einstein και διατυπώθηκαν το 1905 από τον Γερμανοεβραίο φυσικό Albert Einstein και την ανάλυσή του πάνω στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στην επιφάνεια ενός μετάλλου, εκείνο εκπέμπει ελεύθερα ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο αυτό για χρόνια δεν μπορούσε να αναλυθεί με την προσέγγιση της κλασσικής φυσικής και τη συνεχή θεώρηση του φωτός.

Ο Einstein κατέληξε στη διατύπωση πως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι κβαντισμένα. Με τον όρο αυτό εννοείται πως κάθε συστατικό φωτόνιο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος έχει ένα ποσό ενέργειας που δίνεται από τη σχέση:

$$E = hf \quad [1.24]$$

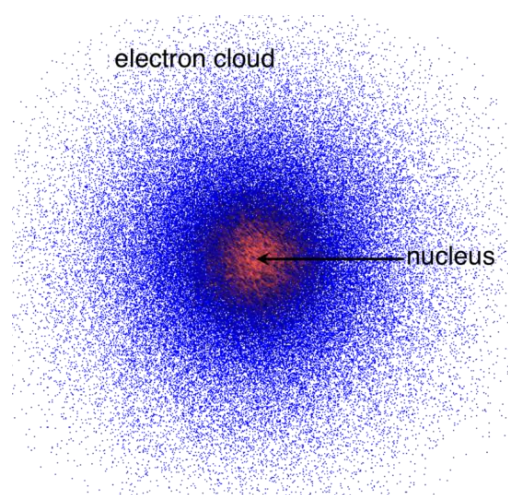
Το φωτόνιο είναι ένα σταθερό, αβαρές κι αφόρτιστο σωματίδιο που κινείται με ταχύτητα c . Μεταφέρει ενέργεια, γραμμική και στροφική ορμή και παρουσιάζει ηλεκτρομαγνητική και ταλαντωτική συμπεριφορά. Είναι ένα κβαντικό σωματίδιο όπως και τα υπόλοιπα στοιχειώδη σωματίδια. Τα φωτόνια εκπέμπονται και απορροφώνται από φορτισμένα σωματίδια και συνηθέστερα από ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά συνήθως κυκλοφορούν σε τροχιές σταθερής ενέργειας (ηλεκτρονιακά νέφη) γύρω από τους ατομικούς πυρήνες. Είναι πλέον σαφές πως το φαινόμενο της εκπομπής φωτονίων είναι ένα κβαντικό φαινόμενο.

Κεφάλαιο 1: Φως

Όταν μεγάλος πληθυσμός φωτονίων έχει κοινά χαρακτηριστικά (ενέργεια, ορμή, συχνότητα, κατεύθυνση), τότε η διακριτή προσέγγιση του φωτός μπορεί μακροσκοπικά να αναχθεί στην θεώρηση μιας συνεχούς δέσμης φωτός ή αλλιώς ενός συνεχούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να ειπωθεί πως ένα μονοχρωματικό (monochromatic) ή σχεδόν μονοχρωματικό (quasi-monochromatic) επίπεδο κύμα μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο μιας πολυπληθούς ροής φωτονίων όμοιων καταστατικών χαρακτηριστικών

1.1.4 Εκπομπή Φωτονίων

Τα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα ενός ατόμου συνιστούν ένα αραιό, αρνητικό νέφος (Σχήμα 1.5). Η χημική και οπτική συμπεριφορά ενός υλικού καθορίζεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό από αυτό το νέφος και συγκεκριμένα από τα ηλεκτρόνια σθένους που βρίσκονται στη μακρινότερη απόσταση του νέφους από τον πυρήνα. Αν υποθεθεί πως το νέφος αποτελείται από στοιβάδες ηλεκτρονίων, η εξωτερική στοιβάδα περιέχει τα ηλεκτρόνια σθένους, ενώ οι υπόλοιπες είναι πλήρεις ηλεκτρονίων, αδρανείς στοιβάδες απόλυτα δεμένες με τον ατομικό πυρήνα. Η ατομική ακτινοβολία προκύπτει από ανακατατάξεις στον εξωτερικό φλοιό του νέφους ηλεκτρονίων.



Σχήμα 1.5 Ατομικό μοντέλο του Schrödinger. Ατομικός πυρήνας - Νέφος ηλεκτρονίων
<https://www.sutori.com/en/item/erwin-schrodinger-s-quantum-mechanical-model-of-the-atom-consisted-of-having-ele>

Κεφάλαιο 1: Φως

Συνήθως ένα άτομο συναντάται με συγκεκριμένη ηλεκτρονιακή διάταξη που προσδίδει τη σταθερότερη και ενεργειακά χαμηλότερη στάθμη του. Κάθε ηλεκτρόνιο βρίσκεται στη χαμηλότερη διαθέσιμη ενεργειακή στάθμη και το άτομο σχηματίζει τη διάταξη της θεμελιώδους κατάστασής του (*ground state*). Οποιοσδήποτε μηχανισμός παρέχει ενέργεια στο άτομο, θα διαταράξει τη θεμελιώδη κατάστασή του. Το ηλεκτρονιακό νέφος ενός ατόμου και κατά πρόεκταση και το ίδιο το άτομο, συναντώνται σε συγκεκριμένες διατάξεις που περιγράφονται από συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες. Εκτός της θεμελιώδους κατάστασης υπάρχουν υψηλότερες ενεργειακές ατομικές διατάξεις που ονομάζονται καταστάσεις διέγερσης (*excited states*) και αντιστοιχούν σε ακριβείς ενεργειακές στάθμες και σχηματισμούς του ηλεκτρονιακού νέφους. Όταν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια μεταπηδήσουν σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη τότε το άτομο βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης (*excited state*)(Σχήμα 1.6).

Οι μεταπηδήσεις των ηλεκτρονίων σθένους είναι αυτές που ευθύνονται για την ακτινοβολία του φωτός. Όταν μια επαρκής ποσότητα ενέργειας χορηγηθεί στο άτομο και ειδικότερα στα ηλεκτρόνια σθένους, εκείνο αμέσως διεγείρεται σε μια στάθμη υψηλότερης ενέργειας. Ακριβέστερα ένα ηλεκτρόνιο στην παραπάνω συνθήκη καταφεύγει αμέσως σε ένα κβαντικό άλμα (*quantum jump*) από τη θεμελιώδη στάθμη σε μια από τις ανώτερες και ενεργειακά διακριτές στάθμες. Εξαιρετική σημασία έχει να αναφερθεί πως το ποσό ενέργειας που απορροφάται από το ηλεκτρόνιο είναι ίσο με την ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στις δύο στάθμες του κβαντικού άλματος.

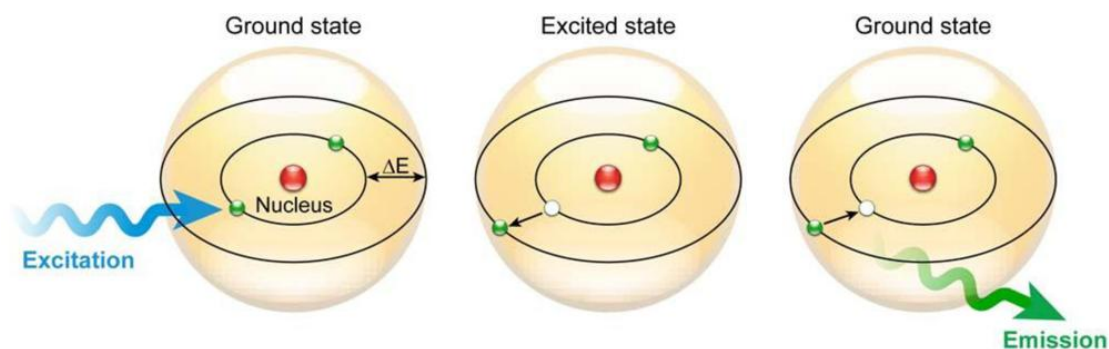
Ο χρόνος παραμονής ενός ατόμου σε κατάσταση διέγερσης είναι περίπου 10^{-8} s ή 10^{-9} s. Το άτομο πολύ γρήγορα θα επιστρέψει στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας την ενέργεια που απορρόφησε είτε με τη μορφή θερμότητας, είτε με τη μορφή φωτονίου. Στην τελευταία περίπτωση η ενέργεια του φωτονίου που θα εκπεμφθεί είναι ακριβώς ίση με τη διαφορά ενέργειας ανάμεσα στις στάθμες που το άτομο αυτή τη φορά θα μεταπηδήσει επιστρέφοντας σε χαμηλότερες ενέργειες. Συνεπώς η εκπομπή αντιστοιχεί και σε συγκεκριμένη συχνότητα:

$$\Delta E = hf \quad [1.25]$$

Κεφάλαιο 1: Φως

Η συχνότητα αυτή αποτελεί μία από τις συχνότητες συντονισμού (*resonance frequencies*) που το άτομο απορροφά ή εκπέμπει φωτόνια. Το φάσμα στο οποίο εκπέμπει ένα μεμονωμένο άτομο ή ένα αέριο χαμηλής πίεσης προσδίδει ακριβή χαρακτηριστικά συχνοτήτων στις ακτινοβολίες του.

Η παραπάνω ιδιότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περίπτωση μονοχρωματικών (*monochromatic*) ή σχεδόν μονοχρωματικών (*quasi-monochromatic*) χαρακτηριστικών δέσμης, απαίτηση αρκετά συχνή για την ολογραφία.



Σχήμα 1.6 Ατομική εκπομπή φωτονίου. Θεμελιώδης κατάσταση - Εξωτερική διέγερση. Κατάσταση διέγερσης. Εκπομπή - Θεμελιώδης κατάσταση

<https://www.vox.com/2015/4/22/8468781/atomic-clock>

Ο χρόνος στον οποίο ένα άτομο θα επανέλθει στη θεμελιώδη κατάσταση είναι πολύ μικρός. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί, εντός του χρόνου αυτού, με τους οποίους τα άτομα εκπέμπουν φωτόνια κι αυτοί ονομάζονται πηγαία εκπομπή (Spontaneous emission) και εκπομπή διέγερσης (Stimulated emission). Οι δύο περιπτώσεις προσδίδουν διαφορετικά χαρακτηριστικά στο φωτόνιο της εκπομπής και στη συνολική δέσμη.

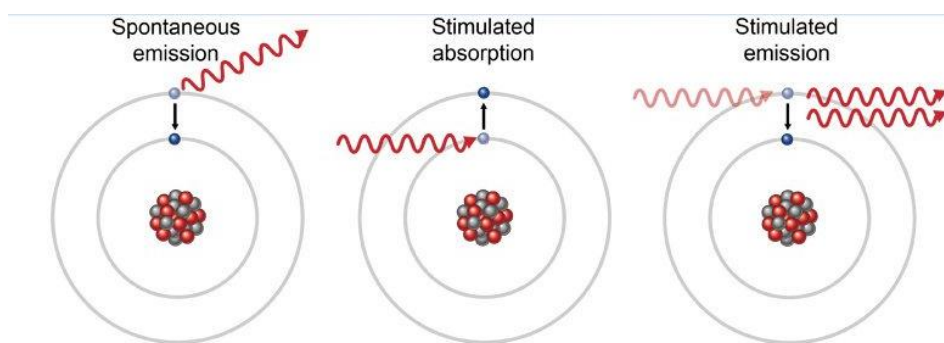
Η πηγαία εκπομπή αποτελεί τον φυσικό και συχνότερο τρόπο με τον οποίο ένα ηλεκτρόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο. Τα ηλεκτρόνια διεγείρονται και μέσα σε ελάχιστο χρονικό διάστημα διαθέτουν την ενέργεια που απορροφήθηκε στην εκπομπή φωτονίου με συγκεκριμένη συχνότητα και εντελώς ακαθόριστη διεύθυνση. Η τελευταία τυχαιότητα επηρεάζει μακροσκοπικά τα χαρακτηριστικά της δέσμης φωτός που εκπέμπεται.

Αντίθετα η εκπομπή διέγερσης είναι ένας μηχανισμός που προσδίδει ενιαίες ιδιότητες στα φωτόνια που εκπέμπονται από τα άτομα ενός μέσου. Σε ένα μέσο που δέχεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υπάρχει αυξημένη πιθανότητα ένα φωτόνιο να διαδράσει με ένα άτομο που βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης. Τότε το άτομο μπορεί να ξεφορτωθεί την περίσσεια ενέργειας που διαθέτει σε συντονισμό με το φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται εκπομπή διέγερσης (stimulated emission).

Κεφάλαιο 1: Φως

Ο ρυθμός μετάβασης των ατόμων από μια αρχική ενεργειακή κατάσταση σε μια υψηλότερη είναι ανάλογος της ισχύος των φωτονίων της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Όσα περισσότερα άτομα βρίσκονται στην ενεργειακή E_i τόσο περισσότερα μπορούν να μεταβιβαστούν στην E_j απορροφώντας τα προσπίπτοντα φωτόνια σ' ένα φαινόμενο που ονομάζεται απορρόφηση διέγερσης (stimulated absorption) (Σχήμα 1.7).

Αν λοιπόν ένα φωτόνιο από προσπίπτουσα ακτινοβολία στοχεύει να διεγείρει ένα άτομο, τότε χρειάζεται να έχει συχνότητα f_{ji} και ως εκ τούτου ενέργεια $E_{ph} = \Delta E_{ji} = E_j - E_i$. Το χρησιμότερο χαρακτηριστικό της εκπομπής διέγερσης είναι πως το εκπεμπόμενο φωτόνιο έχει τα εξής σπουδαία χαρακτηριστικά: Είναι συμφασικό, έχει κοινή πόλωση και εκπέμπεται στην ίδια διεύθυνση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

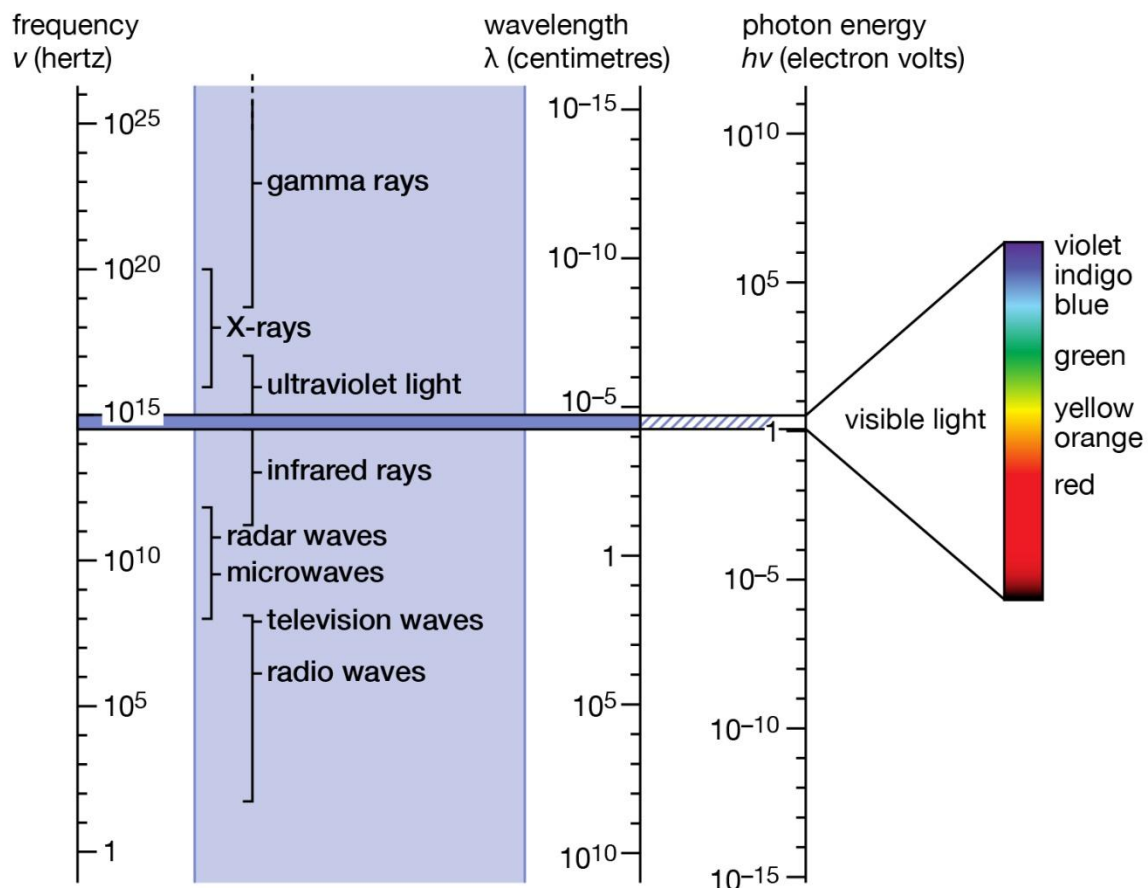


Σχήμα 1.7 Ατομική εκπομπή φωτονίου: (α) Πηγαία εκπομπή, (β) Απορρόφηση διέγερσης, (c) Εκπομπή διέγερσης

1.1.5 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα ηλεκτρικά φορτία χαρακτηρίζεται από ποικίλες παραμέτρους. Τρεις από αυτές είναι το μήκος κύματος λ , η συχνότητα f και η ενέργεια φωτονίου $h\nu$. Μήκος κύματος και συχνότητα σχετίζονται αντιστρόφως ανάλογα, ενώ αντίθετα η ενέργεια φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητας όπως φαίνεται από την εξίσωση [1.24].

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραμέτρους οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές κατηγοριοποιούνται σε ένα συνεχές φάσμα ξεκινώντας από χαμηλές συχνότητες (υψηλά μήκη κύματος) προς τις υψηλότερες (χαμηλά μήκη κύματος). Ακολουθεί η παρουσίαση του φάσματος και του διαχωρισμού της ακτινοβολίας (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και ορατό φως: Ραδιοκύματα, Τηλεοπτικά κύματα, Μικροκύματα, Κύματα Radar, Υπέρυθρες ακτίνες, Ορατό φως (Κόκκινο, Πορτοκαλί, Κίτρινο, Πράσινο, Μπλε, Indigo, Ιώδες) Υπεριώδες φως, Ακτίνες X, Ακτίνες Γ. Αριστερή Στήλη: Συχνότητα ν , Μεσαία στήλη: Μήκος κύματος λ , Δεξιά Στήλη: Ενέργεια φωτονίου $h\nu$.

<https://www.britannica.com/science/electromagnetic-spectrum>

Κεφάλαιο 1: Φως

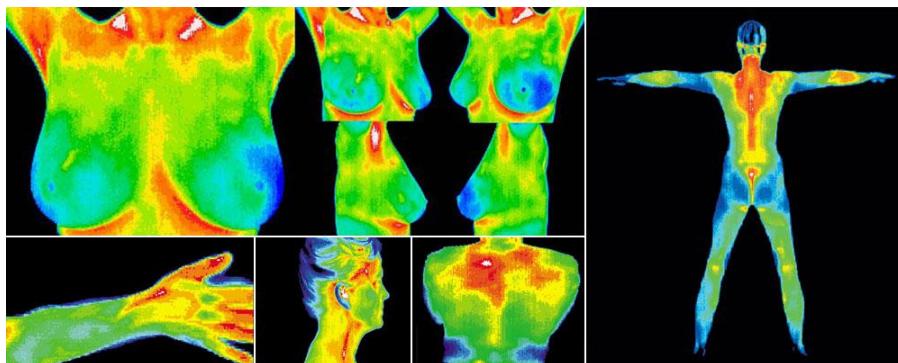
Στην πρώτη κατηγορία βρίσκονται τα ραδιοκύματα που εκτείνονται από 100 Hertz έως 10^9 Hz ή αντίστοιχα από εκατομμύρια του μέτρου έως 0.3 m μήκους κύματος. Οι συγκεκριμένες ακτινοβολίες συνήθως εκπέμπονται από ηλεκτρικά κυκλώματα και οι υψηλότερες συχνότητές τους χρησιμοποιούνται σε ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές μεταδόσεις.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα μικροκύματα. Η περιοχή εκτείνεται από 10^9 Hz έως 3×10^{11} Hz και υπό όρους μήκους κύματος από 30cm σε 1mm. Οι εκπομπές μικροκυμάτων απορροφώνται από πολικά μόρια, όπως αυτά του νερού κι ως τούτου προκύπτει η πιο δημοφιλής χρήση στους φούρνους μικροκυμάτων. Εκτός αυτού ευρεία χρήση γίνεται και σε τομείς όπως οι διαστημικές τηλεπικοινωνίες, τα ραντάρ, η καθοδήγηση των αεροπλάνων και η μελέτη πλανητικών επιφανειών.

Η υπέρυθη περιοχή ακτινοβολίας βρίσκεται συχνοτικά μεταξύ 3×10^{11} Hz και 4×10^{14} Hz. Συνήθως το εύρος αυτό διακρίνεται σε τέσσερις επιμέρους ζώνες:

- ακραία υπέρυθη (extreme infrared): 1mm – 15.000 nm,
- μακρά υπέρυθη (far infrared): 15.000nm – 6.000 nm,
- μέση υπέρυθη (intermediate infrared): 6000nm – 3000nm,
- εγγύς υπέρυθη (near infrared): 3000nm – 780nm.

Οποιοδήποτε σώμα βρίσκεται σε θερμική αλληλεπίδραση εκπέμπει και απορροφά υπέρυθη ακτινοβολία. Ως συνέπεια η ενέργεια της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μετρήσιμη από συσκευές που εντοπίζουν τις θερμικές μεταβολές ενός σώματος. Υπάρχουν ποικίλες διατάξεις που μετατρέπουν τη θερμική μεταβολή σε κάποια άλλη μορφή προκειμένου να καταμετρηθεί η ενέργεια της ακτινοβολίας. Ως εκ τούτου προκύπτει η τεχνολογία της θερμογραφίας (thermography), όπου αποτυπώνεται το θερμικό προφίλ ενός σώματος με βάση την υπέρυθη ακτινοβολία και έχει ισχυρή διαγνωστική απόδοση (Σχήμα 1.9).



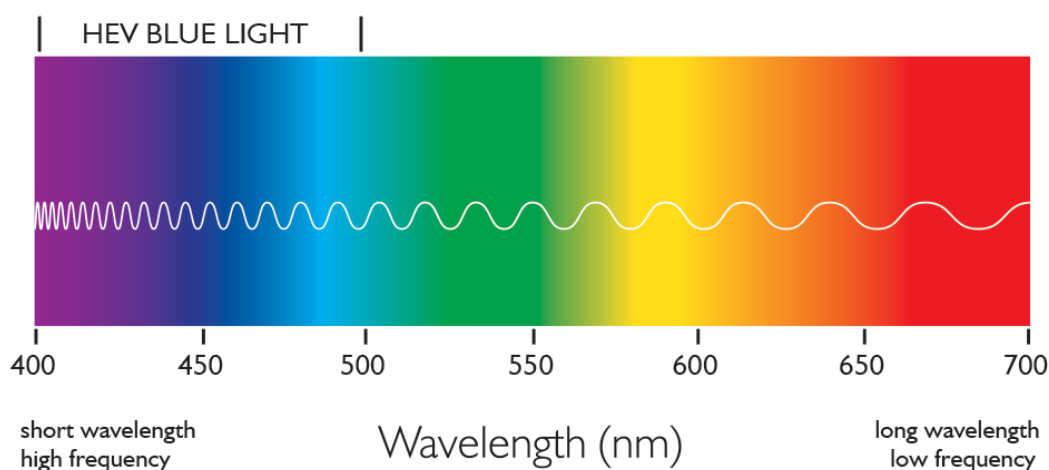
Σχήμα 1.9 Θερμογραφία ανθρώπινου σώματος

<https://thebreastthermographycenter.com/frequently-asked-questions-about-thermography/>

Κεφάλαιο 1: Φως

Εκτός αυτού κατασκευάζονται φωτογραφικά φιλμ ευαίσθητα στην εγγύς υπέρυθη ακτινοβολία ($< 1300 \text{ nm}$). Άλλες εφαρμογές βρίσκονται σε δορυφόρους για τον εντοπισμό πυραυλικών εκτοξεύσεων κι αγροτικών επιδημιών, όπως επίσης σε τεχνολογίες laser και τηλεσκοπικές διατάξεις για διαστημικές μελέτες.

Το ορατό φως είναι η μικρή περιοχή του φάσματος που βρίσκεται μεταξύ $3.84 \times 10^{14} \text{ Hz}$ έως $7.69 \times 10^{14} \text{ Hz}$ κι εκπέμπεται από ατομικές ανακατατάξεις των ηλεκτρονίων σθένους (Σχήμα 1.10 - Πίνακας 1.1).



Σχήμα 1.10 Ορατό φως: Αύξουσα σειρά μήκους κύματος. Αριστερά το όριο ορατού φωτός υψηλής ενέργειας (High Energy Blue Light).

<https://www.quora.com/What-is-white-light-made-from>

Πίνακας 1.1 Ορατό φως: μήκη κύματος και συχνότητες χρωμάτων

Color	Wavelength λ_0 (nm)	Frequency (THz)
Red	780 – 622	384 – 482
Orange	622 – 597	482 – 503
Yellow	597 – 577	503 – 520
Green	577 – 492	520 – 610
Blue	492 – 455	610 – 659
Violet	455 - 380	659 - 769

Κεφάλαιο 1: Φως

Το ανθρώπινο οπτικό νευρικό σύστημα αντιλαμβάνεται ως λευκό φως ένα μείγμα συχνοτήτων από 384 Hz έως 769 Hz με την ίδια ενέργεια. Το χρώμα είναι η υποκειμενική ανθρώπινη αντίληψη του ορατού φάσματος βάση φυσιολογίας και ψυχολογίας. Παρ' όλα αυτά δεν είναι ιδιότητα του φωτός, αλλά η εκδήλωσή του στους ανθρώπινους οπτικούς νευρώνες. Το εύρος που θα μελετηθεί κυρίως στην παρούσα εργασία είναι ακριβώς αυτό του ορατού φωτός, διότι αυτό αφορά σε κυρίαρχο βαθμό την τεχνολογία της ολογραφίας.

Ακολουθεί η περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας εντός των ορίων 8×10^{14} Hz και 3×10^{16} Hz (ή 3.2 eV έως 100 eV). Η ενέργεια των φωτονίων της υπεριώδους ακτινοβολίας (ultraviolet – UV) που προσπίπτουν στη γη από τον ήλιο είναι αρκετή για να ιονίσει τα άτομα των ανώτερων επιπέδων της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε να δημιουργεί ολόένα την ιονόσφαιρα. Επιπροσθέτως η τάξη μεγέθους της ενέργειας αυτής είναι κατάλληλη για χημικές αντιδράσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα υπό την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Σε μήκη κύματος μικρότερα των 290 nm η ακτινοβολία εμφανίζει βακτηριοκτόνο δράση, συνεπώς μια απ' τις χρήσεις της είναι αποστειρωτική. Εκτός αυτής η υπεριώδης ακτινοβολία βρίσκει εφαρμογές στα φωτογραφικά φιλμ, μικροσκόπια, τροχιακά διαστημικά τηλεσκόπια, κυκλικούς επιταχυντές (synchrotron) και laser.

Αμέσως μετά βρίσκονται οι ακτίνες X σε συχνοτικό εύρος $2.4 \times 10^{16} - 5 \times 10^{19}$ Hz και χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μικρά μήκη κύματος, μικρότερα από την ατομική διάμετρο. Πηγή της ακτινοβολίας X είναι κατά κύριο λόγο η απότομη επιβράδυνση ηλεκτρικών φορτίων. Η πρόοδος των τελευταίων ετών στην εστίαση με τη χρήση καθρεφτών σήμανε το ξεκίνημα για μια νέα περίοδο στην χρήση των ακτίνων X για την λεπτομερή απεικόνιση ενός εύρους που κυμαίνεται από πυρηνικές συντήξεις έως ουράνιες πηγές, όπως ο ήλιος, μαύρες τρύπες και σώματα σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες που εκπέμπουν σε συχνότητες ακτινοβολίας X.

Τέλος η ακτινοβολία Γ διαθέτει την υψηλότερη ενέργεια και τα μικρότερα μήκη κύματος. Η πηγή της είναι τα σωματίδια που εκπέμπονται από πυρηνικές ανακατατάξεις των ατόμων.

Κάθε περιοχή του φάσματος χρησιμοποιείται με τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Ενδιαφέρον έχει η παρατήρηση πως οι ακτινοβολίες χαμηλότερων συχνοτήτων εμφανίζουν και προσεγγίζονται ευκολότερα με μια συνεχή ή κυματική υπόσταση. Αντίθετα, όσο οι συχνότητες αυξάνονται και η ενέργεια κάθε φωτονίου λαμβάνει σημαντικές τιμές τότε η ακτινοβολία εμφανίζει σωματιδιακή συμπεριφορά.

1.2 Φαινόμενα διάδοσης του φωτός

Το φως διαδίδεται είτε σαν ηλεκτρομαγνητική διαταραχή, είτε σα ροή φωτονίων σε διάφορα μέσα και υλικά, αλλάζοντας ανάλογα ορισμένες από τις παραμέτρους. Ως τώρα οι ιδιότητες της φωτεινής ακτινοβολίας που παρουσιάστηκαν αναφέρονταν στον αέρα ή το κενό και πράγματι ως επί το πλείστον οι διατάξεις της ολογραφίας βρίσκονται σε τέτοιο περιβάλλον.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί μηχανισμοί που το φως αλληλεπιδρά με τα υλικά στα οποία διαδίδεται ή προσπίπτει κι αυτοί είναι καταρχάς η διάχυση (scattering), η ανάκλαση (reflection), η διάθλαση (refraction) και η περίθλαση (diffraction). Εκτός αυτών ένα σημαντικό φαινόμενο που προκύπτει απ' την κυματική υπέρθεση και θα απασχολήσει στη συνέχεια είναι αυτό της συμβολής δύο ή παραπάνω κυμάτων φωτός.

Το φως διαχέεται σε όλα τα υλικά. Ένα δείκτης ο οποίος αντανακλά τη διάδοση του φωτός μέσα σε ένα μέσον πέραν του κενού ή του αέρα είναι ο δείκτης διάθλασης. Η ταχύτητα του φωτός σε ένα υλικό δίνεται ως $u = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$, και τότε ο δείκτης διάθλασης του υλικού είναι:

$$n = \frac{c}{u} = \sqrt{\epsilon\mu/\epsilon_0\mu_0} = \sqrt{K_E K_M} \cong \sqrt{K_E} \quad [1.26]$$

Η σχετική διαπερατότητα K_E εξαρτάται από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, έτσι και ο δείκτης διάθλασης αλλάζει ανάλογα με τη συχνότητα ή το μήκος κύματος του φωτός και οδηγεί στο φαινόμενο του σκεδασμού που γνωστό παράδειγμά του αποτελεί η ανάλυση το λευκού φωτός στα επί μέρους μήκη κύματος που το συνθέτουν με τη χρήση πρίσματος.

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους τα άτομα ενός υλικού αντιδρούν στην προσπίπτουσα φωτεινή ακτινοβολία. Ο πρώτος συμβαίνει όταν η συχνότητα του κύματος ή η ενέργεια των φωτονίων του φωτός είναι μικρότερη της ιδιοσυχνότητας ή της διαφοράς ενέργειας που χρειάζεται ένα άτομο για να διεγερθεί. Εν προκειμένω το άτομο απλώς αλλάζει τον προσανατολισμό της δέσμης. Στην περίπτωση που τα συχνοτικά ή ενεργειακά μεγέθη αντιστοιχούν, τότε το άτομο απορροφά το προσπίπτον και εκπέμπει φωτόνιο κατόπιν διέγερσης.

Κεφάλαιο 1: Φως

Αυτό που έχει σημασία να σημειωθεί είναι πως το κάθε άτομο μπορεί να προσεγγιστεί ως μια σημειακή πηγή σφαιρικών κυμάτων κατά τη διάδοση του φωτός εντός ενός μέσου. Τέλος να υπογραμμιστεί πως ο όρος δέσμη κι ακόμα η απεικόνιση τη φωτεινής ακτινοβολίας με δέσμες είναι ένα καθαρά προσεγγιστικό εργαλείο απεικόνισης των διευθύνσεων.

1.2.1 Ανάκλαση

Υποτίθεται μια δέσμη φωτός που διαδίδεται στον αέρα και προσπίπτει σε μια επιφάνεια διαφανούς υλικού. Αυτό που συναντά η δέσμη είναι ένα πυκνό στρώμα ατόμων που πρόκειται να διαχύσουν το φως διαμέσου του ατομικού πλέγματος. Στην περίπτωση της μετάδοσης (transmission) του φωτός, τα άτομα διαχέουν την ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις (σφαιρικό κύμα).

Όμως αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που το μέσον δεν έχει καμιά ασυνέχεια. Στην περίπτωση της διεπιφάνειας δύο διαφανών υλικών υπάρχει ασυνέχεια και μάλιστα αλματώδης. Η πρόσπτωση του φωτός πάνω σε μια τέτοια διεπιφάνεια θα οδηγήσει στη διάχυση μέρους της δέσμης αντίθετα από τη διεύθυνση διάδοσης και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανάκλαση (Σχήμα 1.13).

Προκύπτουν δύο κατηγορίες ανάκλασης με γνώμονα τη σχέση των δεικτών διάθλασης των δύο υλικών. Αν n_i ο δείκτης στο μέσον πρόσπτωσης και n_t αντίστοιχα στο μέσο μετάδοσης, τότε εξωτερική ανάκλαση συμβαίνει όταν $n_i < n_t$, ενώ αντίθετα εσωτερική ανάκλαση όταν $n_t < n_i$.

Η διεύθυνση της ανακλώμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από τη γωνία που ορίζουν το προσπίπτων κύμα με την κάθετο στην επιφάνεια πρόσπτωσης και ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης θ_i . Αντίστοιχα ορίζεται η γωνία ανάκλασης ως η γωνία του ανακλώμενου κύματος με την κάθετο στην επιφάνεια πρόσπτωσης θ_r . Ο νόμος της ανάκλασης διατυπώνεται ως εξής:

$$\theta_i = \theta_r \quad [1.27]$$

1.2.2 Διάθλαση

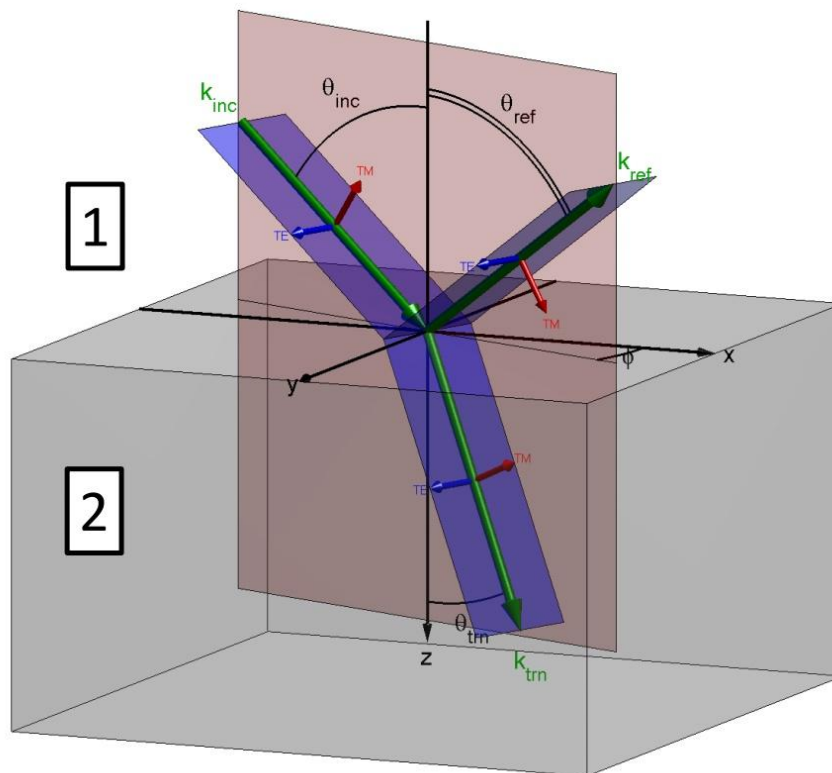
Η διάθλαση είναι το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα στη μεταδιδόμενη (transmitted) ποσότητα της φωτεινής ακτινοβολίας. Πρόκειται για την αλλαγή προσανατολισμού της μεταδιδόμενης ακτίνας σε σχέση με την ακτίνα πρόσπτωσης (Σχήμα 1.11).

Κεφάλαιο 1: Φως

Όταν ένα επίπεδο κύμα προσπίπτει στην διεπιφάνεια τότε τα άτομα της διεπιφάνειας λειτουργούν σαν σημειακές πηγές σφαιρικών κυμάτων που αθροιστικά σχηματίζουν ένα νέο μέτωπο κύματος με διαφορετική ταχύτητα από το προσπίπτον. Αυτή η διαφορά ταχύτητας διάδοσης του φωτός εντός του νέου υλικού είναι που προκαλεί την αλλαγή στην διεύθυνση. Ο νόμος της διάθλασης ή νόμος του Snell διατυπώνεται ως:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad [1.28]$$

Όπου n_i και n_t οι δείκτες διάθλασης των μέσων πρόσπτωσης και μετάδοσης αντίστοιχα, ενώ θ_i και θ_t οι γωνίες πρόσπτωσης και μετάδοσης.



Σχήμα 1.11 Ανάκλαση και Διάθλαση: Διεύθυνση Πρόσπτωσης k_{inc} , Γωνία Πρόσπτωσης θ_{inc} , Διεύθυνση Ανάκλασης k_{ref} , Γωνία Ανάκλασης θ_{ref} , Διεύθυνση Διάθλασης k_{trn} , Γωνία Διάθλασης θ_{trn} . Ηλεκτρική Συνιστώσα TE, Μαγνητική Συνιστώσα TM.

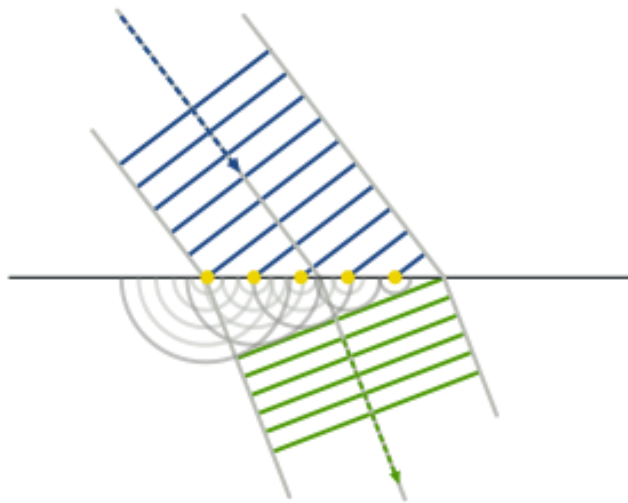
<https://www.quora.com/What-is-the-plane-of-incidence>

Κεφάλαιο 1: Φως

Από τον νόμο του Snell είναι φανερό πως αν $n_i < n_t$ τότε η δέσμη του φωτός συγκλίνει προς την κάθετο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση αποκλίνει. Τα τρία βασικά στοιχεία που συνιστούν τη διαφορά ανάμεσα στο προσπίπτον και το διαθλώμενο επίπεδο μέτωπο κύματος είναι (Σχήμα 1.14):

- αλλαγή διεύθυνσης,
- μεγαλύτερη διατομή στο μέτωπο διάθλασης από αυτό της πρόσπτωσης,
- το μήκος κύματος ελαττώνεται, εφόσον η ταχύτητα ελαττώνεται και η συχνότητα παραμένει σταθερή.

Η αρχή του Huygens είναι μια θεμελιώδης προσέγγιση στην μελέτη των μετώπων κύματος. Επί της ουσίας ο Γερμανός φυσικός Christiaan Huygens κατέληξε το 1690 στην διαπίστωση ότι κάθε σημείο ενός διαδιδόμενου μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως σημειακή πηγή δευτερευόντων σφαιρικών μετώπων, τέτοια ώστε σε μια επόμενη στιγμή το επόμενο μέτωπο να σχηματίζεται από την επαφτομένη των δευτερευόντων (Σχήμα 1.12). Σαν προέκταση της προηγούμενης αρχής, αν το μέτωπο κύματος διαδίδεται με ταχύτητα u και συχνότητα f , τότε και τα δευτερεύοντα μέτωπα θα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά.



Σχήμα 1.12 Αρχή του Huygens. Διάθλαση επίπεδου κύματος. Ανάλυση μετώπου σε σημειακές πηγές σφαιρικών κυμάτων

https://en.wikipedia.org/wiki/Huygens%E2%80%93Fresnel_principle

Κεφάλαιο 1: Φως

Τέλος ορίζονται τα μεγέθη ανακλαστικότητας και μεταδοτικότητας ως ο λόγος της ισχύος ανάκλασης και μετάδοσης προς την ισχύ πρόσπτωσης αντίστοιχα:

$$R = I_r / I_i \quad [1.29]$$

$$T = I_t \cos \theta_t / I_i \cos \theta_i \quad [1.30]$$

Όπου I_r το μέρος της ισχύος της δέσμης που ανακλάται κι αντίστοιχα I_t το μέρος της ισχύος που διαθλάται.

Από το νόμο του Snell [1.28] είναι σαφές πως υπάρχει μια τέτοια γωνία θ_i της οποίας το ημίτονο είναι ίσο με 1. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω προκύπτει ο νόμος της ολικής εσωτερικής ανάκλασης με $n_i > n_t$:

$$\sin \theta_c = \frac{n_t}{n_i} \quad [1.31]$$

Όπου θ_c ονομάζεται κρίσιμη γωνία και για τιμές $\theta_i \geq \theta_c$ όλη η προσπίπτουσα ακτίνα μετατρέπεται σε ανακλώμενη. Η θ_c είναι η τιμή της γωνίας πρόσπτωσης όπου $\theta_t = 90^\circ$.

1.2.3 Συμβολή

Η συμβολή είναι το φαινόμενο που προκύπτει απ' την αλληλεπίδραση δύο ή περισσότερων φωτεινών κυμάτων. Αποτέλεσμα της είναι μια αθροιστική ένταση ακτινοβολίας. Συνεπώς είναι πιο δόκιμο το φαινόμενο να προσεγγιστεί με όρους έντασης ακτινοβολίας (irradiance).

Αν δύο σημειακές πηγές σε απόσταση a πολύ μεγαλύτερη του μήκους κύματος λ , εκπέμπουν μονοχρωματικά κύματα κοινής συχνότητας \vec{U}_1 και \vec{U}_2 , η σχέση των εντάσεων που προκύπτει ανεξάρτητα από το σχήμα του μετώπου κύματος (επίπεδο, σφαιρικό, κυλινδρικό, κ.α.) είναι:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad [1.32]$$

Ο τελευταίος όρος ονομάζεται *όρος συμβολής* και αποτυπώνεται ως:

$$I_{12} = 2\langle \vec{U}_1 \vec{U}_2 \rangle = 2U_1 U_2 \cos \delta = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad [1.33]$$

Κεφάλαιο 1: Φως

Η τελευταία σχέση ισχύει για την ειδική αλλά και συνηθέστερη περίπτωση που τα πλάτη των οπτικών πεδίων είναι μεταξύ τους παράλληλα και το διανυσματικό γινόμενο ανάγεται σε αλγεβρικό. Το όρισμα δ του συνημίτονου εκφράζει τη *διαφορά φάσης* των δύο κυμάτων είτε λόγω διαφοράς αρχικών φάσεων, είτε λόγω διαφοράς οπτικών αποστάσεων. Το σημαντικότερο στο σημείο αυτό είναι να αναφερθεί πως η συμβολή είναι ένα φαινόμενο που οπτικοποιεί τη διαφορά φάσης δύο ή περισσότερων κυμάτων ή καλύτερα την ενσωματώνει στην ένταση ακτινοβολίας. Η τελευταία ιδιότητα είναι θεμελιώδης για την ολογραφία.

Συνεχίζοντας την ανάλυση της έντασης ακτινοβολίας για δύο σημειακές πηγές το τελικό αποτέλεσμα οδηγεί σε ποικίλα συμπεράσματα:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad [1.34]$$

Εφόσον η συνολική ένταση εξαρτάται από τον όρο του συνημίτονου και κατά προέκταση τη διαφορά φάσης των δύο κυμάτων τότε θα βρίσκεται ενδιάμεσα δύο τιμών. Τα είδη συμβολής που διακρίνονται βάση αυτού του χαρακτηριστικού είναι:

- απόλυτα ενισχυτική συμβολή: $\cos \delta = 1$,
- ενισχυτική συμβολή: $0 < \cos \delta < 1$,
- αναιρετική συμβολή: $-1 < \cos \delta < 0$,
- απόλυτα αναιρετική συμβολή: $\cos \delta = -1$.

Στην ειδική περίπτωση που τα πλάτη των επί μέρους κυμάτων ταυτίζονται τότε:

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0(\cos \frac{\delta}{2})^2, \text{ με } I_{max} = 4I_0 \text{ και } I_{min} = 0 \quad [1.35]$$

Ενδιαφέρον εμφανίζει η περίπτωση σφαιρικών κυμάτων όπου η διαφορά φάσης διατυπώνεται σε όρους ακτινικής απόστασης:

$$\delta = k(r_1 - r_2) \quad [1.36]$$

και η εξίσωση [1.34] εμφανίζει μέγιστες και ελάχιστες τιμές ως εξής:

$$\delta = 2\pi m \text{ και } r_1 - r_2 = \frac{2\pi}{k} m = m\lambda \text{ για μέγιστες τιμές, όπου } m=0,1,2,3,\dots \quad [1.37]$$

$$\delta = m'\pi \text{ και } r_1 - r_2 = \frac{m'}{k}\pi = \frac{m'}{2}\lambda \text{ για ελάχιστες τιμές, με } m' = (2m+1) \quad [1.38]$$

Κεφάλαιο 1: Φως

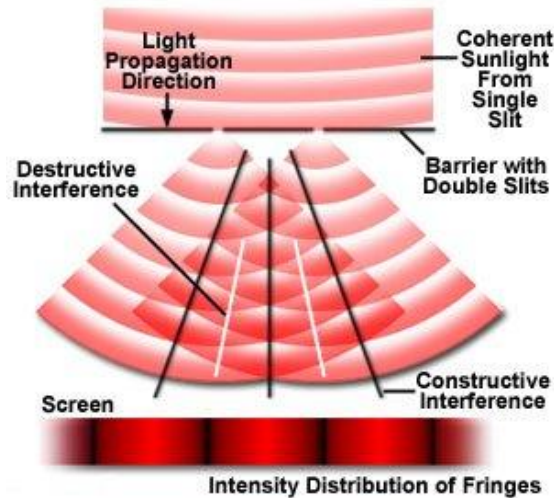
Οι φωτεινές και σκοτεινές περιοχές που γίνονται ορατές ονομάζονται κροσσοί συμβολής και σχηματίζονται ακριβώς βάση της έντασης ακτινοβολίας και των διακυμάνσεών της.

Ως συνέπεια της παραπάνω ανάλυσης είναι σημαντικό να αναγνωριστούν οι προϋποθέσεις που χρειάζονται έτσι ώστε δύο ακτινοβολίες να συμβάλλουν:

- απαιτείται κοινή ή σχεδόν κοινή συχνότητα,
- η καθαρότητα των κροσσών συμβολής εξαρτάται από τη σχέση του πλάτους των συμβαλλόμενων κυμάτων, κοντινά πλάτη οδηγούν σε πιο διακριτούς κροσσούς,
- απαιτείται συμφωνία (coherence) των πηγών.

Το τελευταίο χαρακτηριστικό αφορά τη φάση των δύο πηγών. Η απαίτηση εδώ δεν είναι οι δύο πηγές να έχουν ταυτόσημη φάση, να είναι δηλαδή συμφασικές. Αυτό που απαιτείται είναι οι φάσεις τους να έχουν σταθερή διαφορά κι αυτό το χαρακτηριστικό τις καθιστά σύμφωνες. Όσον αφορά τη συμφωνία (coherence) των πηγών είναι χρήσιμος ο διαχωρισμός σε χρονική συμφωνία και σε χωρική συμφωνία. Ως χρονική συμφωνία (temporal coherence) ορίζεται το χρονικό διάστημα στο οποίο το εκπεμπόμενο κύμα ταλαντώνεται σαν καθαρή αρμονική συνάρτηση, ενώ η χωρική συμφωνία (spatial coherence) ορίζεται το μήκος στο οποίο η ταλάντωση είναι καθαρά αρμονική. Χρειάζεται να σημειωθεί πως η χρονική συμφωνία συνδέεται άμεσα με τη φασματική καθαρότητα μιας ακτινοβολίας, δηλαδή με την κατάταξή της ως μονοχρωματική ή σχεδόν μονοχρωματική. Αυτή η ιδιότητα των φωτεινών πηγών προσεγγίστηκε επαρκώς με την τεχνολογία των laser.

Ο Άγγλος φυσικός Thomas Young σε πείραμα που διετέλεσε το 1801 χρησιμοποίησε σύμφωνο φως (*coherent light*). Η διάταξη του Young είναι σχετικά απλή: σημειακή πηγή σύμφωνου φωτός εκπέμπει πάνω σε επιφάνεια με δύο κοντινές πολύ μικρές οπές. Το φως διαδίδεται μέσα από τις οπές και εφόσον προέρχεται από κοινή πηγή, οι δύο οπές λειτουργούν ως σύμφωνες σημειακές πηγές που οδηγούν τα κύματα που εκπέμπουν σε συμβολή. Το προφίλ της συμβολής προβάλλεται σε ανάλογη επιφάνεια σε απόσταση από το επίπεδο των πηγών (Σχήμα 1.13).



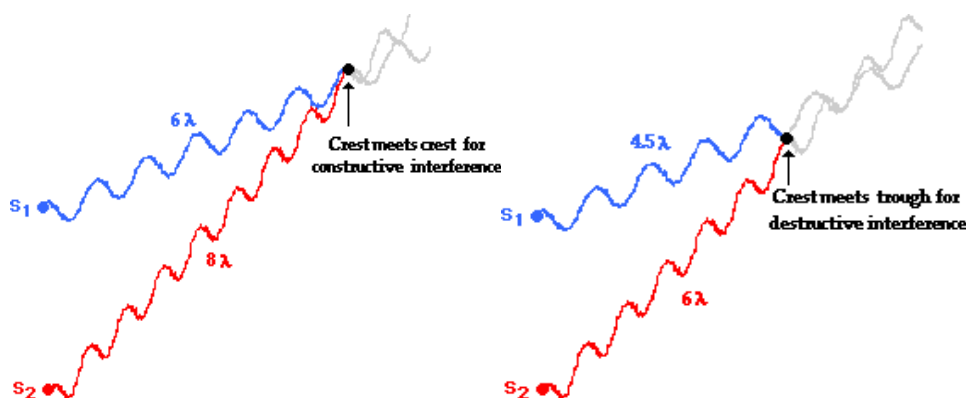
Σχήμα 1.13 Πειραματική διάταξη Young και προφίλ συμβολής. Σύμφωνο ηλιακό φως. Διεύθυνση διάδοσης φωτός. Εμπόδιο δύο οπών. Καταστρεπτική Συμβολή - Ενισχυτική Συμβολή. Οθόνη. Κατανομή έντασης - Κροσσοί

<https://slidetodoc.com/diffraction-and-interference-physics-1112-light-light-has/>

Για την ανάλυση του προφίλ συμβολής και των σημείων και γραμμών κοιλίας και δεσμού εισάγεται η ποσότητα της μεταβολής οπτική διαδρομής (optical path difference) ενός σημείου P από τις δύο σημειακές πηγές S_1 και S_2 . Αποδεικνύεται πως για τα σημεία κοιλίας η διαφορά απόστασης ισούται με ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος των πηγών. Στην περίπτωση των σημείων δεσμών η διαφορά απόστασης ισούται με ημιακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος (Σχήμα 1.14).

κοιλίες (antinodal points): $OPD = m\lambda$, όπου $m = 0,1,2,3, etc.$ [1.42]

δεσμοί (nodal points): $OPD = \frac{m'}{2}\lambda$, όπου $m' = 2m + 1$ [1.43]

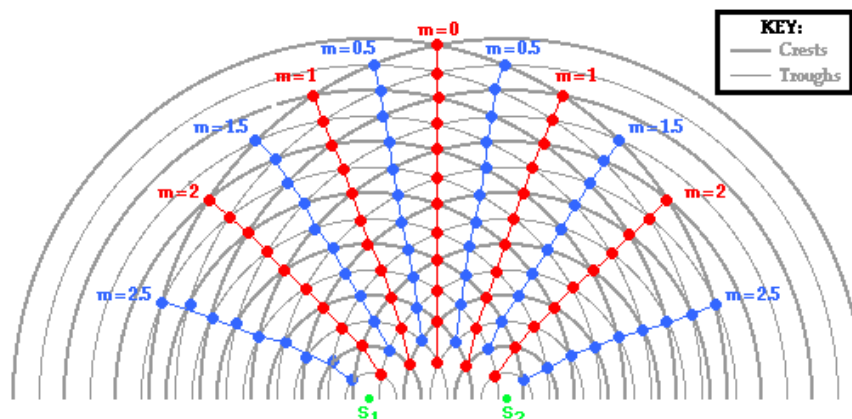


Σχήμα 1.14 (α) Ενισχυτική συμβολή (Υπέρθωση κοιλίων) - Ακέραια διαφορά οπτικής διαδρομής (β) Καταστρεπτική συμβολή (Υπέρθωση κοιλίας - δεσμού) - Ημιακέραια διαφορά οπτικής διαδρομής

<https://www.physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/The-Path-Difference>

Κεφάλαιο 1: Φως

Όλα τα σημεία που βρίσκονται σε κοινή γραμμή κοιλίας, είτε αριστερά είτε δεξιά της κεντρικής γραμμής κοιλίας ($m=0$) χαρακτηρίζονται από κοινή μεταβολή οπτικής διαδρομής. Οι γραμμές κοιλίας αριθμούνται με αύξοντα αριθμό εκατέρωθεν της κεντρικής γραμμής κοιλίας, ίδιο με το ακέραιο πολλαπλάσιο μήκους κύματος που εκφράζει τη διαφορά απόστασης. Σε πλήρη αντιστοιχία οι γραμμές δεσμού χαρακτηρίζονται από το ημιακέραιο πολλαπλάσιο μήκους κύματος κατά αύξοντα αριθμό (Σχήμα 1.15).



Σχήμα 1.15 Συμβολή δύο σημειακών πηγών σφαιρικών κυμάτων. Πηγές S_1 και S_2 . Γραμμές Κοιλίας (Κόκκινο χρώμα). Γραμμές Δεσμού (Μπλε χρώμα).

<https://www.physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/The-Path-Difference>

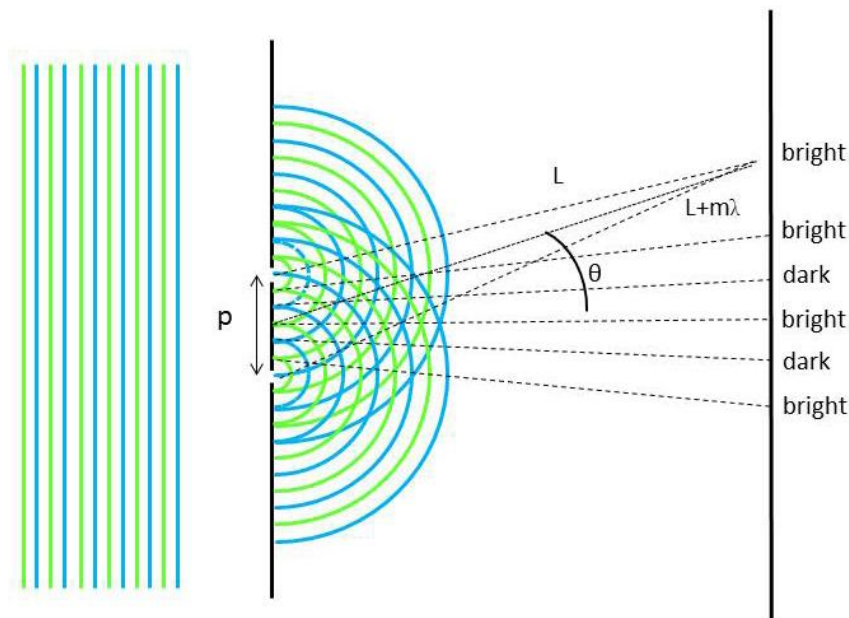
1.2.4 Περίθλαση

Όταν ένα κύμα συναντά στη διεύθυνση της διάδοσής του κάποιο διαφανές ή αδιαφανές εμπόδιο, τότε λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της περίθλασης. Συγκεκριμένα η συνάντηση του κύματος με το εμπόδιο μεταβάλλει είτε το πλάτος, είτε τη φάση του κύματος. Από κει και πέρα τα τμήματα της ακτινοβολίας που μεταβάλλονται και διαδίδονται πέραν του εμποδίου, συμβάλλουν μεταξύ τους δημιουργώντας το προφίλ περίθλασης (diffraction pattern). Είναι σαφές πως τα φαινόμενα περίθλασης και συμβολής είναι κατά πολύ μεγάλο μέρος συνυφασμένα.

Σημαντική για την κατανόηση της περίθλασης αποτελεί η αρχή Fresnel – Huygens: Κάθε σημείο ενός κυματικού μετώπου μπορεί να θεωρηθεί ως σημειακή πηγή δευτερευόντων σφαιρικών κυματικών μετώπων ίδιου μήκους κύματος. Το πλάτος του οπτικού πεδίου σε κάθε σημείο πέραν του αρχικού μετώπου μπορεί να υπολογιστεί από την υπέρθεση όλων των δευτερευόντων κυματικών μετώπων.

Κεφάλαιο 1: Φως

Η κατανομή του φωτός πέραν του εμποδίου παίρνει την μορφή της από τη συμβολή των επί μέρους κυμάτων που προκύπτουν απ' την περίθλαση και ως εκ τούτου άλλοτε συμβάλλουν ενισχυτικά, άλλοτε καταστρεπτικά εξαρτημένα από τη μεταβολή της οπτικής διαδρομής OPD. Ήδη η αναλογία με το πείραμα Young είναι εμφανής (Σχήμα 1.16).



Σχήμα 1.16 Περίθλαση δέσμης φωτός από δύο οπές. Συμβολή σφαιρικών κυμάτων. **P:** απόσταση οπών. Τυχαία γραμμή κοιλίας **m**. **θ:** γωνία γραμμής με τον κάθετο άξονα. **L** και **(L + mλ)** Αποστάσεις από τις δυο οπές.

<https://www.izentis.com/products/diffraction-gratings/>

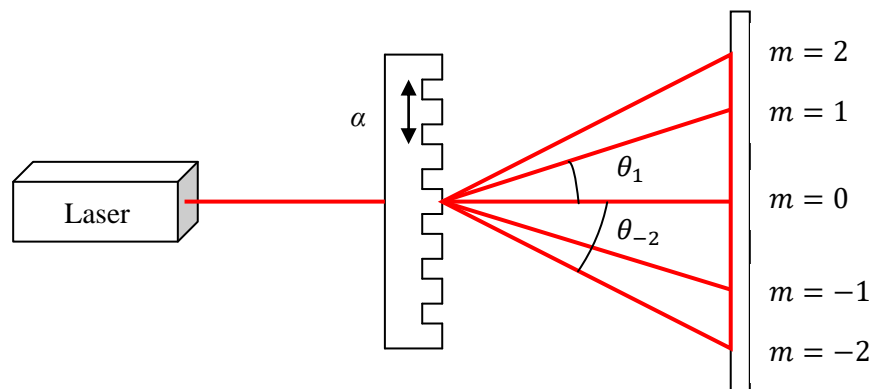
Η αρχή Fresnel – Huygens δηλώνει πως το προφίλ της περίθλασης διαμορφώνεται από φανταστικές, ανεξάρτητες σημειακές πηγές. Ένας σαφής διαχωρισμός του φαινομένου της περίθλασης συμβαίνει με βάση τις αποστάσεις πηγής - εμποδίου και εμποδίου - επιπέδου παρατήρησης. Αν το επίπεδο παρατήρησης απέχει λίγο από το εμπόδιο, τότε οι κροσσοί της συμβολής γίνονται πιο διακριτοί. Η περίπτωση αυτή που το επίπεδο παρατήρησης βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το επίπεδο του εμποδίου ονομάζεται περίθλαση Fresnel και αποτελεί ένα αρκετά περίπλοκο φαινόμενο της σύγχρονης φυσικής. Αν η παραπάνω απόσταση γίνει αρκετά μεγαλύτερη, σταδιακά οι κροσσοί εξαλείφονται. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται περίθλαση Fraunhofer. Το κριτήριο που σηματοδοτεί την περίθλαση Fraunhofer είναι:

$$R > b^2/\lambda \quad [1.44]$$

Κεφάλαιο 1: Φως

Όπου b το πλάτος του εμποδίου και R η μικρότερη των αποστάσεων από την πηγή στο εμπόδιο ή από το εμπόδιο στο επίπεδο παρατήρησης.

Μια επαναλαμβανόμενη συστοιχία εμποδίων ή οπών που έχει ως αποτέλεσμα τις διακυμάνσεις στη φάση ή το πλάτος των κυμάτων που δημιουργούν, ονομάζεται φράγμα περίθλασης (diffraction grating). Ένα μέτωπο κύματος που διαπερνά μια τέτοια διάταξη, διαμορφώνεται από αλληπάλληλα διαστήματα αδιαφάνειας και διαφάνειας. Ένα απόλυτα διαφανές φράγμα που έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή φάσης λόγω του πάχους ονομάζεται φράγμα φάσης μετάδοσης (transmission phase grating). Ένα μέτωπο κύματος που εκπέμπεται από ένα φράγμα υπόκειται περισσότερο σε μεταβολές σχήματος (φάσης), παρά πλάτους. Τέλος για την περίπτωση της ανάκλασης υπάρχουν τα ανακλαστικά φράγματα φάσης (reflection phase gratings). Οι γραμμές κοιλίας που εμφανίζονται κατά την περίθλαση ονομάζονται τάξεις περίθλασης κι αριθμούνται για $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (Σχήμα 1.17).



Σχήμα 1.17 Πηγή Laser. Φράγμα περίθλασης. Απόσταση οπών (a). Τάξεις περίθλασης. Γωνίες Κροσσών θ_m .

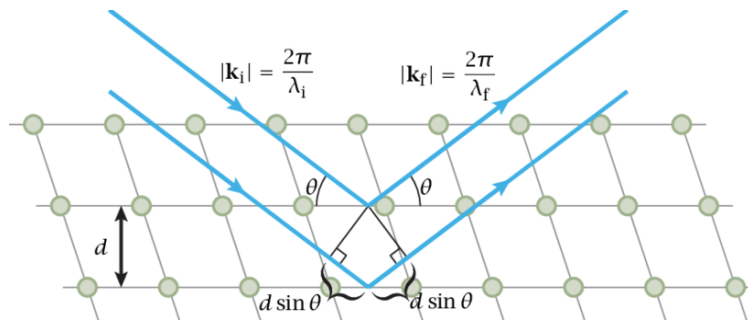
Η εξίσωση φράγματος που προσδιορίζει το προφίλ περίθλασης διατυπώνεται ως εξής:

$$a \sin \theta_m = m\lambda \quad [1.45]$$

Κεφάλαιο 1: Φως

Ένας κρύσταλλος αποτελεί ένα τρισδιάστατο φράγμα περίθλασης. Το κρυσταλλικό ατομικό πλέγμα είναι μία συστοιχία εμποδίων, εν προκειμένω μορίων, με ομοιόμορφη κατανομή. Στην περίπτωση αυτή η ενισχυτική συμβολή λαμβάνει χώρα όποτε η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας ακτίνας και των ατομικών επιπέδων του κρυστάλλου υπακούουν στο νόμο του Bragg (Σχήμα 1.18):

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad [1.46]$$



Σχήμα 1.18 Ατομικό πλέγμα. Προσπίπτουσα ακτίνα. Ανακλώμενη ακτίνα. Γωνία Bragg.

https://www.researchgate.net/figure/Figure-A1-Illustration-to-derive-the-Bragg-law-showing-the-ingoing-and-outgoing-beams_fig19_293632910

Η πόλωση μιας ακτινοβολίας είναι τα χαρακτηριστικό που εκφράζει τη διεύθυνση του επιπέδου στο οποίο ταλαντώνεται το ηλεκτρικό πεδίο του κύματος. Η πόλωση – p (p – polarization) αναφέρεται σε επίπεδο παράλληλο στο επίπεδο πρόσπτωσης και ανάκλασης, αντίθετα από την πόλωση – s (s – polarization) που αναφέρεται σε κάθετη διεύθυνση.

Όταν μια μη πολωμένη φωτεινή ακτινοβολία προσπίπτει υπό γωνία σε μια γυάλινη επιφάνεια ένα μέρος της ανακλάται κι ένα μεταδίδεται. Αμφότερες οι ακτινοβολίες που προκύπτουν πολώνονται μερικώς και πιο συγκεκριμένα η ανακλώμενη δέσμη σε s – πόλωση, ενώ η μεταδιδόμενη δέσμη σε p – πόλωση. Ο βαθμός πόλωσης εξαρτάται από το πόσο ορισμένο και σταθερό είναι το επίπεδο στο οποίο ταλαντώνεται τα οπτικό πεδίο. Η πόλωση είναι ένα από τα χαρακτηριστικά των δεσμών που εκπέμπονται από τα laser. Αποτελεί μία από τις αναγκαίες παραμέτρους για την ολογράφηση ενός αντικειμένου, εφόσον βοηθά στην συμβολή των κυμάτων και την ενίσχυση των κροσσών.

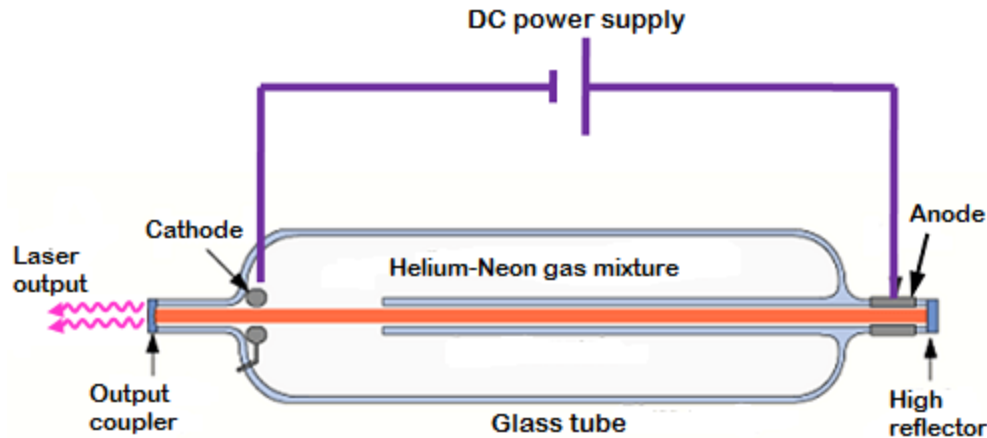
1.3 Τεχνολογία LASER (Light Amplification by Stimulated Emission Radiance)

Το 1960 ο Theodore H. Maiman κατασκεύασε την πρώτη διάταξη laser. Δηλαδή την πρώτη συσκευή παραγωγής κι ενίσχυσης φωτεινής ακτινοβολίας που βασίζεται στην εκπομπή διέγερσης (stimulated emission). Ως τότε τα χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων ακτινοβολιών ήταν αρκετά περιορισμένα όσον αφορά τη μονοχρωμία, την πόλωση (polarization), τη συμφωνία (coherence) και την ευθυγράμμιση (collimation). Τα τέσσερα αυτά χαρακτηριστικά είναι απολύτως αναγκαία για την ολογραφία κάποιου αντικειμένου.

Οι βασικές αρχές της λειτουργίας ενός laser είναι αρκετά απλές. Χρησιμοποιούνται δύο μέσα: το μέσο άντλησης (pumping medium) και το μέσο εκπομπής (lasing medium). Αρχικά τα άτομα του μέσου άντλησης διεγείρονται από μία εξωτερική πηγή ενέργειας που συνήθως είναι ηλεκτρική. Η διέγερση αυτή αυξάνει την κινητική ενέργεια των ατόμων του μέσου, έτσι ώστε οι ελαστικές κρούσεις μεταξύ των ατόμων του μέσου άντλησης και του μέσου εκπομπής να πληθαίνουν και η ενέργεια να μεταφέρεται. Με τον τρόπο αυτό διεγείρονται κάποια άτομα του μέσου εκπομπής και στη συνέχεια εκπέμπουν πηγαία.

Τα εκπεμπόμενα φωτόνια οδηγούνται στην οπτική κοιλότητα (optical cavity). Η κοιλότητα αποτελείται από έναν σωλήνα και δύο κάτοπτρα, ένα ολικής κι ένα μερικής ανακλαστικότητας. Εκεί δημιουργείται παλινδρομική κίνηση των φωτονίων, εκτοξεύοντας τις πιθανότητες εκπομπών διέγερσης στα άτομα του μέσου εκπομπής. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ενίσχυση και εκπομπή τη φωτεινής ακτινοβολίας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ευρείας χρήσης τη τεχνολογίας laser είναι τα laser αερίου (Gas Laser). Εδώ και τα δύο μέσα είναι αέρια και ο τρόπος παροχής της αρχικής ενέργειας γίνεται μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Το δημοφιλέστερο παράδειγμα laser αερίου είναι το laser ηλίου – νέου (HeNe laser), το σύστημα αποτελείται από ένα κέλυφος όπου βρίσκεται περίσσειμα μίγματος αερίου Ηλίου και Νέου. Εσωτερικά του κελύφους βρίσκεται ένας σωλήνας. Εντός του σωλήνα η φωτεινή δέσμη ενισχύεται με διεγερμένη εκπομπή. Ανάμεσα στα δύο κάτοπτρα (ανάκλασης high reflector – εξόδου output coupler) βρίσκεται σύστημα ανόδου-καθόδου, απαραίτητο για την αρχική διέγερση του μέσου που θα εκπέμψει τη δέσμη (Σχήμα 1.19).



Σχήμα 1.19 Τομή διάταξης Laser Ηλίου - Νέου. Ηλεκτρική πηγή διέγερσης (Άνοδος - Κάθοδος). Γυάλινο Κέλυφος Laser. Μείγμα Ηλίου - Νέου. Σωλήνας Ενίσχυσης. Ανακλαστικά Κάτοπτρα (Δεξιά: Υψηλής ανακλαστικότητα, Αριστερά: Μερικής ανακλαστικότητα). Εκπομπή Laser.

<https://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/heliumneonlaser.html>

Τα HeNe laser λειτουργούν σε φόρτιση υψηλής τάσης (kV) και χαμηλής έντασης ρεύματος (mA) και η συνήθης εκπομπή τους έχει μήκος κύματος 633 nm (ερυθρό φως). Παρ' όλα αυτά διατίθενται και για εκπομπές σε μήκη κύματος 543 nm (πράσινο), 594 nm (κίτρινο), 612 nm (πορτοκαλί) και 1523 nm (εγγύς υπέρυθρη περιοχή). Η ισχύς της δέσμης εξόδου είναι χαμηλή και κυμαίνεται από κάποια δέκατα έως κάποιες δεκάδες mW σε εξάρτηση με το επιθυμητό μήκος κύματος της δέσμης και το διαθέσιμο μέγεθος του laser.

Το μίγμα αποτελείται συνήθως από μια σύσταση 85% Ήλιο και 15% Νέο, ωστόσο το Νέο είναι το μέσο εκπομπής των φωτονίων της δέσμης. Η αρχική φόρτιση των ηλεκτροδίων διεγείρει τα άτομα του Ηλίου, τα οποία φέρουν ποσό ενέργειας περίπου ίσο με αυτό που χαρακτηρίζει τις υψηλότερες καταστάσεις ενέργειας των ατόμων του Νέου. Εν συνεχεία τα άτομα του Ηλίου μεταφέρουν την απορροφημένη ενέργειά τους στα άτομα του Νέου, διαμέσου συγκρούσεων, και τα διεγείρουν έτσι ώστε να εκπέμπουν φωτόνια.

Η ευρεία απήχηση των HeNe laser έγκειται σε πέντε βασικά στοιχεία τους:

- σχετικά με άλλες διατάξεις laser, το μέγεθός τους είναι μικρό και χρηστικό,
- είναι εξαιρετικά μακρόβια, με πραγματικά παραδείγματα χρόνου λειτουργίας 50 000 ωρών λειτουργίας,
- παράγουν σχετικά μικρά ποσά θερμότητας, πράγμα που καθιστά την ψύξη τους αρκετά εύκολη,
- είναι εύκολα στην χρήση και οικονομικά προσιτά.

Κεφάλαιο 1: Φως

Φυσικά το laser HeNe δεν είναι το μοναδικό της κατηγορίας αερίου. Αντίστοιχες διατάξεις είναι αυτές του Ήλιου-Καδμίου (HeCd), των ιόντων ευγενούς αερίου (Αργό Ar, Κρυπτό Kr) και του Διοξειδίου του Άνθρακα (Carbon Dioxide CO₂). Οι παραπάνω διατάξεις στηρίζονται στις ίδιες αρχές με αυτές που παρουσιάστηκαν.

1.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφηκαν οι βασικές αρχές που από τη σύνθεσή τους προκύπτει η μέθοδος της ολογραφίας. Αρχικά η κυματική φύση του φωτός και πιο συγκεκριμένα τα φαινόμενα περίθλασης και συμβολής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι αυτά που σχηματίζουν τους κροσσούς που εγγράφονται σε ένα ολόγραμμα. Η σωματιδιακή φύση του φωτός θέτει τις βάσεις για τη λειτουργία των LASER. Τα LASER είναι οι ιδανικές πηγές φωτός για την ολογραφία καθώς προσδίδουν στις εκπεμπόμενες δέσμες την απαραίτητη χρονική και χωρική συμφωνία, τη μονοχρωμία, την ευθυγράμμιση και την απαραίτητη ισχύ που χρειάζεται η μέθοδος. Με τον τρόπο αυτό βελτιστοποιούνται οι συνθήκες συμβολής των κυμάτων και οι κροσσοί που σχηματίζονται. Το εύρος του φάσματος ακτινοβολίας το οποίο χρησιμοποιείται είναι συνήθως αυτό του ορατού φωτός. Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο η ολογραφία συντίθεται βασισμένη στα παραπάνω φαινόμενα.

ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Ολογραφία ονομάζεται η επιστήμη που μελετά την καταγραφή του συνόλου των χαρακτηριστικών ενός οπτικού μετώπου κύματος (πλάτος (amplitude) και φάση (phase)) σε κατάλληλο υλικό εγγραφής. Το αποτέλεσμα της καταγραφής ονομάζεται ολόγραμμα κι αντίθετα με τη φωτογραφία, όπου ένα τρισδιάστατο πλάνο απεικονίζεται σε δισδιάστατη μορφή, η ολογραφία εγγράφει κι απεικονίζει τρεις διαστάσεις.

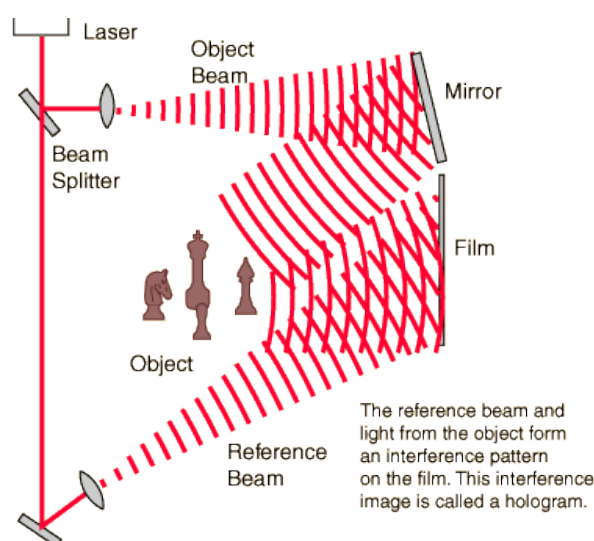
Για την ολογραφία ενός αντικειμένου υπάρχουν ορισμένες προϋποθέσεις. Όσον αφορά στην ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας απαιτείται μια ομοιόμορφη κατανομή. Υψηλότερες απαιτήσεις συναντώνται σε ό, τι έχει να κάνει με τη φάση της φωτεινής πηγής που χρησιμοποιείται. Είναι απαραίτητη η συμφωνία (coherence) τόσο χρονική (temporal coherence) όσο και χωρική (spatial coherence). Οι δύο αυτές παράμετροι μπορούν να μεταφραστούν πρακτικά στο ότι η δέσμη φωτός που χρησιμοποιείται στην ολογραφία είναι μονοχρωματική και σταθερή ως προς τη διεύθυνση διάδοσης. Φυσικά οι ιδιότητες αυτές έχουν διαβαθμίσεις, συνεπώς ποτέ μια πηγή δεν είναι απόλυτα σύμφωνη. Ο βαθμός συμφωνίας μιας πηγής ορίζεται από το μήκος συμφωνίας (coherence length) και τον χρόνο συμφωνίας (coherence time). Οι πηγές laser διαθέτουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά συμφωνίας και γι' αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην ολογραφία.

2.2 Βασικές Αρχές Ολογραφίας

Η βασική ιδέα της ολογραφίας εμφανίστηκε το 1948 από τον Ούγγρο μηχανικό Dennis Gabor. Η διαδικασία της ολογραφίας περιέχει δύο βασικά στάδια. Το πρώτο ονομάζεται εγγραφή (recording) και στηρίζεται στο φαινόμενο της συμβολής. Μια σύμφωνη μονοχρωματική πηγή εκπέμπει ακτινοβολία η οποία χωρίζεται σε δύο δέσμες μέσω διαχωριστή (beam splitter). Η μία δέσμη προσκρούει στο προς ολογραφία αντικείμενο (object), το μέτωπο κύματος αναδιαμορφώνεται και ύστερα προσπίπτει στην επιφάνεια εγγραφής από κατάλληλο υλικό εγγραφής (recording media).

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Το τμήμα αυτό του αρχικού κύματος ονομάζεται κύμα αντικειμένου (object wave) ή δέσμη αντικειμένου (object beam). Η δεύτερη δέσμη ονομάζεται δέσμη αναφοράς (reference beam) ή κύμα αναφοράς (reference wave) και προσπίπτει στην επιφάνεια εγγραφής αφού συμβάλλει με τη δέσμη αντικειμένου (Σχήμα 2.1). Όπως είναι φυσικό η συμβολή των δύο κυμάτων οδηγεί στη διαμόρφωση κροσσών συμβολής (interference fringes). Τα χαρακτηριστικά των κροσσών συμβολής εξαρτώνται απόλυτα από τις εντάσεις και τις φάσεις των δύο συμβαλλόμενων κυμάτων κι ως εκ τούτου αποτελούν την μετατροπή των πληροφοριών αυτών σε μια κατανομή εντάσεων που είναι εγγράψιμη. Συνεπώς στο επίπεδο του υλικού εγγραφής καταγράφεται το προφίλ της συμβολής (interference pattern) των δύο δεσμών κι αυτό ονομάζεται *ολόγραμμα*.

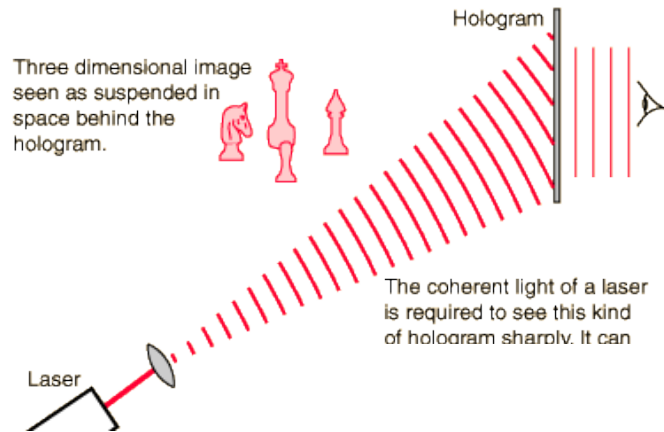


Σχήμα 2.1 Εγγραφή ολογράμματος: Πηγή Laser, Διαχωριστής, Φακοί, Δέσμη Αντικειμένου, Καθρέφτες, Αντικείμενο, Δέσμη Αναφοράς, Υλικό Εγγραφής. Δέσμη αναφοράς και δέσμη αντικειμένου αποτυπώνουν τους κροσσούς συμβολής στο υλικό εγγραφής. Αυτή η αποτύπωση ονομάζεται ολόγραμμα.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/holog2.html>

Το δεύτερο στάδιο ονομάζεται ανασκευή (reconstruction). Εδώ χρησιμοποιείται μία μονάχα δέσμη φωτός που προσπίπτει στο ολόγραμμα κι ονομάζεται δέσμη ή κύμα ανασκευής (reconstruction beam/wave). Τα χαρακτηριστικά της δέσμης ανασκευής εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των δεσμών εγγραφής. Εδώ το ολόγραμμα λειτουργεί σαν ένα πολύπλοκο φράγμα περίθλασης (diffraction grating). Οι κροσσοί συμβολής που έχουν αναπτυχθεί στο υλικό εγγραφής μεταβάλλουν το κύμα ανασκευής δίνοντάς του τα χαρακτηριστικά της δέσμης αντικειμένου. Με αυτόν τον τρόπο ένα ολόγραμμα λειτουργεί σαν ένα παράθυρο, όπου ο θεατής βλέπει το αντικείμενο με πλήρη παράλλαξη (parallax) (Σχήμα 2.2).

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία



Σχήμα 3.2 Ανασκευή ολογράμματος: Πηγή Laser, Φακός, Ολόγραμμα, Παρατηρητής.

Τρισδιάστατη εικόνα που παρατηρείται στον χώρο πίσω από το ολόγραμμα.

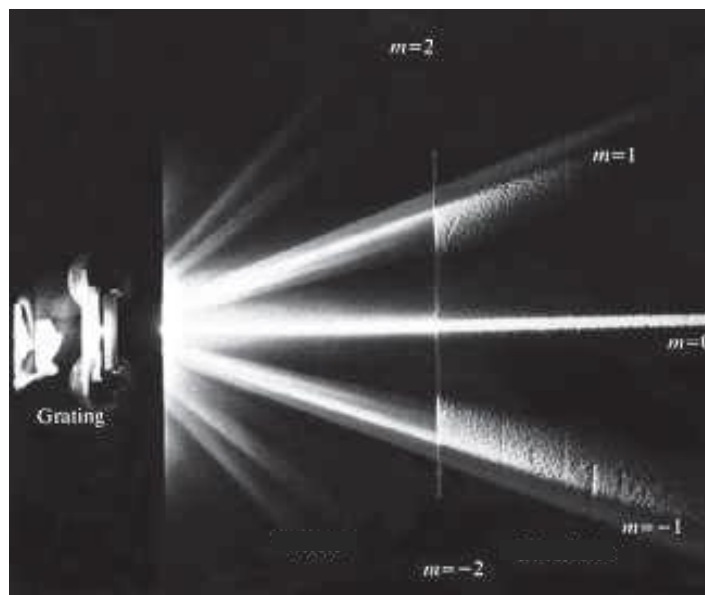
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/holog2.html>

Αξίζει να σημειωθεί πως το μέγεθος των κροσσών συμβολής που εγγράφεται στο μέσον δεν είναι διακριτό με γυμνό μάτι. Για δύο επίπεδα μέτωπα κύματος που διαδίδονται υπό γωνία θ το διάστημα μεταξύ των κροσσών συμβολής που σχηματίζονται δίνεται ως:

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad [2.1]$$

Ανάμεσα στα δύο κύρια στάδια εγγραφής και ανασκευής μεσολαβεί η διαδικασία της ανάπτυξης (developing) του μέσου εγγραφής, μια κυρίως χημική διεργασία που αποσκοπεί στην μετατροπή του εγγεγραμμένου υλικού σε μορφή έτοιμη για ανασκευή ανάλογα το υλικό εγγραφής που χρησιμοποιείται. Το τελικό ολόγραμμα προκύπτει με την μεταβολή της διαφάνειας, του δείκτη διάθλαση ή του ανάγλυφου ανάλογα με την ένταση των κροσσών συμβολής που έχουν εγγραφεί. Η μεταβολή αυτή είναι που οδηγεί τελικά το υλικό στη λειτουργία ενός φράγματος περίθλασης (Σχήμα 2.3).

Η δέσμη ανασκευής που προσπίπτει στο ολόγραμμα επί της ουσίας περιθλάται και ομοιάζει με αυτή του μετώπου κύματος του αντικειμένου. Πολύ συχνά η δέσμη ανασκευής ταυτίζεται ως προς τον προσανατολισμό με τη δέσμη αναφοράς. Κατά την ανασκευή η δέσμη διαπερνά το ολόγραμμα και δημιουργεί προφίλ περίθλασης (diffraction pattern). Οι τάξεις της περίθλασης που εμφανίζονται κατά την ανασκευή ενός ολογράμματος αντιστοιχούν σε ακέραιο $m = -1, 0, 1$ (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4 Φράγμα περίθλασης και τάξεις περίθλασης

Optics E. Hecht Chapter 10: Diffraction σελίδα 498

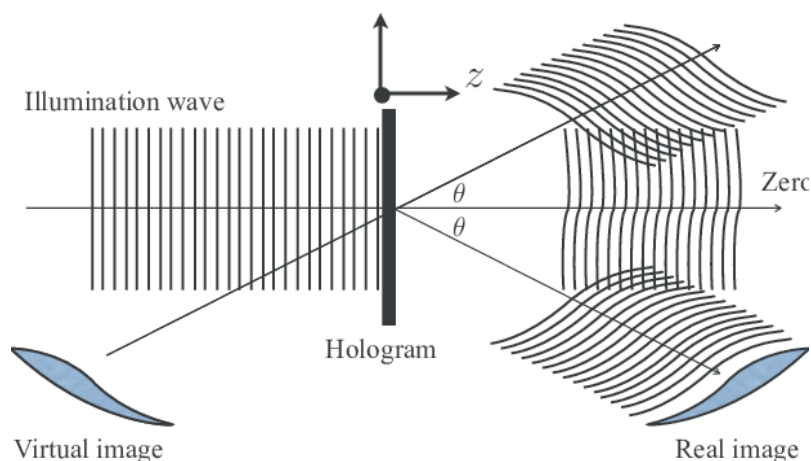
Εφόσον το ολόγραμμα φωτιστεί με τη δέσμη ανασκευής εμφανίζει την εικόνα του αντικειμένου που εγγράφηκε. Η εικόνα αυτή αντιστοιχεί σε μία από τις περιθλαστικές τάξεις. Αυτό που στην πραγματικότητα συμβαίνει είναι ότι η δέσμη ανασκευής χωρίζεται σε τρία μέρη. Η μηδενική τάξη (zero diffraction order, $m=0$) δεν αντιστοιχεί σε καμιά εικόνα κι αποτελεί ένα μέρος της μεταδιδόμενης (transmitted) δέσμης. Οι τάξεις $-1,1$ αντιστοιχούν στο πραγματικό είδωλο (real image) και το εικονικό είδωλο (virtual image).



Σχήμα 2.5 Τάξεις περίθλασης. $m=-1$ (πραγματικό είδωλο), $m=0$ μηδενική τάξη, $m=1$ (εικονικό είδωλο).

Optics E. Hecht Chapter 10: Diffraction σελίδα 498

Τα δύο αυτά είδωλα διαφέρουν σε πολύ βασικά σημεία. Το εικονικό είδωλο ($m = 1$) βρίσκεται ακριβώς στο σημείο που ολογραφήθηκε το αντικείμενο και διαθέτει πλήρη χαρακτηριστικά παράλλαξης, ενώ το πραγματικό είδωλο ($m = -1$) βρίσκεται στην ίδια απόσταση αλλά στην αντίθετη πλευρά του επιπέδου του ολογράμματος (Σχήμα 2.5). Το πραγματικό είδωλο έχει ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό καθώς το βάθος του είναι ανεστραμμένο συνεπώς χαρακτηρίζεται ως ψευδές είδωλο (pseudo image) σε αντίθεση με την κανονική ή ορθοσκοπική εικόνα (normal / orthoscopic image) του εικονικού ειδώλου.



2.6 Ανασκευή ολογράμματος. Προσπίπτον Κύμα, Ολόγραμμα, Εικονικό είδωλο, πραγματικό είδωλο και μηδενική τάξη περίθλασης. Γωνία ανασκευής θ .

https://www.researchgate.net/figure/Off-axis-digital-holography-Reconstruction_fig2_224572194

Οι θέσεις των ειδώλων εξαρτώνται από τη γωνία εγγραφής και ανασκευής του ολογράμματος. Η συνευθειακή ή σχεδόν συνευθειακή σχέση ανάμεσα στα δύο είδωλα δημιουργεί προβλήματα στον παρατηρητή.

Για να διατυπωθούν μαθηματικά οι διαδικασίες της εγγραφής και της ανασκευής ενός ολογράμματος απαιτούνται συχνά σύνθετες μέθοδοι. Επειδή τα υλικά εγγραφής ανταποκρίνονται στην ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι αναγκαίο η μαθηματική ανάλυση των διαδικασιών να γίνεται με όρους εντάσεων.

$$U_o = O(x, y)e^{i\varphi(x, y)} \quad [2.2]$$

$$U_R = Re^{iky \sin \theta} \quad [2.3]$$

Η εξίσωση [2.2] περιγράφει το επίπεδο κύμα αντικειμένου που διαδίδεται στον άξονα z με φάση $\varphi(x, y)$ και πλάτος $O(x, y)$, ενώ η εξίσωση [2.3] το επίπεδο κύμα αναφοράς που διαδίδεται υπό γωνία θ με τον άξονα z. Η ένταση ακτινοβολίας (irradiance) στο επίπεδο του ολογράμματος δίνεται ως:

$$I = |U_R + U_o|^2 = |U_R|^2 + |U_o|^2 + U_R^*U_o + U_o^*U_R \quad [2.4]$$

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Η εξίσωση [2.4] ονομάζεται *εξίσωση ολογράμματος* κι αποτελεί την βασικότερη για την ολογραφία. Στη σχέση εντοπίζονται οι τρεις όροι που εγγράφονται στο ολόγραμμα: ο πρώτος όρος $|U_R|^2 + |U_o|^2$ εκφράζει τον μηδενικό όρο περίθλασης. Ο δεύτερος όρος και ο τρίτος όρος περιγράφουν το εικονικό και πραγματικό είδωλο αντίστοιχα. Το σύμβολο * αντιστοιχεί στο συζυγές μιγαδικό του μεγέθους.

Από την παραπάνω διατύπωση είναι χρήσιμο να σχολιαστεί πως το πλάτος και η φάση του κύματος που προκύπτει από τη συμβολή των δύο δεσμών, μεταφράζονται σε χαρακτηριστικά των κροσσών συμβολής. Κατά την εγγραφή του ολογράμματος σχηματίζεται μια γραμμική χαρτογράφηση της έντασης και της φάσης των κυμάτων αντικειμένου και αναφοράς, ενώ κατά την ανασκευή του ολογράμματος η γραμμική χαρτογράφηση μετατρέπει τη δέσμη ανασκευής σε μέτωπο κύματος με πλάτος και φάση που καθορίζονται από τους εγγεγραμμένους κροσσούς συμβολής. Η μετατροπή αυτή γίνεται είτε με μετάδοση (transmission) είτε με ανάκλαση (reflection) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο υλικό εγγραφής.

Εφόσον το ολόγραμμα ανασκευαστεί φωτιζόμενο από δέσμη ταυτόσημη με τη δέσμη αναφοράς, τότε το πεδίο του μεταδιδόμενου κύματος δίνεται ως εξής:

$$U_t = U_R(T_0 - b\tau(|U_o|^2 + U_R^*U_o + U_o^*U_R)) \quad [2.5]$$

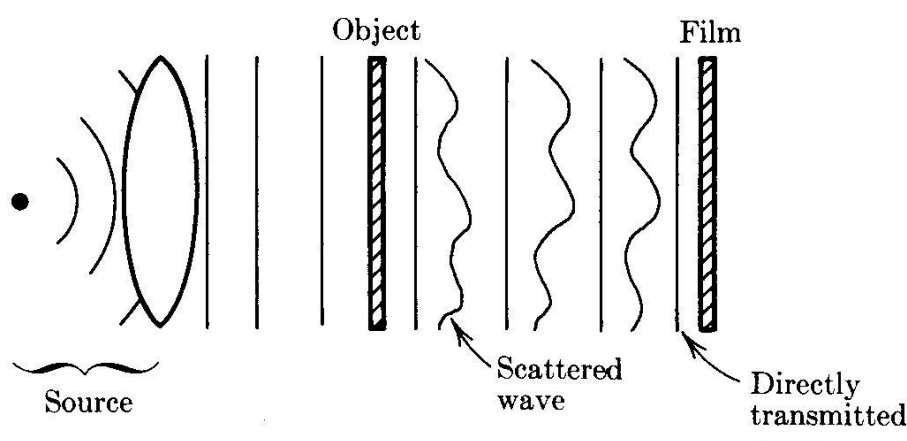
Όπου τ είναι ο χρόνος έκθεσης (exposure time) και T_0 η διαπερατότητα του ανέκθετου (unexposed) υλικού εγγραφής. Ο πρώτος όρος της εξίσωσης [2.5] περιγράφει το μέρος της δέσμης ανασκευής που παραμένει αδιαμόρφωτη από το ολόγραμμα. Ο δεύτερος όρος περιγράφει την διαμόρφωση (modulation) της δέσμης αναφοράς από τον όρο $|U_o|^2 = O^2(x, y)$, δίνοντας έναν όρο διάχυσης (scattering) μικρής απόκλισης από τη διεύθυνση της δέσμης αναφοράς. Ο τρίτος όρος είναι ανάλογος του U_o και ταυτίζεται πλήρως με τη δέσμη αντικειμένου, εφόσον η δέσμη ανασκευής ταυτίζεται με τη δέσμη αναφοράς. Ο τέταρτος όρος περιγράφει το συζυγές κύμα του τρίτου όρου, δηλαδή ένα κύμα κοινού πλάτους κι αναστραμμένης φάσης. Είναι σαφές πως οι ανωτέρω όροι εκφράζουν με αντιστοιχία τους όρους περίθλασης με αρχή τον μηδενικό και ύστερα το εικονικό και πραγματικό είδωλο αντίστοιχα. Βάσει αυτών των αρχών και με γνώση της φυσικής συμπεριφοράς του φωτός η ολογραφία θεμελιώθηκε σταδιακά ως τεχνολογική επιστήμη κι αναπτύχθηκε έως σήμερα σε ένα σπουδαίο εργαλείο για πολλούς τομείς.

2.3 Ιστορική αναδρομή

Η ολογραφία βασίζεται στην κυματική υπόσταση του φωτός και στα φαινόμενα που προσεγγίζονται μέσω αυτής. Η πορεία της μεθόδου από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα έως σήμερα είναι διαρκώς εξελισσόμενη και συνδυαζόμενη με άλλες μεθόδους της επιστήμης φτάνει σε εφαρμογές με σπουδαίες δυνατότητες και ουσιαστικό ερευνητικό ενδιαφέρον.

Η αρχή γίνεται το 1948 από τον Ούγγρο μηχανικό Dennis Gabor μέσω της έρευνάς του για τη βελτίωση της ανάλυσης των εικόνων της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (electron microscopy). Οι δέσμες ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούνταν δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις των πειραμάτων, για τον λόγο αυτό ο Gabor χρησιμοποίησε ορατό φως από λάμπες τόξου υδραργύρου (arc mercury lamps) φιλτραρισμένες με πράσινο φίλτρο περιορισμένου εύρους για να πετύχει την απαραίτητη μονοχρωμία. Παρ' όλα αυτά η συμφωνία της φωτεινής πηγής ήταν στην καλύτερη περίπτωση της τάξεως 1mm (μήκος συμφωνίας).

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε από τον Gabor είναι η εξής: σημειακή πηγή εκπέμπει σφαιρικό μέτωπο κύματος και με τη χρήση φακού ευθυγράμμισης (collimating lens) το μέτωπο προσεγγίζει το επίπεδο. Η δέσμη προσπίπτει στο διαφανές αντικείμενο και κατανέμεται σε ένα μέρος που έχει αναδιαμορφωθεί από την περίθλαση (scattered wave) κι ένα που παραμένει όμοιο με το αρχικό μέτωπο (directly transmitted wave). Το πρώτο μέρος αντιστοιχεί στη λεγόμενη δέσμη αντικειμένου ενώ το δεύτερο στη δέσμη αναφοράς. Τα δύο μέτωπα συνεχίζουν σε κοινή διεύθυνση κι ως εκ τούτου συμβάλλουν. Οι κροσσοί συμβολής εγγράφονται στο φωτοευαίσθητο φιλμ (Σχήμα 2.6).



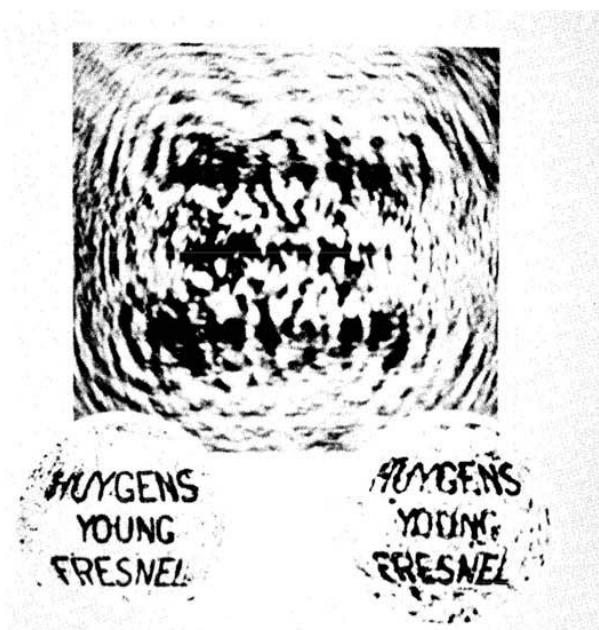
Σχήμα 2.7 Διάταξη εγγραφής ολογράμματος του Gabor (In line holography).

Πηγή, Φακός ευθυγράμμισης, Διαμορφωμένο και αδιαμόρφωτο μέτωπο κύματος αντικείμενο, φιλμ - μέσο εγγραφής.

https://laser.physics.sunysb.edu/_dbennett/optics2/optics2.html

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

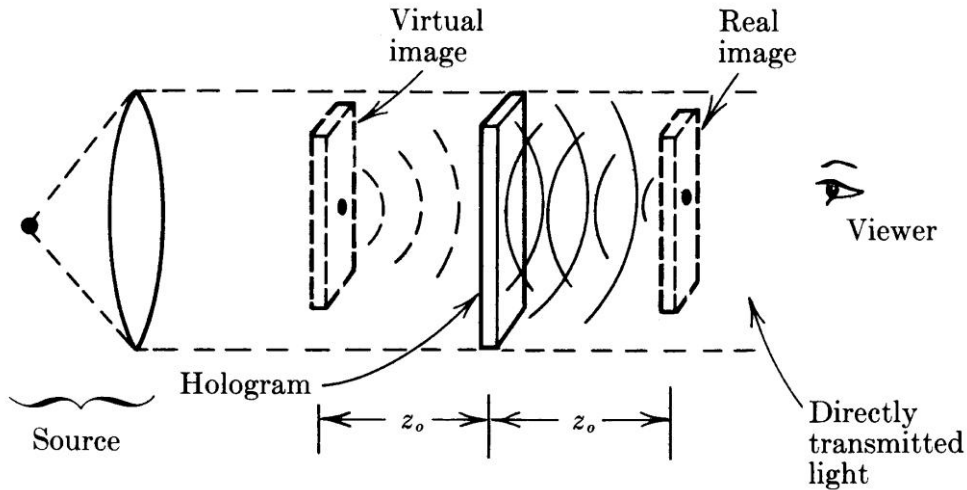
Ο Gabor αποπειράθηκε να ολογραφήσει μια μικρή κυκλική διαφάνεια με αδιαφανή γραφή (Σχήμα 2.7). Η δέσμη που περιθλάται από τα γράμματα συνιστά τη δέσμη αντικειμένου, ενώ αυτή που μεταδίδεται χωρίς περίθλαση από τη διαφάνεια συνιστά τη δέσμη αναφοράς. Η απόσταση μεταξύ του υλικού έγγραφης - εν προκειμένω της φωτογραφικής πλάκας - και του αντικειμένου ήταν 60 cm επιτρέποντας στους κροσσούς συμβολής να είναι τόσο διευρυμένοι ώστε να είναι εγγράψιμοι από ένα απλό φωτογραφικό φιλμ.



Σχήμα 2.8 Το πρώτο ολόγραμμα του Gabor - Διαφάνεια με τα ονόματα των Huygens, Young και Fresnel. Αριστερά κάτω: Κυκλική διαφάνεια, Κέντρο: Το ολόγραμμα, Δεξιά: Ανασκευή του ολογράμματος

<https://www.bbvaopenmind.com/en/science/leading-figures/dennis-gabor-father-of-holography/>

Κατά την ανασκευή ενός ολογράμματος Gabor (*in line*) προκύπτει το εξής πρόβλημα: Η δέσμη αναφοράς και η δέσμη αντικειμένου διαδίδονται στην ίδια ευθεία κι εφόσον το ολόγραμμα καταγραφεί και φωτιστεί με δέσμη ανασκευής ταυτόσημη με αυτή της αναφοράς τότε το πραγματικό είδωλο και το εικονικό είδωλο είναι συνευθειακά (Σχήμα 2.8). Αυτό φυσικά δυσκολεύει τον παρατηρητή να ξεχωρίσει και να μελετήσει το αντικείμενο που ολογραφήθηκε. Ίσως αυτός ο εκφυλισμός να φαίνεται μηδαμινός για το παράδειγμα που εικονίζεται παραπάνω. Σε περιπτώσεις όμως που απαιτούνται λεπτομερές παρατηρήσεις στην κλίμακα των μm , κάθε μορφή παρεμβολής ή θορύβου στο εικονιζόμενο αποτέλεσμα είναι καίριας σημασίας.



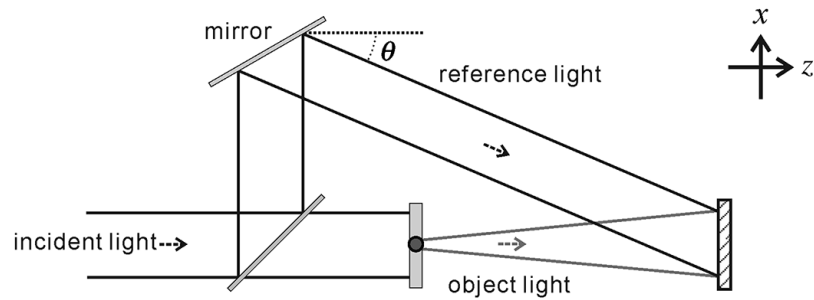
Σχήμα 2.9 Διάταξη ανασκευής ολογράμματος του Gabor (in line holography). Πηγή, Φακός ευθυγράμμισης, Ολόγραμμα, Εικονικό και πραγματικό είδωλο, Θέσεις ειδώλων z_0 , Παρατηρητής https://laser.physics.sunysb.edu/_dbennett/optics2/optics2.html

Αυτό που στην ουσία θέλησε να προτείνει ο Gabor ήταν η εγγραφή του ολογράμματος να πραγματοποιείται με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων, ενώ η ανασκευή του ολογράμματος με λευκό φως. Η πρόταση αυτή βρήκε πολλά εμπόδια. Αφενός το μήκος κύματος του φωτός είναι σημαντικά μεγαλύτερο των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα η ανασκευή του ολογράμματος να χαρακτηρίζεται από σοβαρές μεγεθυντικές αλλοιώσεις και αφετέρου τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια που βρίσκονταν στη διάθεση του Gabor είχαν τόσο ασθενείς δυνατότητες συμφωνίας στην εκπομπή των δεσμών ηλεκτρονίων που η συζήτηση για εγγραφή ολογράμματος έμοιαζε φανταστική.

Οι εξελίξεις που ακολούθησαν και βελτίωσαν την εικόνα των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων άλλαξαν πορεία και κατέστησαν την ολογραφική αρχή του Gabor άχρηστη. Η μελέτη του Gabor έδωσε παρ' όλα αυτά ώθηση σε ένα άλλο πεδίο της επιστήμης και συγκεκριμένα στους Emmet Leith και Juris Upatnieks οι οποίοι εργάζονταν στο πανεπιστήμιο του Michigan πάνω σε προηγμένα συστήματα radar. Ερχόμενοι σε επαφή με την εργασία του Gabor αναγνώρισαν πως η ολογραφική αρχή σχετίζεται με τις καταγραφές radar, καθώς και τη δυνατότητα να ανασκευαστούν οπτικά οι εδαφικές καταγραφές των radar εφόσον ακολουθηθεί συγκεκριμένη διαδικασία εγγραφής.

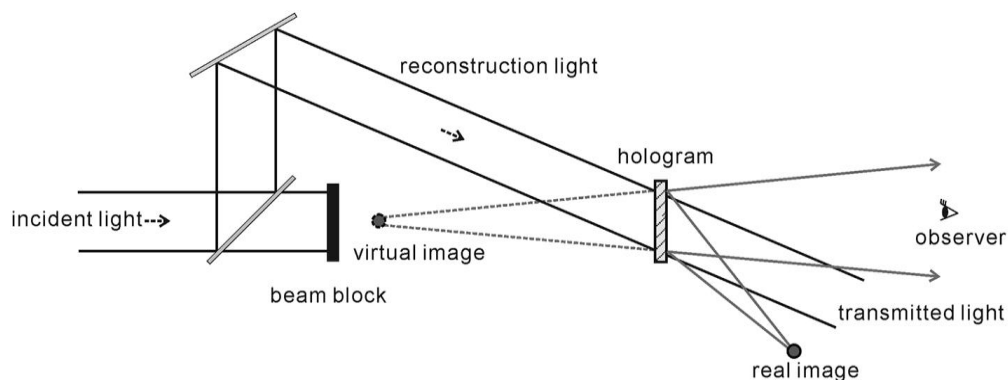
Δουλεύοντας στην οπτική ολογραφία οι Leith και Upatnieks έλυσαν το πρόβλημα της ευθυγράμμισης εικονικού και πραγματικού ειδώλου εισάγοντας την τεχνολογία της ολογραφίας εκτός άξονα (*off axis holography*) (Σχήμα 2.9).

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία



Σχήμα 2.10 Διάταξη εγγραφής των Leith & Upatnieks (off axis holography). Προσπίπτουσα ακτίνα, Διαχωριστής, Κάτοπτρο, Αντικείμενο, Δέσμη Αντικειμένου, Δέσμη Αναφοράς. Η δέσμη αντικειμένου και η δέσμη αναφοράς σχηματίζουν γωνία θ

Η διάταξη εκτός άξονα επιτρέπει στη δέσμη αναφοράς να παρακάμψει το ημιδιαφανές αντικείμενο αντί να το διαπεράσει και στη συνέχεια να συμβάλλει μαζί με τη δέσμη αντικειμένου στο επίπεδο εγγραφής. Χρησιμοποιώντας δέσμη ανασκευής ίδια με τη δέσμη αναφοράς, το ανεπιθύμητο πραγματικό είδωλο εκτρέπεται με γωνία ίση με το διπλάσιο της γωνίας ανάμεσα στο κύμα αντικειμένου κι αναφοράς 2θ (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.11 Διάταξη ανασκευής των Leith & Upatnieks (off axis holography). Προσπίπτουσα ακτίνα, Διαχωριστής, Φραγμός ακτίνας, Καθρέφτης, Δέσμη Ανασκευής, Εικονικό και Πραγματικό είδωλο, Παρατηρητής, Εκτροπή πραγματικού ειδώλου

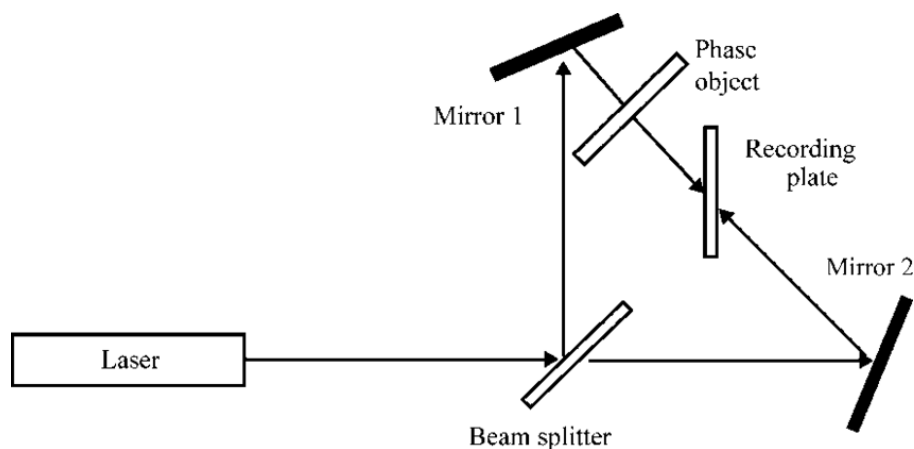
Λόγω των ασθενών επιδόσεων των πηγών φωτός όσον αφορά ζητήματα συμφωνίας τα πρώτα εγγεγραμμένα ολογράμματα, όπως αυτά του Gabor, καταγράφουν διαφανή και δισδιάστατα αντικείμενα. Το 1960 η ανακάλυψη του laser δίνει την αρχή και σταδιακά βελτιώνει τα χαρακτηριστικά συμφωνίας των πηγών σε πολύ μεγάλο βαθμό. Το 1962 οι Leith και Upatnieks εγγράφουν ολογράμματα στερεών κι αδιαφανών σωμάτων (Σχήμα 2.11).



2.12 Ανασκευή ολογράμματος εκτός άξονα από τους Leith και Upatnieks (1963)

<https://optics.engin.umich.edu/stories/emmett-leith-1927-2005-inventor-of-practical-holography>

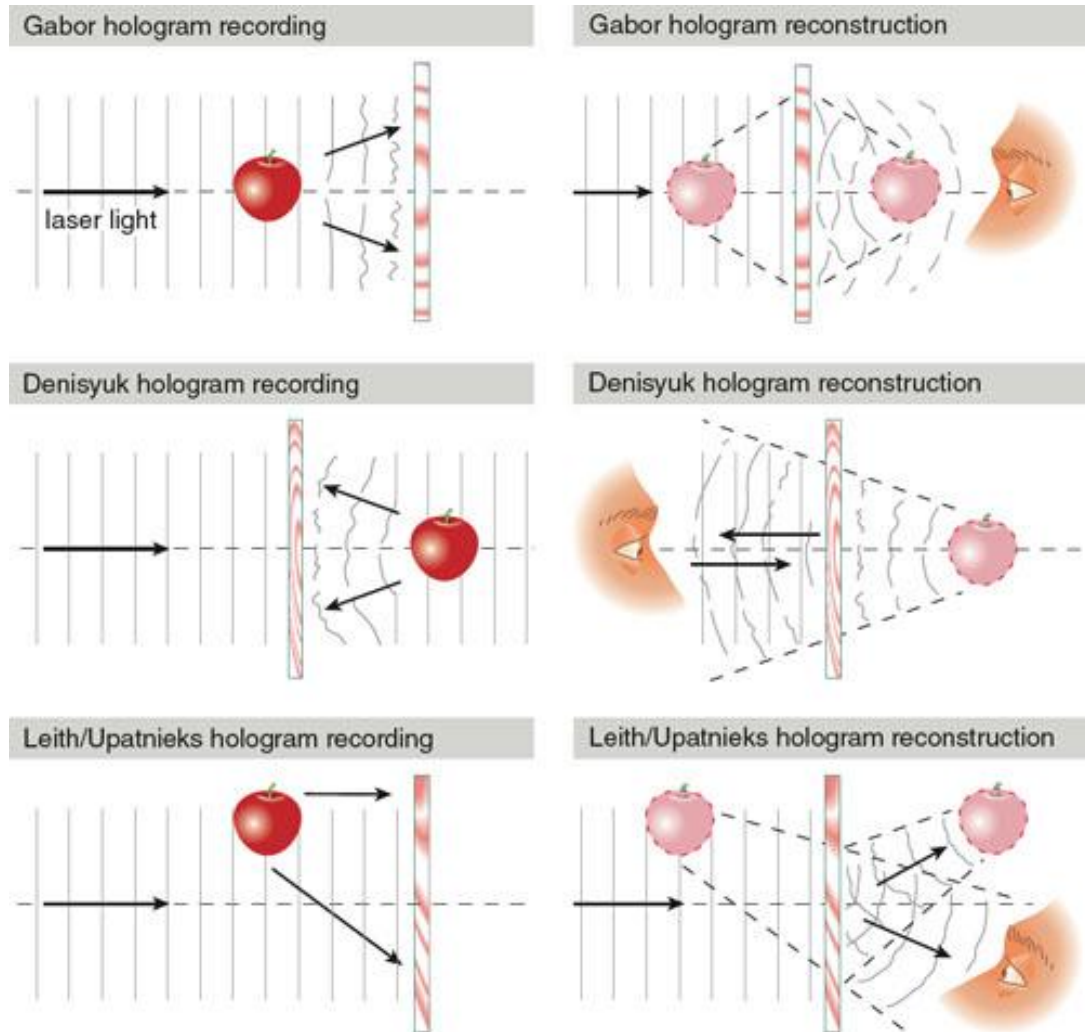
Παράλληλα κι ανεξάρτητα από τις εργασίες των Leith και Upatnieks, ο Ρώσος φυσικός Yuri Denisjuk ερευνά την ολογραφία με μια οπτική διάταξη αρκετά διαφορετική από αυτή του Gabor. Σε αυτή την περίπτωση η δέσμη αναφοράς και η δέσμη αντικειμένου συμβάλλουν και προσπίπτουν στο επίπεδο εγγραφής με αντίθετες διευθύνσεις. Προς επίτευξη αυτού, ο Denisjuk παρεμβάλλει το υλικό εγγραφής μεταξύ της πηγής και του αντικειμένου, έτσι ώστε το μέρος του φωτός που διαπερνά το φιλμ να προσπίπτει και να ανακλάται από το αντικείμενο σχηματίζοντας τη δέσμη αντικειμένου (Σχήμα 2.12). Με τον τρόπο αυτό οι κροσσοί συμβολής που εγγράφονται στο υλικό έχουν διεύθυνση παράλληλη σε αυτό κι όχι κάθετη όπως στις περιπτώσεις των Gabor και Leith & Upatnieks (Σχήμα 2.14).



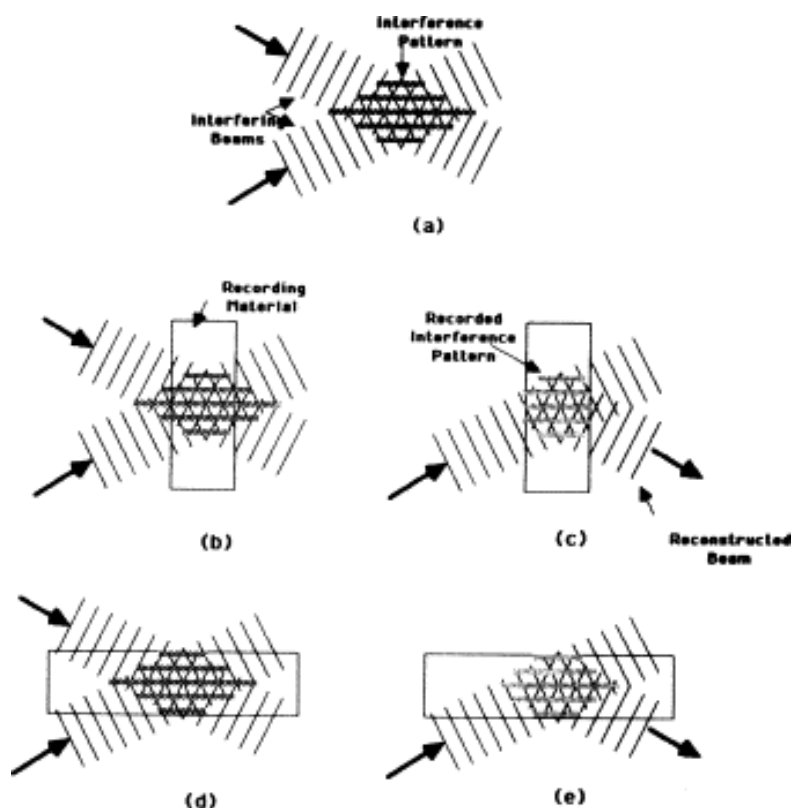
Σχήμα 2.13 Διάταξη εγγραφής ολογράμματος Denisjuk (reflection holography). Πηγή Laser, Διαχωριστής, Καθρέφτες, Δέσμη αντικειμένου κι αναφοράς συμβάλλουν από αντίθετες διευθύνσεις https://www.researchgate.net/publication/6726807_Achromatic_optical_elements

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Το 1959 ο Ρώσος φυσικός κατασκευάζει το πρώτο ολόγραμμα που ανασκευάζεται με λευκό φως από σημειακή πηγή. Η γεωμετρία της διάταξης δίνει τη δυνατότητα στον παρατηρητή να μελετά την προβολή του ολογράμματος καθώς αυτό φωτίζεται μετωπικά, σε αντίθεση με την ανασκευή των Leith & Upatnieks που απαιτεί μονοχρωματική δέσμη ανασκευής που προσπίπτει πίσω από το ολόγραμμα (Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.14 Εγγραφή, Ανασκευή και Παρατήρηση ολογραμμάτων Gabor (in line), Denisyuk (reflection), Leith/Upatnieks (off axis)



Σχήμα 2.15 (a) Προφίλ Συμβολής. (b) Εγγραφή ολογράμματος μετάδοσης - Κάθετη διεύθυνση κροσσών (c) Ανασκευή ολογράμματος μετάδοσης. (d) Εγγραφή ολογράμματος ανάκλασης - Παράλληλη διεύθυνση κροσσών (e) Ανασκευή ολογράμματος ανάκλασης

Clark C. Guest, *Holography, Encyclopedia of Physical Science and Technology*

Η μετέπειτα ανάπτυξη της ολογραφίας έχει να κάνει με επιμέρους βελτιώσεις όσον αφορά τα οπτικά εξαρτήματα των διατάξεων, τα υλικά εγγραφής και τις διαδικασίες ανάπτυξής τους. Αναφέρθηκε προηγουμένως πως τη μεγαλύτερη ώθηση στην ολογραφία προσέφερε η ανακάλυψη της τεχνολογίας LASER το 1960 από τον Theodore Maiman, εφόσον έδωσε τη δυνατότητα χρήσης μονοχρωματικών φωτεινών πηγών με μήκη συμφωνίας της τάξης των εκατοστών ή και μέτρων ακόμα, έναντι των μέχρι τότε υποδιαιρέσεων του χιλιοστόμετρου. Ωστόσο υπήρξαν τρία κύρια σημεία που άνοιξαν την πόρτα σε νέες εφαρμογές της ολογραφίας.

Το πρώτο είναι η διαπίστωση πως αν ένα αντικείμενο δεχτεί οποιοδήποτε είδος τάσης ανάμεσα σε δύο ολογραφικές εκθέσεις εγγραφής στο ίδιο υλικό, τότε η παραμόρφωση θα εντυπωθεί στην ολογραφική εικόνα από δευτερεύοντες (κυματοειδείς) κροσσούς συμβολής. Το φαινόμενο πρωτοδημοσιεύτηκε το 1965 από τους Robert Powell και Karl Stetson και η σημασία του για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο, τις επιστήμες μέτρησης, ανάλυσης τάσεων - παραμορφώσεων και ταλαντώσεων είναι ανυπολόγιστη.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Το δεύτερο σημείο αφορά περισσότερο στον τομέα της δημιουργικής ή καλλιτεχνικής ολογραφίας. Όσο η ολογραφία περιοριζόταν στην παραγωγή εικονικών ειδώλων, δηλαδή ειδώλων που βρίσκονταν πίσω από το ολόγραμμα, ήταν επόμενο να θεωρηθεί πως το μόνο που έχει να προσφέρει είναι η εικονική εμπειρία του αντικειμένου πίσω από ένα παράθυρο. Στα μέσα της δεκαετίας του 60' άρχισε να εκτιμάται πως χρησιμοποιώντας κατάλληλη διάταξη ανασκευής το εικονικό είδωλο μπορεί να εξαλειφθεί και αντί αυτού να ανασκευαστεί το πραγματικό είδωλο. Αυτό το είδωλο μπορούσε να λειτουργήσει σαν δέσμη αντικειμένου για την ολογραφία ενός δεύτερου ολογράμματος ή αλλιώς ενός ολογράμματος μεταφοράς. Το 1968 ο Αμερικάνος φυσικός Stephen Benton, αναπτύσσοντας ήδη υπάρχουσες θεωρίες και στηριγμένος στα ολογράμματα μεταφοράς, δημιούργησε το πρώτο ολόγραμμα μετάδοσης (transmission hologram) που ανασκευάζεται με λευκό φως. Τα ολογράμματα αυτά ονομάστηκαν rainbow holograms. Η αρχή του ειδώλου μεταφοράς (transfer image) σύντομα αναπτύχθηκε για τα ολογράμματα ανάκλασης και με αυτόν τον τρόπο ολογράμματα ανάκλασης και μετάδοσης μπορούν να κατασκευαστούν μέσω μιας ενδιάμεσης διαδικασίας μεταφοράς.

Το τρίτο σημείο έχει να κάνει με τον εμπορικό τομέα. Το 1974 ο Michael Foster ανέπτυξε μια μέθοδο μηχανικής αντιγραφής ολογραμμάτων μέσω διαδικασίας δημιουργίας ανάγλυφης επιφάνειας (embossing process) παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή δίσκων CD. Η τελευταία διαδικασία κατέστησε εφικτή μια φθηνή μαζική παραγωγή rainbow holograms που αφού μετατραπούν σε ολογράμματα ανάκλασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν συσκευή ασφάλειας σε τραπεζικές κάρτες, ταυτότητες και τραπεζικά βιβλιάρια, εφόσον η δημιουργία αντίγραφου είναι πολύ δύσκολη.

Τις επόμενες τέσσερις δεκαετίες η ολογραφία αναπτύχθηκε σε πολλούς κλάδους, επιστημονικούς και καλλιτεχνικούς. Η κυριότερη πρόοδος έχει να κάνει με αυτό που ονομάζεται ψηφιακή ολογραφία. Πλέον είναι δυνατή η δημιουργία ολογραμμάτων από προφίλ συμβολής που σχεδιάζονται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές έτσι ώστε η ανασκευή του ολογράμματος να προβάλλει ελεγχόμενα μέτωπα κύματος. Αντίστοιχα δυνατή είναι η εγγραφή ολογραμμάτων σε διατάξεις φωτοευαίσθητων αισθητήρων, η ψηφιακή τους επεξεργασία και η αριθμητική τους ανασκευή μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών.

2.4. Βασικές κατηγορίες ολογραμμάτων

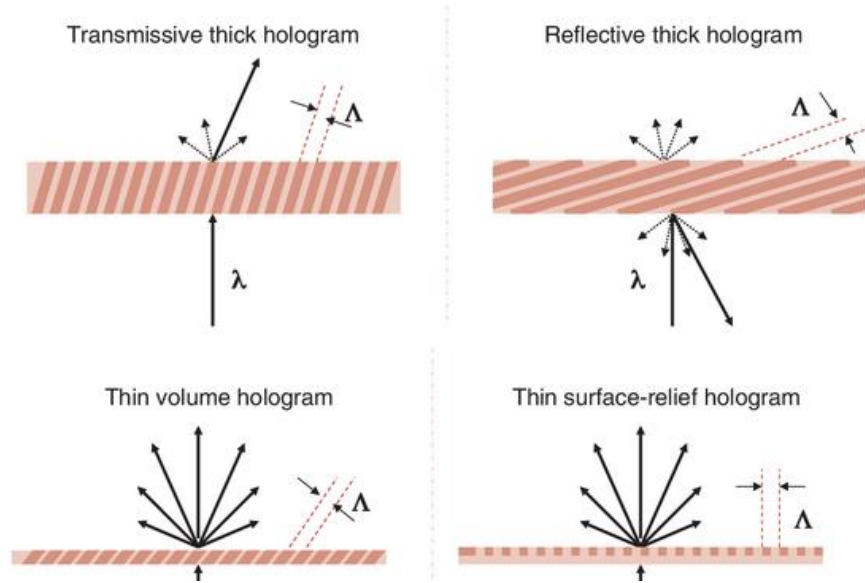
Υπάρχει πληθώρα τύπων ολογραμμάτων καθένας των οποίων φέρει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οι ιδιότητες κάθε τύπου εξαρτώνται από τις πολλές παραμέτρους της μεθόδου, όπως το υλικό καταγραφής, τα χαρακτηριστικά των δεσμών που χρησιμοποιούνται ή ακόμα και την ίδια τη διάταξη. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η διαδικασία της ολογραφίας, καθώς και το ίδιο το ολόγραμμα χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευαισθησία. Ακόμα κι αν δύο ολογράμματα κατασκευαστούν με όλες τις παραμέτρους ταυτόσημες εκτός από μία, τότε το αποτέλεσμα της ολογραφικής εικόνας εμφανίζει διαφορετικές ιδιότητες. Στην παράγραφο αυτή καταγράφονται οι βασικοί τύποι ολογραμμάτων που προκύπτουν αναλόγως την εξεταζόμενη παράμετρο, οι βασικές τους ιδιότητες, οι σχέσεις μεταξύ τους και οι ιδιότητες που επηρεάζει καθεμία από τις παραμέτρους.

2.4.1. Βάθος εγγραφής και Ανασκευή

Αναλόγως το βάθος στο οποίο φτάνει η αποτύπωση των κροσσών συμβολής τα ολογράμματα χωρίζονται σε λεπτά ολογράμματα/ολογράμματα επιφάνειας (thin or surface holograms) και τα παχιά ολογράμματα/ολογράμματα όγκου (thick or volume holograms). Η χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ τους βρίσκεται σε ότι έχει να κάνει με το πραγματικό είδωλο. Τα ολογράμματα όγκου μας επιτρέπουν την ανασκευή ενός μοναδικού ειδώλου, σε αντίθεση με τα ολογράμματα επιφάνειας που η ανασκευή τους συνδέεται με την προβολή δύο συζυγών ειδώλων, εικονικού και πραγματικού.

Το βάθος εγγραφής μαζί με την διεύθυνση εγγραφής των κροσσών συμβολής οδηγούν στην κατασκευή ολογραμμάτων μετάδοσης ή ανάκλασης. Αν οι κροσσοί συμβολής είναι παράλληλοι στο επίπεδο εγγραφής, τότε το ολόγραμμα λειτουργεί ανακλαστικά, ενώ αντίθετα αν είναι κάθετοι, το ολόγραμμα λειτουργεί μεταδοτικά. Τα ολογράμματα ανάκλασης χαρακτηρίζονται από λιγότερες απώλειες όσον αφορά την προσπίπτουσα ένταση ακτινοβολίας.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία



Σχήμα 2.16 Βάθος εγγραφής και κατεύθυνση κροσσών συμβολής. Πάνω: Ολογράμματα όγκου: Μετάδοσης και Ανάκλασης, Κάτω: Ολογράμματα μετάδοσης επιφάνειας με διαφορετικές διευθύνσεις εγγραφής. Η παράμετρος Λ χαρακτηρίζει την πυκνότητα των κροσσών.

2.4.2. Διαμορφωμένη παράμετρος (Modulated parameter)

Η λειτουργία ενός ολογράμματος αφού κατασκευαστεί, είναι να διαμορφώνει το προσπίπτον κύμα ανασκευής. Η διαμόρφωση αυτή μπορεί να αφορά το πλάτος (amplitude modulation), τη φάση (phase modulation) ή αμφότερες τις δύο παραμέτρους.

Η ένταση ακτινοβολίας στο επίπεδο εγγραφής εκφράζεται ως:

$$I = O^2(x, y) + R^2(x, y) + 2O(x, y)R(x, y) \cos[2\pi(\xi_o - \xi_r)x + \varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)] \quad [2.8]$$

Όπου $\xi_o = \sin \theta_o / \lambda$ και $\xi_r = \sin \theta_r / \lambda$ και θ_o η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης αντικειμένου και θ_r της δέσμης αναφοράς αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Ένα ολόγραμμα πλάτους (amplitude - modulation hologram) λειτουργεί όταν το πλάτος του κύματος ανασκευής διαμορφώνεται έτσι ώστε αφού διαπεράσει το ολόγραμμα να είναι ανάλογο του πλάτους της εξίσωσης [2.8]. Η διαμόρφωση του πλάτους επιτυγχάνεται είτε από απορρόφηση μέρους της δέσμης ανασκευής, είτε από τοπικές μεταβολές της ανακλαστικότητας του ολογράμματος.

Ένα ολόγραμμα φάσης (phase - modulation hologram) προκύπτει όταν η παράμετρος του κύματος ανασκευής που διαμορφώνεται είναι η φάση. Σε αυτήν τη περίπτωση μετά την πρόσπτωση σχηματίζεται κύμα που έχει μεταβολές φάσης (relative phase shifts) ανάλογες της εξίσωσης [2.8]. Τα ολογράμματα φάσης κατασκευάζονται είτε μεταβάλλοντας τον δείκτη διάθλασης, το πάχος ή την επιφάνεια του ολογράμματος.

Τα περισσότερα από τα υλικά εγγραφής, όπως τα φωτογραφικό διάλυμα (photographic emulsion), κατασκευάζουν ολογράμματα που διαμορφώνουν και τις δύο παραμέτρους. Αυτό σημαίνει πως το σχηματιζόμενο κύμα έχει πλάτος ανάλογο του $2O(x,y)R(x,y)$ και φάση ανάλογη της $[2\pi(\xi_o - \xi_r)x + \varphi_o(x,y) - \varphi_r(x,y)]$ και περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες φάσης και πλάτους του κύματος αντικειμένου. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν τα ολογράμματα επιφάνειας.

Τα ολογράμματα όγκου δίνουν τη δυνατότητα ρύθμισης των διαμορφώσεων που θα σχηματιστούν στην δέσμη ανασκευής. Τα μέγιστα που σχηματίζει η προσπίπτουσα ένταση ακτινοβολίας δημιουργούν ανακλαστικές επιφάνειες στο φωτοευαίσθητο υλικό. Η πυκνότητα των επιφανειών αυτών επάνω στο υλικό εγγραφής καθορίζεται από το πλάτος του κύματος αντικειμένου και επηρεάζει την ανακλαστικότητα του ίδιου του ολογράμματος. Το ανάγλυφο της επιφάνειας του ολογράμματος αντίθετα καθορίζεται από τη διαφορά φάσης των συμβαλλόμενων δεσμών και επηρεάζει τη διακύμανση της φάσης του κύματος που ανακλάται.

2.4.3. Διάταξη

Με τον όρο διάταξη αποτυπώνονται οι παράμετροι της θέσης του αντικειμένου κατά την εγγραφή, η χρήση οπτικών φακών για το σχηματισμό της εικόνας, η διάταξη για την δέσμη αναφοράς και η μορφή και τα μέσα της έκθεσης του ολογραφικού μέσου.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.2.4 το κριτήριο που διαχωρίζει την περίθλαση Fresnel από την Fraunhofer εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου και από την απόστασή του από το επίπεδο εγγραφής ή από την πηγή. Έτσι ορίζονται ολογράμματα Fresnel και Fraunhofer εκείνα που σχετίζονται με τις αντίστοιχες περιπτώσεις περίθλασης της δέσμης αντικειμένου.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Αν το αντικείμενο ή το είδωλό του, εφάπτεται στο επίπεδο εγγραφής ή το είδωλο ενός αντικειμένου, τότε σχηματίζεται ένα ολόγραμμα ειδώλου – επιπέδου (image-plane hologram). Ο συγκεκριμένος ολογραφικός τύπος έχει την εξής ιδιότητα: επειδή η προβαλλόμενη εικόνα βρίσκεται πολύ κοντά στο ίδιο το ολόγραμμα, οι δέσμες ανασκευής διαφορετικού μήκους κύματος δεν προλαβαίνουν να διαχωριστούν πριν διαμορφώσουν το είδωλο που καταγράφηκε. Αυτό σημαίνει πως μια πηγή εκτενούς εύρους μήκους κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανασκευάσει το ολόγραμμα.

Στην περίπτωση που κατά την εγγραφή χρησιμοποιείται οπτικός φακός για τη δισδιάστατη χωρική μετατροπή Fourier (Two dimensional spatial Fourier transform) του κύματος αντικειμένου επάνω στο επίπεδο εγγραφής, τότε το ολόγραμμα ονομάζεται ολόγραμμα μετατροπής Fourier (Fourier transform hologram).

Η δέσμη αναφοράς επηρεάζει τη θέση, το μέγεθος του προβαλλόμενου ειδώλου, το πεδίο της εικόνας που είναι ορατό και την ανάλυση της εικόνας. Όταν η πηγή της δέσμης αναφοράς μπορεί να θεωρηθεί σημειακή και βρίσκεται σε τέτοια απόσταση από το επίπεδο εγγραφής, όση και το αντικείμενο, τότε κατασκευάζεται ολόγραμμα που έχει κοινές ιδιότητες με ένα ολόγραμμα μετατροπής Fourier. Συχνά τα παραπάνω ολογράμματα συναντώνται με το όνομα ολόγραμμα μετατροπής Fourier χωρίς χρήση φακού (Lensless Fourier transform hologram).

Η περιορισμένη ανάλυση που προσφέρει ένα υλικό εγγραφής υποβαθμίζει την ανάλυση της εικόνας του ολογράμματος και το οπτικό πεδίο που προσφέρει. Ο περιορισμός αυτός εξαρτάται από τη θέση της δέσμης αντικειμένου αφού αν το σημείο της πηγής της βρίσκεται κοντά στο αντικείμενο, τότε πετυχαίνεται μέγιστη ανάλυση της εικόνας σε βάρος του οπτικού πεδίου. Στην περίπτωση που το σημείο της πηγής αναφοράς θεωρηθεί σε άπειρη απόσταση (επίπεδο μέτωπο κύματος), τότε βελτιστοποιείται το οπτικό πεδίο σε βάρος της ανάλυσης της εικόνας. Όλες οι ενδιάμεσες τοποθεσίες προσφέρουν διαφορετικές αναλογίες στα χαρακτηριστικά της προβαλλόμενης εικόνας.

Στην περίπτωση που η πηγή της δέσμης αναφοράς δεν μπορεί να θεωρηθεί σημειακή, τότε η ανάλυση της εικόνας του ανασκευασμένου ολογράμματος φθίνει σε αναλογικά με το μέγεθος της πηγής.

2.4.4. Τμηματικές και πολλαπλές εγγραφές

Ένας τρόπος καταγραφής ολογραμμάτων περιέχει πολλαπλές εκθέσεις του ίδιου υλικού εγγραφής. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζεται ένα πολλαπλό ολόγραμμα. Σε άλλες εφαρμογές είναι επιθυμητή η τμηματική έκθεση του μέσου καταγραφής σε ίσα τμήματα οριζόντιου ή κάθετου προσανατολισμού. Στην περίπτωση οριζόντιου προσανατολισμού κατασκευάζονται τα rainbow holograms. Κάθε λωρίδα του υλικού εγγραφής εκτίθεται στη συμβολή δεσμών. Το αποτέλεσμα μπορεί είναι ένα ολόγραμμα που προβάλλει τρισδιάστατες πληροφορίες του υλικού μονάχα στην κατεύθυνση του πλάτους των λωρίδων. Η ανασκευή των ολογραμμάτων αυτών μπορεί να γίνει με πολυχρωματικό φως και το εύρος των χρωμάτων εμφανίζεται σε κάθε ζώνη έκθεσης του ολογράμματος.

2.4.5. Χαρακτηριστικά Πηγής

Η συμφωνία των πηγών ακτινοβολίας για την ολογραφία είναι μια αναγκαία συνθήκη. Υπάρχουν όμως ολογράμματα που εγγράφονται με σύμφωνο φως και μπορούν να ανασκευαστούν με λευκό ή πολυχρωματικό, δηλαδή ασύμφωνο (incoherent) φως. Τα ολογράμματα αυτά ονομάζονται ολογράμματα λευκού φωτός (white light holograms). Η ανασκευή αυτή συμβαίνει διότι ένα ολόγραμμα όγκου μπορεί να λειτουργήσει σαν ένας συνδυασμός φίλτρου συμβολής και ολογράμματος, έτσι ώστε να ανακλά μονάχα το μήκος κύματος του λευκού φωτός με το οποίο καταγράφηκε. Αντίστοιχα ένα ολόγραμμα επιφάνειας μπορεί να λειτουργήσει σαν φίλτρο με την ανάλογη τοποθέτηση. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να κατασκευαστεί ένα επιφανειακό ολόγραμμα λευκού φωτός (surface white light hologram).

Στην περίπτωση που για την εγγραφή ενός ολογράμματος χρησιμοποιούνται πολλαπλά μήκη κύματος, είναι δυνατόν να σχηματιστεί ένα έγχρωμο ολόγραμμα (color hologram). Φυσικά οι κροσσοί συμβολής δεν είναι έγχρωμοι, όμως σε περίπτωση που το ολόγραμμα φωτιστεί με πολυχρωματική δέσμη ανασκευής, τότε προκύπτει μια έγχρωμη εικόνα. Φυσικά γίνεται λόγος και για μήκη κύματος σε σημεία πέραν του ορατού φάσματος, όπως η μικροκυματική ολογραφία, η ακουστική ολογραφία και η ολογραφία ακτίνων X.

Στον Πίνακα Α του παραρτήματος καταγράφονται οι κατηγορίες των ολογραμμάτων καθώς και τα χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Ο χαρακτηρισμός ενός ολογράμματος βοηθά όταν πρόκειται για μια περίπτωση που αποκλίνει από το συνηθισμένο. Η κοινή αναφορά στην εγγραφή ενός ολογράμματος σημαίνει την εγγραφή ενός επιφανειακού Fresnel ολογράμματος, με μονοχρωματικές και σύμφωνες πηγές φωτός laser. Η διάταξη που υποδηλώνεται είναι εκτός άξονα με τη δέσμη αναφοράς σε απόσταση τουλάχιστον ίση με αυτή μεταξύ αντικειμένου και επιπέδου εγγραφής και μέσον εγγραφής το διάλυμα αλογονιδίων του αργύρου (silver halide emulsion). Ορίζεται λοιπόν το βασικό ολόγραμμα ως αποτέλεσμα της παραπάνω εγγραφής.

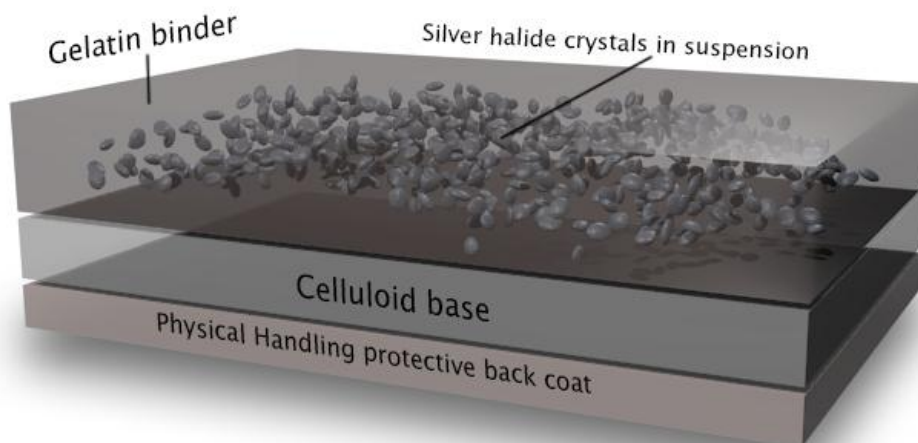
2.5. Το μέσον εγγραφής

Το μέσον εγγραφής επιδρά δραστικά στην διαδικασία της ολογραφίας. Είναι μια παράμετρος που τα χαρακτηριστικά της καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της ανασκευασμένης εικόνας, καθώς ακόμα και τις διαδικασίες εγγραφής και ανασκευής του ολογράμματος. Οι δύο περιπτώσεις υλικών καταγραφής είναι αφενός ένα υλικό που αντιδρά χημικά στη φωτεινή ακτινοβολία κι αφετέρου η επιφάνεια ενός φωτοευαίσθητου αισθητήρα. Στην πρώτη κατηγορία γίνεται λόγος για αναλογική ολογραφία, ενώ στη δεύτερη για ψηφιακή ολογραφία η οποία θα μελετηθεί στα επόμενα κεφάλαια. Σε αυτήν την παράγραφο θα περιγραφούν τα κυριότερα αναλογικά μέσα καταγραφής ολογραμμάτων όπως: Τα διαλύματα αλογονιδίων του αργύρου (silver halide emulsions), τις διχρωμικές ζελατίνες (dichromated gelatins DCG), τα φωτοπολυμερή υλικά (photopolymers) και τα φωτοαντιστατικά υλικά (photoresists).

2.5.1. Διαλύματα αλογονιδίων του αργύρου (silver halide emulsions)

Ο χλωριούχος, βρωμιούχος και ιωδιούχος άργυρος συμπεριλαμβάνονται στα αλογονίδια του αργύρου και χρησιμοποιούνται σε ποικίλες ποσότητες ως φωτογραφικά διαλύματα στερεής κατάστασης. Τα διαλύματα αλογονιδίων του αργύρου σχηματίζονται με τη διασπορά μικροσκοπικών κρυστάλλων σε ζελατίνη. Αρχικά το διάλυμα επικαλύπτει σε υγρή μορφή την επιφάνεια γυαλιού ή φιλμ. Αφού στεγνώσει το αποτέλεσμα είναι μια λεπτή, συνεκτική, εύκαμπτη και φωτοευαίσθητη επιφάνεια που ενεργοποιείται από μήκη κύματος μικρότερα των 500 nm (Σχήμα 2.16).

The Basic Structure Of Film



Σχήμα 2.17 Βασική δομή διαλύματος αλογονιδίων αργύρου σε φιλμ: Ζελατίνη, κρύσταλλοι αλογονιδίων, βάση σελλιόνιτ, προστατευτική επίστρωση.

<https://neiloseman.com/how-film-works/>

Με την προσθήκη κατάλληλων χρωστικών η ευαισθησία μπορεί να διευρυνθεί έως την πράσινη περιοχή του ορατού φάσματος (ορθοχρωματικό διάλυμα), να καλύψει όλο το φάσμα του ορατού φωτός (παγχρωματικό διάλυμα) ή ακόμα και την υπέρυθη περιοχή. Η πρόσθεση των χρωστικών βελτιώνει εν γένει την ευαισθησία σχεδόν διπλασιάζοντάς τη. Όταν το διάλυμα εκτεθεί στη φωτεινή δέσμη, η ενέργεια της ακτινοβολίας δεσμεύεται από τις χρωστικές που απορροφούν συγκεκριμένα εύρη μήκους κύματος και προωθούν την δεσμευμένη ακτινοβολία προς τους κρυστάλλους των αλογονιδίων. Τα άτομα αργύρου απελευθερώνονται από τους κρυστάλλους των αλογονιδίων και μετατοπίζονται σε οποιαδήποτε αταξία του κρυσταλλικού πλέγματος. Σε περίπτωση που μια κρίσιμη ενεργειακή ποσότητα απορροφηθεί από το διάλυμα, τα μετατοπισμένα άτομα δημιουργούν ένα σταθερό στίγμα (speck) αργύρου ή αλλιώς μια λανθάνουσα εικόνα (latent image).

Για τα διαλύματα που χρησιμοποιούνται στην ολογραφία η λανθάνουσα εικόνα αρχίζει να εκφυλίζεται εντός μερικών ημερών. Οι χρωστικές που αυξάνουν την ευαισθησία του διαλύματος συγχρόνως αποσταθεροποιούν τη δομή του υλικού και μειώνουν τον χρόνο ζωής του ύστερα από την έκθεση. Για το λόγο αυτό κατά τη διάρκεια της παραγωγής διαλυμάτων χρησιμοποιούνται σταθεροποιητικοί και σκληρυντικοί παράγοντες έτσι ώστε να βελτιώσουν το προσδόκιμο ζωής και την πρόσφυση των υλικών στο γυάλινο ή πλαστικό υπόστρωμα.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Η λανθάνουσα εικόνα καθίσταται ορατή ύστερα από μια διεργασία που ονομάζεται ανάπτυξη (development). Κατά την ανάπτυξη οι κρύσταλλοι αλογονιδίων που φέρουν τη λανθάνουσα εικόνα μετατρέπονται σε κόκκους μαύρου μεταλλικού αργύρου, σχηματίζοντας αυτό που στις φωτογραφικές τεχνικές ονομάζεται αρνητικό. Ακολουθεί η διαδικασία της σταθεροποίησης (fixation) που καθιστά τους ανέκθετους κρυστάλλους διαλυτούς στο νερό, έτσι ώστε με ένα τελικό πλύσιμο να απομακρυνθούν αφήνοντας μια σταθερή καταγεγραμμένη εικόνα.

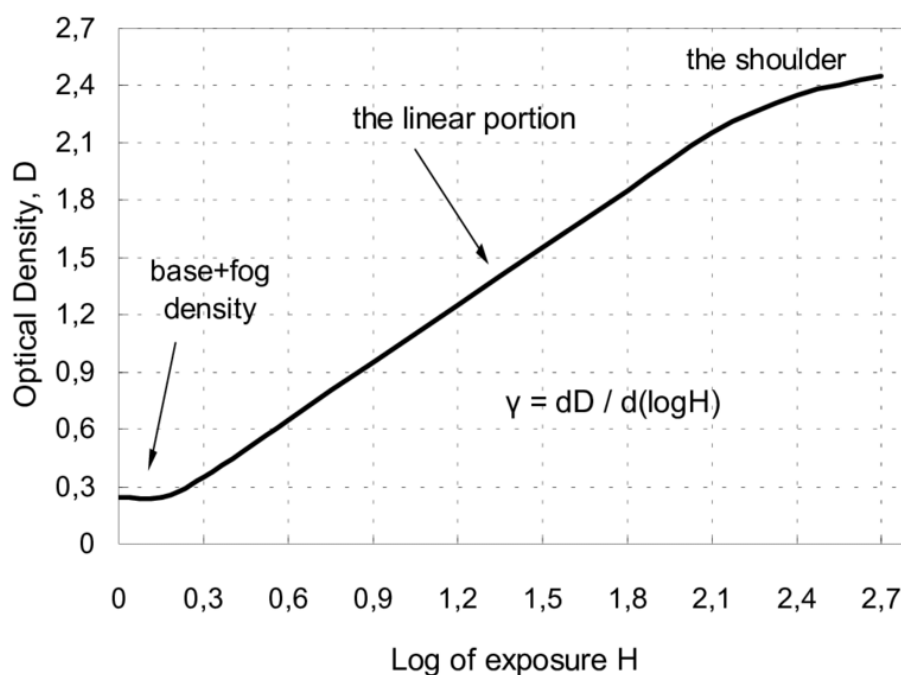
Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η ορολογία στις διεργασίες των διαλυμάτων αλογονιδίων αργύρου αντιστοιχίζει του κρυστάλλους με τα μη ανεπτυγμένα αλογονίδια κανονικού σχήματος και τους ανεπτυγμένους κόκκους (grains) με τον συμπακνωμένο άργυρο ακανόνιστου σχήματος μεγαλύτερου μεγέθους.

Ένα ολόγραμμα μετάδοσης αντιστοιχεί σε καταγραφή κροσσών συμβολής με απόσταση περίπου $1\mu\text{m}$ (1000 nm) μεταξύ τους. Συνεπώς η διάμετρος των κρυστάλλων του διαλύματος δεν πρέπει να ξεπερνά τα 60 nm , έτσι ώστε να αναπτυχθεί σε μια τελική μέση διάμετρο κόκκου μικρότερη ή ίση των 200 nm . Για ένα ολόγραμμα ανάκλασης με απόσταση κροσσών τάξης μεγέθους περίπου 300 nm , η κρυσταλλική διάμετρος έχει άνω όριο τα 25 nm . Η ταχύτητα ενός διαλύματος αλογονιδίων είναι ανάλογη του κρυσταλλικού μεγέθους. Τα ολογραφικά διαλύματα έχουν μικρότερο μέγεθος κρυστάλλου, άρα είναι βραδύτερα, από τα ερασιτεχνικά φωτογραφικά διαλύματα. Τα μη αργυρούχα ολογραφικά υλικά εμφανίζουν στο μεγαλύτερο μέρος τους μικρότερη ευαισθησία στο φως από τα διαλύματα αλογονιδίων αργύρου. Η ευαισθησία των μέσων ολογραφίας μετριέται με όρους ενέργειας προς μονάδα επιφάνειας που απαιτείται για τον επαρκή σχηματισμό κροσσών. Η μονάδα μέτρησης είναι mJ/cm^2 ή $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

Τα διαλύματα αλογονιδίων αργύρου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος κρυστάλλου (μέγεθος κόκκου). Τα διαλύματα ψιλού κόκκου (fine grain emulsions) μεγέθους $20 - 50\text{ nm}$ και τα διαλύματα πολύ ψιλού κόκκου (ultrafine grain emulsions) μεγέθους $8 - 15\text{ nm}$. Τα τελευταία έχουν χαμηλή σκληρότητα και κινδυνεύουν να διαλυθούν κατά τις χημικές διεργασίες που υπόκεινται. Οι σκληρυντικοί παράγοντες που μπορούν να προστεθούν έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση μεγέθους των κρυστάλλων και για το λόγο αυτό αποφεύγονται από τους κατασκευαστές.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Τα ολογραφικά διαλύματα διαθέτουν διαφορετικά μεγέθη κρυστάλλων αναλόγως τα χαρακτηριστικά τους. Το καθένα συμπεριφέρεται διαφορετικά στην έκθεση μιας συνεχούς δέσμης (Continuous Wave - CW laser) ή μιας παλμικής δέσμης (pulse laser). Η απόκριση ενός διαλύματος στην ακτινοβολία του φωτός ποσοτικοποιείται από την χαρακτηριστική καμπύλη που ονομάζεται καμπύλη H & D από τους Ferdinand Hunter και Vero Driffield. Το διάγραμμα αντιπαραβάλλει την οπτική πυκνότητα του διαλύματος έναντι του λογάριθμου της έκθεσης (Διάγραμμα 2.1). Η οπτική πυκνότητα ισοδυναμεί με τον λογάριθμο του αντιστρόφου της διαπερατότητας, ενώ η έκθεση με τον φωτισμό (illuminance) επί τη διάρκεια σε *lux sec*.



Διάγραμμα 2.1 Τυπική Καμπύλη H & D για φωτογραφικό φιλμ. Τρεις περιοχές: (α) Περιοχή βάσης και θόλωσης (το υλικό είναι σχεδόν ανέκθετο), (β) Γραμμική περιοχή, (γ) Περιοχή ώμου (η οπτική πυκνότητα τείνει να σταθεροποιηθεί). Κλίση καμπύλη γ

https://www.researchgate.net/figure/The-characteristic-curve-of-a-photographic-film_fig2_264811359

Η περιοχή της καμπύλης που εμφανίζει γραμμική σχέση μεταξύ των μεγεθών περιγράφει το χρήσιμο μέρος της έκθεσης για ένα υλικό. Για την φωτογραφία οι καμπύλες H & D αποτελούν ένα καίριο εργαλείο, δυστυχώς για την ολογραφία η χρήση τους είναι περιορισμένη. Για ένα ολογραφικό διάλυμα, το γραμμικό μέρος της καμπύλης είναι εκτενέστερο και το μέγεθος της κλίσης γ μπορεί να φτάσει την τιμή 5. Ο περιορισμός της χρήσης των καμπυλών για τα ολογραφικά διαλύματα αλογονιδίων αργύρου έγκειται στην απαίτηση λεπτομερέστερων περιοχών που η προσέγγιση αυτή δεν προσφέρει.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Ωστόσο οι καμπύλες H & D δεν μπορούν να κριθούν ατελέσφορες για την ολογραφία διότι παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού της απαιτούμενης έκθεσης (exposure) για να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος βαθμός απόδοσης περίθλασης (diffraction efficiency) στο ολόγραμμα (Διάγραμμα 2.2).

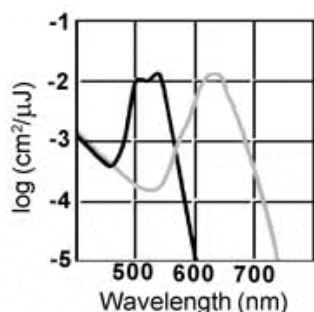


Figure 1: Spectral Sensitivity curves for VRP-M (left) and PFG-01 (right).

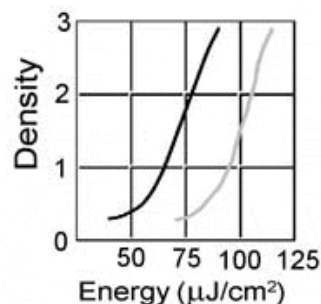


Figure 2: Characteristic Curves for VRP-M (left) and PFG-01 (right).

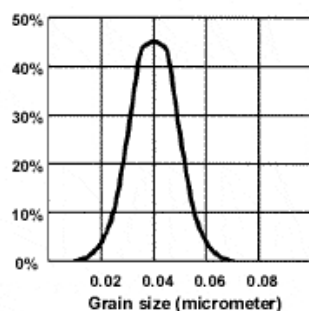


Figure 3: Grain Size Distribution Curve for VRP-M and PFG-01.

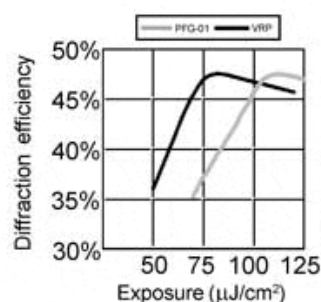


Figure 4: Diffraction Efficiency Curves for VRP-M and PFG-01.

Διάγραμμα 2.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες για ολογραφικά διαλύματα VRP-M (μαύρη γραμμή) και PFG-01 (γκρι γραμμή) της εταιρίας Slavich: (1) Φασματική ευαισθησία έναντι μήκους κύματος. (2) H & D καμπύλη. (3) Κατανομή μεγέθους κόκκου. (4) Απόδοση περίθλασης έναντι έκθεσης

https://www.slavich.com/holo_fg-red-green

Με τον όρο *απόδοση περίθλασης* εννοείται ο λόγος έντασης ακτινοβολίας της περιθλασμένης από το ολόγραμμα δέσμης προς την ένταση της προσπίπτουσας στο ολόγραμμα κατά την διαδικασία ανασκευής. Είναι ένα μέτρο της φωτεινότητας της προβαλλόμενης εικόνας και μια παράμετρος αξιολόγησης του σχηματισμένου ολογράμματος.

2.5.2. Διεργασία διαλυμάτων αλογονιδίων αργύρου (silver halide emulsion processing)

Είναι σαφές πως για τη μελέτη ενός ολογράμματος τα δύο βασικά στάδια είναι η εγγραφή και η ανασκευή. Ωστόσο αναφέρθηκε πως ενδιάμεσο στάδιο αποτελεί μια χημική διαδικασία που αφορά εξ ολοκλήρου το μέσον εγγραφής το οποίο έχει εκτεθεί στη συμβολή των δεσμών αντικειμένου και αναφοράς και φέρει την αρχική καταγραφή των κροσσών συμβολής.

Όταν το διάλυμα αλογονιδίων αργύρου φωτίζεται, η ενέργεια της ακτινοβολίας δεσμεύεται και διαδίδεται από τις χρωστικές επιστρώσεις στους κρυστάλλους των αλογονιδίων προκαλώντας διαταραχές σε έναν αριθμό ατομικών δεσμών που διατηρούν την κρυσταλλική δομή. Με τον τρόπο αυτό απελευθερώνονται ιόντα αργύρου μέσα στο σώμα των κρυστάλλων. Από μια κρίσιμη τιμή ενέργειας και πέρα, τα ελεύθερα άτομα αργύρου επαρκούν για να δημιουργήσουν ένα σταθερό στίγμα μεταλλικού αργύρου μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα ή διαφορετικά μια λανθάνουσα εικόνα. Ο συντελεστής ανάπτυξης (developer), που χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τη λανθάνουσα εικόνα σε ορατή εικόνα μαύρου μεταλλικού αργύρου, είναι ένα διάλυμα που περιέχει έναν αναγωγικό παράγοντα (reducing agent) ικανό να μετατρέψει τους κρυστάλλους αλογονιδίων που φέρουν στίγμα, σε μεταλλικό άργυρο. Οι ανέκθετοι κρύσταλλοι που δε φέρουν λανθάνουσα εικόνα παραμένουν ανεπηρέαστοι από το συντελεστή ανάπτυξης.

Ένας αναγωγικός παράγοντας τροφοδοτεί με ηλεκτρόνια και ανάγει τα ιόντα του αργύρου σε άτομα αργύρου $Ag^+ + e^- = Ag^0$. Όπου Ag^0 είναι ο μεταλλικός άργυρος. Υπάρχουν πολλοί αναγωγικοί παράγοντες που θα μετέτρεπαν τα ιόντα αργύρου σε μεταλλικό άργυρο. Οι περισσότεροι συντελεστές έχουν κοινή μοριακή σύσταση βασισμένη στο βενζόλιο C_6H_6 .

Τα διαλύματα ανάπτυξης αποτελούνται από δύο μέρη, τον αναγωγικό παράγοντα και ένα αλκάλιο. Το τελευταίο είναι απαραίτητο διότι οι περισσότεροι συντελεστές αποδίδουν τα μέγιστα σε συνθήκες υψηλού pH και συγκεκριμένα για την ολογραφία σε τιμές 9 ή 10. Κατά την ανάπτυξη, το ποσοστό των αναγόμενων κρυστάλλων αυξάνει σταθερά και η χημική αντίδραση προχωρά σε αργό ρυθμό έτσι ώστε να μπορεί να ανακοπεί όταν η εικόνα κρίνεται επαρκώς ανεπτυγμένη.

Ακολούθως η διαδικασία της σταθεροποίησης (fixation) σχηματίζει μια μόνιμη εικόνα απομακρύνοντας τους ανέκθετους κρυστάλλους με τη χρήση διαλύματος άλατος, όπως το θειοθειικό αμμώνιο $H_8N_2O_3S_2$. Το διάλυμα καθιστά τις ανεπιθύμητες ενώσεις υδατοδιαλυτές, έτσι ώστε να απομακρυνθούν με την πλύση του υλικού εγγραφής (Σχήμα 2.17).

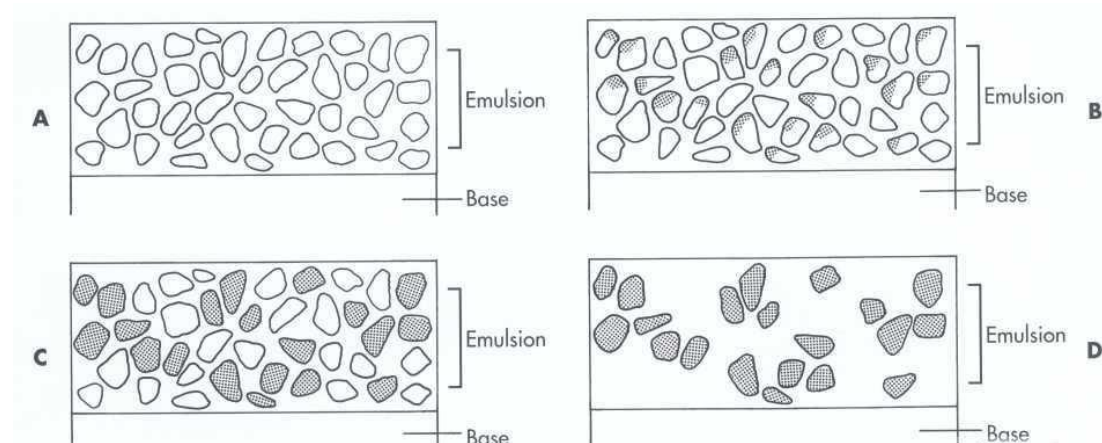
Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Είναι συνηθισμένος ο συνδυασμός δύο αναγωγικών παραγόντων σε ένα διάλυμα ανάπτυξης κι αυτό γιατί μερικοί από αυτούς αποδίδουν πολύ καλύτερα από την επί μέρους ή την ετεροχρονισμένη δράση των δύο πάνω στο μέσον εγγραφής. Οι εν λόγω παράγοντες λέγεται πως λειτουργούν υπερπροσθετικά (superadditive combinations).

Σχεδόν όλα τα αναγωγικά στοιχεία για την ολογραφία λειτουργούν επαρκώς μόνο σε αλκαλικές (βασικές) συνθήκες, δηλαδή σε $pH > 7$. Τα αλκάλια που περιλαμβάνονται στα διαλύματα ανάπτυξης διαθέτουν μεγάλες ποσότητες υδροξυλικών ιόντων OH^- όταν βρίσκονται σε υδατικά διαλύματα. Τα ιόντα αυτά ουδετεροποιούν τα ιόντα υδρογόνου H^+ που εκλύονται κατά την αναγωγική αντίδραση και υπό άλλες συνθήκες θα καθιστούσαν το χημικό περιβάλλον όξινο κι ανεπαρκές για τη διαδικασία της ανάπτυξης. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται ρυθμιστική λειτουργία (buffering). Για τη ρύθμιση των ολογραφικών διαλυμάτων χρησιμοποιείται υδροξείδιο του νατρίου ($NaOH$). Με τον τρόπο αυτό τα περιβάλλον διατηρείται σε συνθήκες pH περίπου 10 που επιτρέπουν στο διάλυμα να αναπτύξει τους κροσσούς με μεγαλύτερη αντίθεση (contrast), άρα και καλύτερη απόδοση.

Τα δύο αυτά συστατικά των διαλυμάτων συνοδεύονται από άλλους δύο δευτερεύοντες αλλά αρκετά σημαντικούς για αναφερθούν παράγοντες. Ο ένας ονομάζεται παράγοντας συντήρησης (preservative agent) κι αποτελεί ένα ακόμη αναγωγικό στοιχείο που δεν αναπτύσσει τους εκτεθειμένους κρυστάλλους, μα αλληλεπιδρά ευκολότερα με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας προστατεύοντας στην ουσία τον συντελεστή ανάπτυξης. Τέτοια λειτουργία προσφέρει σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα το θειώδες νάτριο $NaSO_3$.

Τέλος για να αποφευχθεί η αλληλεπίδραση του συντελεστή ανάπτυξης με τους μη εκτεθειμένους κρυστάλλους, τα διαλύματα ανάπτυξης περιλαμβάνουν έναν παράγοντα αναχαίτισης (restrainer) σε περιορισμένη ποσότητα.



2.18 Διεργασία διαλυμάτων αλογονιδίων του αργύρου. (A) Ανέκθετο διάλυμα, (B) Ολογραφική Έκθεση : Σχηματισμός λανθάνουσας εικόνας (στίγμα), (C) Ανάπτυξη: Σχηματισμός κόκκων. (D) Σταθεροποίηση και πλύση: Σχηματισμός αρνητικού εικόνας.

<https://www.muhammadharaty.com/lecture/4544/Dr-Rand-Al-Ani/Film-processing-pptx>

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Η διεργασία της ανάπτυξης χωρίζεται σε δυο κατηγορίες: τη χημική και τη φυσική. Κατά τη χημική ανάπτυξη το διάλυμα ανάπτυξης αλληλεπιδρά με το κρυσταλλικό πλέγμα γύρω από το διαμορφωμένο στίγμα. Τα στίγματα αργύρου λειτουργούν σαν καταλύτες για την αναγωγή των κρυστάλλων και την μετατροπή τους σε κόκκους ακανόνιστου σχήματος. Το διάλυμα ανάπτυξης απελευθερώνει 10^9 άτομα αργύρου από κάθε στιγματισμένο άτομο. Τα άτομα αυτά κατόπιν αναγωγής σχηματίζουν τους κόκκους αργύρου.

Η φυσική ανάπτυξη διαλύει τους ανέκθετους κρυστάλλους κι επανατοποθετεί τον άργυρο που περιέχεται σε αυτούς για το σχηματισμό των κόκκων. Σε αυτή την περίπτωση οι αναπτυγμένοι κόκκοι χαρακτηρίζονται από λεία σχήματα, σε αντίθεση με αυτά της χημικής διεργασίας. Αυτή η ιδιότητα των κόκκων βελτιώνει αρκετά τον λόγο σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio). Ο λόγος αυτός αποτελεί μέτρο απόδοσης για ένα ολόγραμμα κι εκφράζει το μέρος της ενέργειας ακτινοβολίας που συνεισφέρει στην προβολή της καταγεγραμμένης εικόνας, προς το σύνολο της ενέργειας ακτινοβολίας που σκεδάζεται από το ολόγραμμα.

Πίνακας 2.2 Συστατικά διαλυμάτων ανάπτυξης για διαλύματα αλογονιδίων αργύρου

Συστατικά / Διαλύματα	CWC2	GP-2	MAA-3	PAAP	AAC	SM6
Μεθυλοφενιδόνη		0,2g				
Κατεχόλη	10g					
Ασκορβικό οξύ	5g		10g	18g	16g	18g
Υδροκινόνη		5g				
Μετόλη			2,5g			
Φενιδόνη					0,5g	6g
Θειώδες νάτριο	5g	100g				
Φωσφορικό νάτριο				28,4g		28,4g
Ουρία	50g					
Υδροξείδιο του καλίου		5g				
Υδροξείδιο του νατρίου				12g		12g
Ανθρακικό νάτριο	30g		55,6g		60g	
Θειοκυανικό Αμμώνιο		12g				
Αποσταγμένο νερό	1l	1l	1l	1l	1l	1l
Αραιώση	όχι	15ml (developer)/400 ml νερού	όχι	όχι	όχι	όχι

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Τα παραπάνω διαλύματα ανάπτυξης καταγράφονται για τα υλικά εγγραφής: Kodak D-19, CWC2, GP-2, MAA-3, PAAP, AAC και το SM6 για παλμική εγγραφή. Τα περισσότερα διαλύματα αλογονιδίων είναι λεπτού κόκκου. Στην περίπτωση υλικών πολύ λεπτού κόκκου το GP-2 προτείνεται με αποτελέσματα υψηλής απόδοσης περίθλασης και πολύ χαμηλού θορύβου.

Για την ολογραφία η διαδικασία σταθεροποίησης (fixation) των διαλυμάτων αλογονιδίων αργύρου χρίζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς η απομάκρυνση στοιχείων του υλικού εγγραφής τείνει να μειώνει τον όγκο και κατά συνέπεια το βάθος της εγγραφής. Οι συνέπειες είναι ανεπιθύμητες εφόσον αντιστοιχούν σε συρρίκνωση ή παραμόρφωση των κροσσών συμβολής. Ιδιαίτερα στα ολογράμματα όγκου, όπου η ικανοποίηση της συνθήκης Bragg είναι εξαιρετικά σημαντική για την απόδοση του ολογράμματος, η συρρίκνωση (shrinkage) των κροσσών είναι καταστροφική. Για τον λόγο αυτό η σταθεροποίηση των κροσσών που περιγράφηκε σαν μέρος της ανάπτυξης γίνεται με μεγάλη προσοχή.

Παρ' όλα αυτά σε περιπτώσεις φυσικής ανάπτυξης, με υλικά μικρού μεγέθους κόκκου, όπου οι συρρικνώσεις δεν είναι ιδιαίτερος επιβλαβείς για το αποτέλεσμα του ολογράμματος, η σταθεροποίηση και η μείωση του μεγέθους κόκκου μπορεί να αποβεί βελτιωτική.

Αφού το ολογραφικό διάλυμα αναπτυχθεί, όλοι οι κρύσταλλοι που φέρουν τμήματα λανθάνουσας εικόνας έχουν μετατραπεί σε αδιαφανείς κόκκους μεταλλικού αργύρου. Ο σχηματισμός αυτός είναι ένα αρνητικό αντίγραφο του προφίλ της συμβολής που καταγράφηκε από τις δέσμες αντικειμένου και αναφοράς. Η χρήση λευκαντικών (bleaches) ενδείκνυται έτσι ώστε οι αδιαφανείς επιφάνειες να μεταμορφωθούν σε διαφανείς περιοχές με υψηλό δείκτη ανάκλασης, έτσι ώστε η ενέργεια ακτινοβολίας που απορροφάται κατά την ανασκευή να ελαχιστοποιείται. Ο βρωμιούχος σίδηρος είναι μια ένωση που χαρακτηρίζεται από υψηλό δείκτη ανάκλασης και η παρουσία του προσδίδει υψηλή ανακλαστικότητα σε ένα ολόγραμμα. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους.

Εν πρώτοις γίνεται λόγος για λευκαντικό διάλυσης ή αναστροφής (solvent or reversal bleach). Η τεχνική περιλαμβάνει απομάκρυνση των μαύρων κροσσών αργύρου αντί της σταθεροποίησής τους, αφήνοντας τις μη ανεπτυγμένες περιοχές των κρυστάλλων απείραχτες. Για την επίδραση αυτή χρησιμοποιείται οξειδωτικός παράγοντας, όπως το διχρωμικό κάλιο (potassium dichromate $K_2Cr_2O_7$), μαζί με κάποιο θειικό ή θειώδες οξύ.

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει τη χρήση λευκαντικού επαναλογόνωσης (rehalogenating bleach). Εδώ ο οξειδωτικός παράγοντας συνοδεύεται από τεράστιες ποσότητες βρωμίου μέσα σε όξινο διάλυμα. Η επίδραση του λευκαντικού απομακρύνει τον άργυρο από τους ανεπτυγμένους κροσσούς και τον επανατροφοδοτεί με τη μορφή βρωμιούχου αργύρου στους ανέκθετους κρυστάλλους ενισχύοντάς τους. Οι ενισχυμένοι κρυστάλλοι λειτουργούν σαν πυρήνες καθίζησης. Αυτή η μέθοδος οδηγεί σε ολογράμματα χωρίς μεταβολή του διαστήματος μεταξύ των κροσσών δίνοντας υψηλή απόδοση περιθλάσης. Ελαχιστοποιεί την πιθανότητα παραμορφώσεων και η ανασκευή του ολογράμματος βελτιστοποιείται στην ίδια τοποθεσία με το αρχικό ολόγραμμα.

2.5.3. Διχρωμικές ζελατίνες (Dichromated gelatins DCG)

Το χρώμιο είναι ένα φωτοευαίσθητο στοιχείο όταν βρίσκεται στη μορφή του διχρωμικού ιόντος $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$. Επίσης διαθέτει την ικανότητα να καθιστά κολλοειδή συστατικά, όπως η ζελατίνη, μη διαλυτά όταν εκτεθούν σε ακτινοβολία χαμηλού μήκους κύματος. Για τους παραπάνω λόγους οι διχρωμικές ζελατίνες (DCG) βρίσκουν εφαρμογή στην ολογραφία.

Μία ζελατίνη εμποτισμένη με διχρωμικό διάλυμα σε χαμηλό pH γίνεται αδιάλυτη στο νερό αφού εκτεθεί σε ακτινοβολία ή σε όξινο περιβάλλον. Αυτή την ιδιότητα εκμεταλλεύεται η ολογραφία. Η μοριακή δομή μιας ζελατίνης μπορεί να μεταβληθεί μέσω ενός φαινομένου που ονομάζεται σχηματισμός σταυροδεσμών (cross-linking) που την καθιστά ιδιαίτερα ανθεκτική. Τα μόρια κολλαγόνου από τα οποία αποτελούνται οι ζελατίνες σχηματίζουν εκτενής σπειροειδής δομές και κάτω από κατάλληλη διέγερση ενώνονται σχηματίζοντας ένα σταθερό πλέγμα. Στη δομή αυτή το υλικό είναι αδιάλυτο στο νερό κι απομακρύνει το ποσοστό του νερού που είχε μέχρι τότε απορροφήσει.

Η αρχή λοιπόν της DCG ολογραφίας είναι η εξής: Με την παρουσία των διχρωμικών ιόντων η φωτεινή ακτινοβολία διεγείρει τον σχηματισμό σταυροδεσμών. Η ζελατίνη γίνεται συνεκτική και ο δείκτης διάθλασης των εκτεθειμένων περιοχών διαφοροποιείται από αυτόν των μη εκτεθειμένων. Η παραπάνω διαδικασία είναι αρκετή για την κατασκευή ολογραμμάτων φάσης.

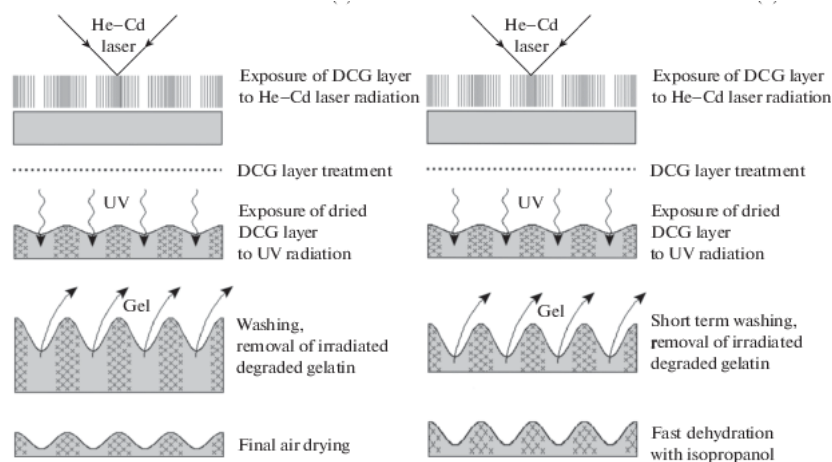
Μια επίπεδη γυάλινη επιφάνεια επικαλυμμένη με ζελατίνη υπόκειται σε ολογραφική έκθεση. Οι κροσσοί συμβολής εγγράφονται στο υλικό μέσω του τοπικού σχηματισμού σταυροδεσμών. Οι κροσσοί συμβολής αναπτύσσονται με τη βύθιση του ολογράμματος σε επίπεδη λεκάνη με νερό. Με την απορρόφηση του νερού σχηματίζονται οιδήματα στην επιφάνεια της ζελατίνης που διαφοροποιούν το ανάγλυφο των εκτεθειμένων κι ανέκθετων περιοχών. Η επιφάνεια αφυδατώνεται σε διάλυμα αλκοόλης και στεγνώνεται άμεσα (Σχήμα 2.18).

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία

Το προφίλ συμβολής είναι πλέον σταθερό στη δομή της ζελατίνης και λειτουργεί σαν ένα ολόγραμμα φάσης με υψηλή απόδοση περίθλασης κι ελάχιστο σκεδασμό του φωτός, εφόσον είναι μια δομή χωρίς κόκκους. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά ανασκευής ενός ολογράμματος DCG είναι τα εξής:

- Αρχικό πάχος της επίστρωσης ζελατίνης,
- Αρχική σκληρότητα ζελατίνης,
- Συγκέντρωση του διχρωμικού διαλύματος,
- Συνθήκες στέγνωσης: θερμοκρασία, ατμοσφαιρική υγρασία, ταχύτητα στέγνωσης,
- Οπτικό εύρος, διάρκεια κι ενέργεια έκθεσης,
- Χρόνος μεσολάβησης μεταξύ έκθεσης και ανάπτυξης,
- Σύσταση, pH και θερμοκρασία διαλυμάτων ανάπτυξης,
- Χρόνος ανάπτυξης,
- Γεωμετρία εγγραφής.

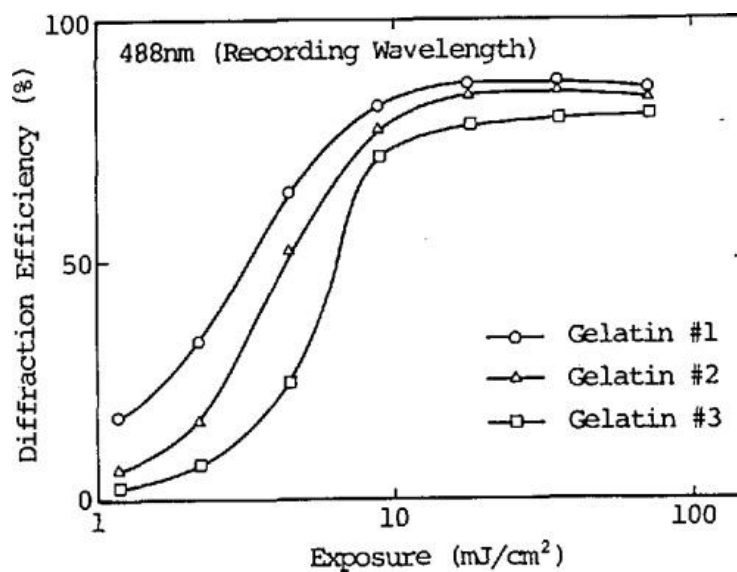
Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζονται από τις παραπάνω παραμέτρους περιλαμβάνουν τη θλόωση, το σκεδασμό, το μέγιστο μήκος κύματος ανασκευής, το οπτικό εύρος του ολογράμματος και την απόδοση περίθλασης (Διαγράμματα 2.3 και 2.4). Η εικόνα που σχηματίζεται σε ένα DCG ολόγραμμα εκφυλίζεται γρήγορα με την παρουσία υγρασίας. Μια υγρή ατμόσφαιρα μπορεί να εξαφανίσει τους κροσσούς σε μερικές μέρες ή ώρες και για την αποφυγή αυτής της επίδρασης τα ολογράμματα σφραγίζονται αεροστεγώς με τη χρήση τσιμέντου πήξεως UV ακτινοβολίας σε γυάλινο πλακίδιο εφαπτόμενο προσεκτικά στην επιφάνεια του ολογράμματος. Σε περίπτωση που το ολόγραμμα βυθιστεί σε αλκοολούχα διαλύματα σταδιακά αυξανόμενης συγκέντρωσης, το αποτέλεσμα είναι μονοχρωματικό.



Σχήμα 2.19 Ανάπτυξη DCG ολογράμματος: Έκθεση σε Laser Ηλίου - Καδμίου, Σταθεροποίηση με ακτινοβολία UV, Πλύση - Απομάκρυνση ανέκθετων περιοχών: (α) Κανονικής διάρκειας, (β)Σύντομη, (α) Ξήρανση με Αέρα, (β) Αφυδάτωση με ισοπροπανόλη

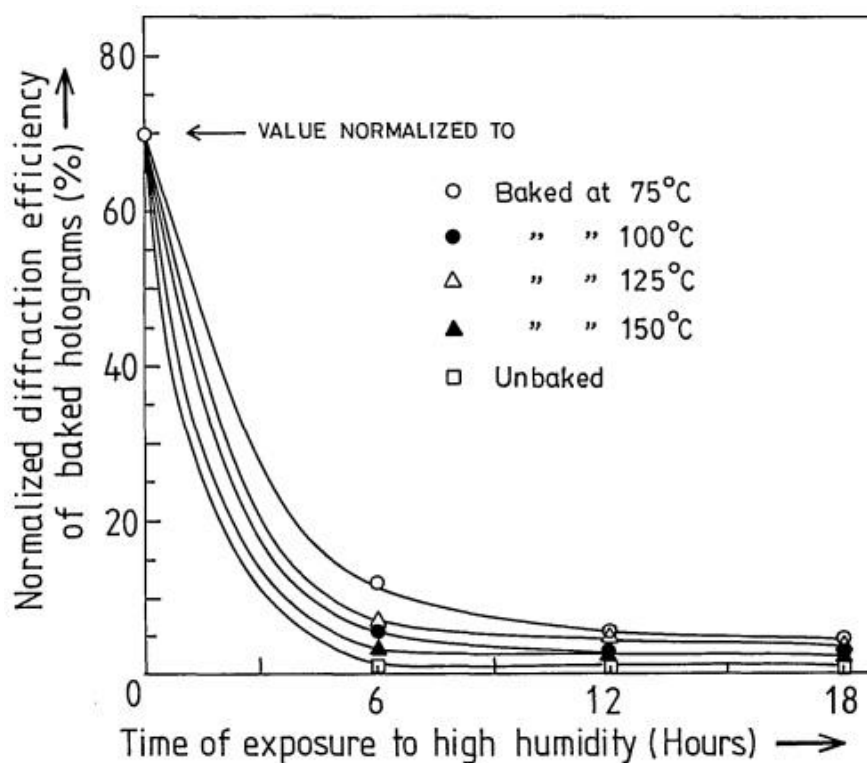
https://www.researchgate.net/publication/334368650_High

[frequency_relief_holographic_gratings_created_by_exposing_dichromated_gelatin_to_short-wave_UV_radiation](https://www.researchgate.net/publication/334368650_High)



Διάγραμμα 2.4 Απόδοση περίθλασης προς ενέργεια έκθεσης για τρεις διαφορετικές DCG: Μήκος εγγραφής 488 nm

<https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-28-10-1845>



Διάγραμμα 2.3 Απόδοση περίθλασης προς το χρόνο έκθεσης σε υψηλή υγρασία για DCG ολογράμματα διαφορετικών συνθηκών ξήρανσης σε φούρνους: 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, χωρίς αποξήρανση.

<https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-29-35-5292>

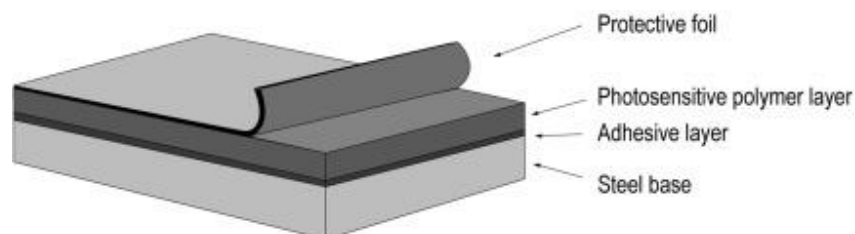
2.5.4. Φωτοπολυμερή (photopolymers)

Τα φωτοπολυμερή είναι οργανικές ενώσεις που πολυμερίζονται με την έκθεσή τους σε ακτινοβολία. Με τον όρο πολυμερισμός εννοείται η διεργασία κατά την οποία τα μικρά μόρια οργανικών ενώσεων (μονομερή) ενώνονται σχηματίζοντας μακριές αλυσίδες (πολυμερή) σε διάφορες διατάξεις. Οι ιδιότητες ενός πολυμερούς εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τους δεσμούς των αλυσίδων.

Η σημαντική ιδιότητα των πολυμερών είναι ότι μεταβάλλουν τη χημική και φυσική τους σύσταση και κατά προέκταση τον δείκτη διάθλασής τους αφού εκτεθούν στο φως. Ένα ιδανικό φωτοπολυμερές είναι διάφανο, εύκαμπτο, ευαίσθητο σε όλα τα μήκη κύματος του ορατού φάσματος και πλήρως σταθερό μετά τις διεργασίες ανάπτυξης. Τα υλικά αυτά απασχόλησαν έντονα την έρευνα πάνω στα ολογραφικά μέσα εγγραφής (Σχήμα 1.19). Τα φωτοπολυμερή ενδείκνυνται για εφαρμογές της ολογραφίας που αφορούν την ασφάλεια.

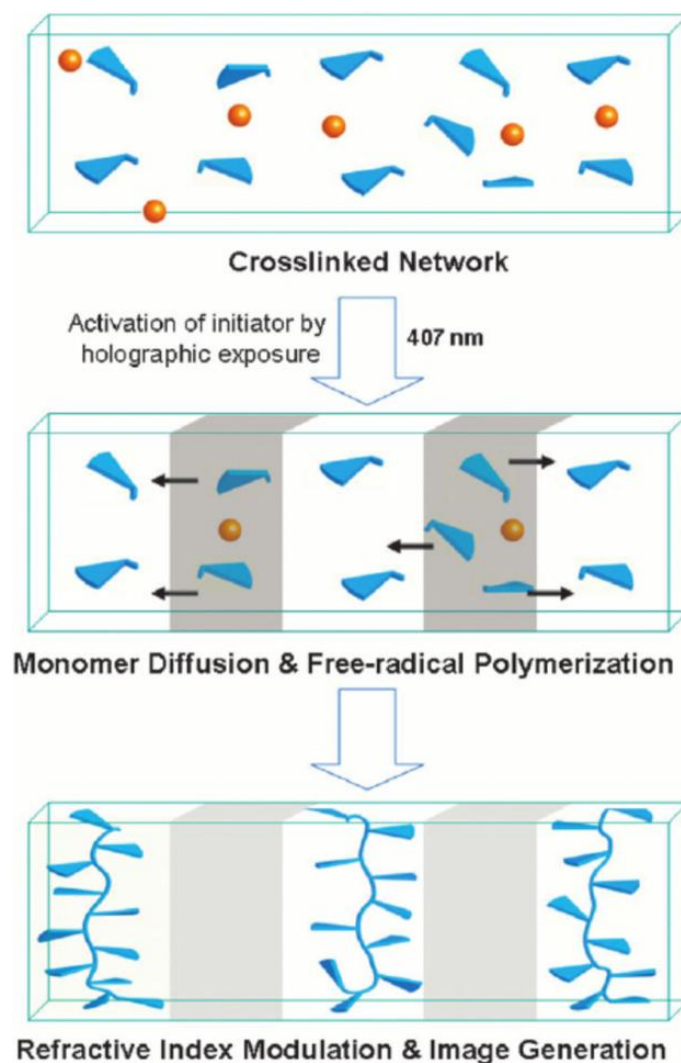
Ένα τυπικό παράδειγμα φωτοπολυμερούς για ολογραφίας συνδυάζει μονομερές βινυλίου κι ένα φωτοδιεγερτικό σύστημα (photoinitiation system) σε μορφή φιλμ. Ένα φωτοδιεγερτικό σύστημα λειτουργεί καταλυτικά κι ενεργοποιείται από την ενέργεια της ακτινοβολίας. Η ενέργεια έκθεσης για ολογράμματα μετάδοσης είναι περίπου 5 mJ/cm^2 , ενώ για ολογράμματα ανάκλασης περίπου 30 mJ/cm^2 . Το αποτέλεσμα είναι παγχρωματικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έγχρωμο ολόγραμμα. Μετά την έκθεση το ολόγραμμα υπόκειται σε ακτινοβολία UV ή λευκού φωτός (5 mW/cm^2) για χρόνο ενός λεπτού κι έπειτα τοποθετείται σε θάλαμο ξήρανσης του φιλμ, στους $100 - 120 \text{ }^\circ\text{C}$ για $1 - 2$ ώρες (Σχήμα 2.20).

Η διεργασία ανάπτυξης των φωτοπολυμερών απαιτεί ένα περιβάλλον αιωρούμενα σωματίδια. Η επιφάνεια του πολυμερούς πριν την έκθεση είναι κολλώδης με αποτέλεσμα τα σωματίδια να προσκολλούνται πάνω της. Για το λόγο αυτό το φωτοπολυμερές στρώμα τοποθετείται ενδιάμεσα από στρώση προστατευτικού πολυεστέρα και γυάλινο ή μεταλλικό υπόστρωμα.



Σχήμα 2.20 Διαστρωμάτωση φωτοπολυμερούς μέσου εγγραφής: Προστατευτική επιφάνεια, Φωτοπολυμερές στρώμα, Στρώμα πρόσφυσης, μεταλλική βάση

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/photopolymer>

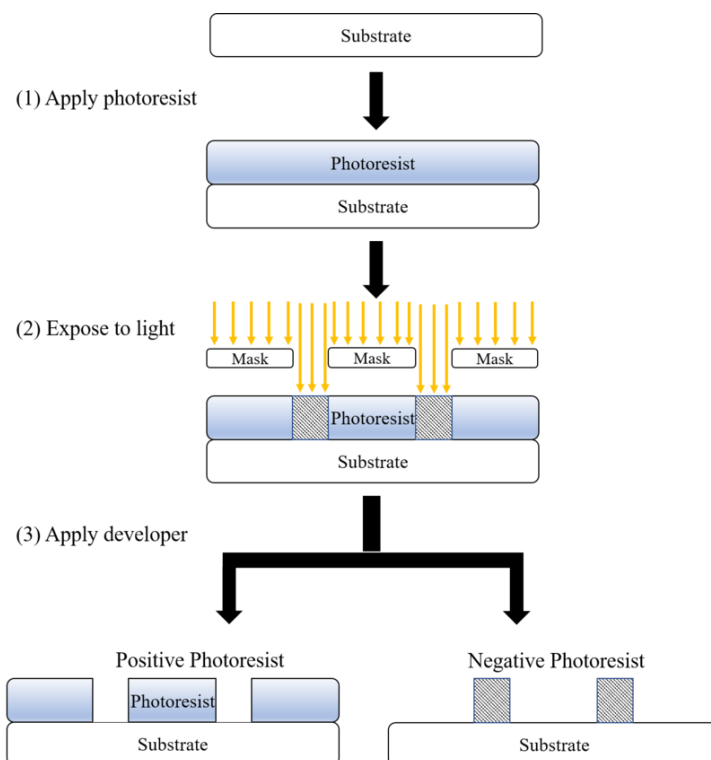


Σχήμα 2.21 Εγγραφή ολογράμματος σε φωτοπολυμερές: Επάνω: Μονομερή και Φωτοδιεγρετικοί παράγοντες, Μέση: Διέγερση παραγόντων με ολογραφική έκθεση (407 nm), Διάχυση μονομερών και πολυμερισμός, Κάτω: Διαμόρφωση δείκτη διάθλασης και Εγγραφή ολογράμματος
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-refractive-index-modulation-and-hologram-formation-due-to-the_fig1_23771400

2.5.5. Φωτοαντιστατικά υλικά (Photoresists)

Τα φωτοαντιστατικά υλικά είναι οργανικές ενώσεις που καθίστανται είτε αδιάλυτες (αρνητικό εικόνας) είτε διαλυτές (θετικό εικόνας) σε έναν οργανικό διαλύτη μετά την έκθεσή τους σε μικρά μήκη κύματος (Σχήμα 2.21). Μια επίστρωση του υλικού κυμαίνεται γύρω στο 1 μm πάχους και η απαραίτητη έκθεση σε μπλε ή ιώδες φως με laser συνεχούς κύματος (CW) είναι της τάξης των 60 – 100 mJ/cm². Πρόσφατα διαπιστώθηκε πως τα φωτοαντιστατικά υλικά του εμπορίου εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε παλμικά laser όπου απαιτείται έκθεση 8 – 15 mJ/cm².

Κεφάλαιο 2: Ολογραφία



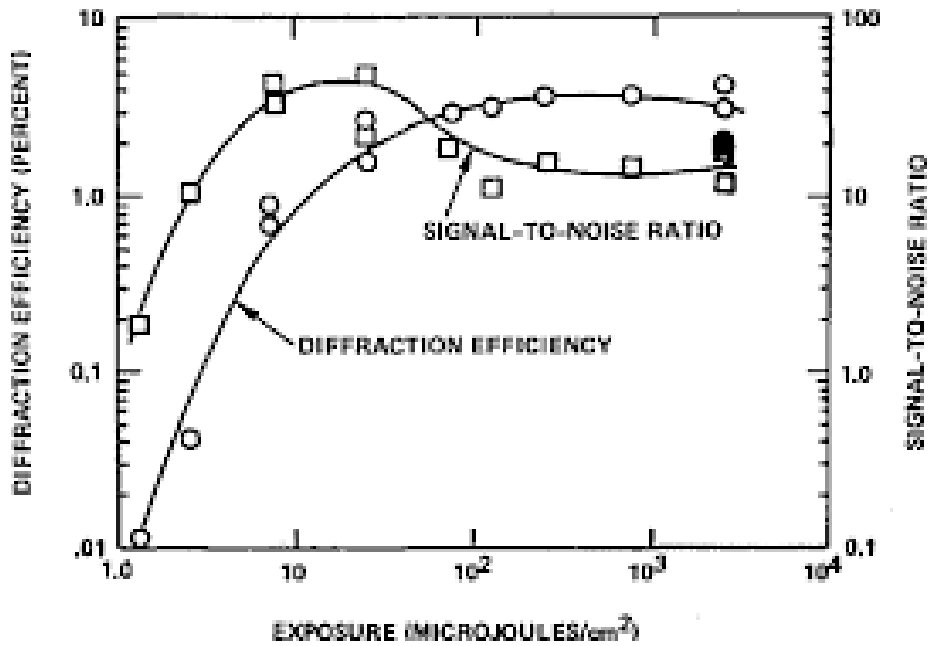
Σχήμα 2.22 Συμπεριφορά θετικού κι αρνητικού φωτοαντιστατικού υλικού στην ολογραφική έκθεση. Διαμόρφωση ανάγλυφου επιφάνειας: (1) Φωτοαντιστατικό υλικό, (2) Ολογραφική έκθεση με τη χρήση οπτικών φραγμάτων, (3) Ανάπτυξη: Θετικό και Αρνητικό αποτέλεσμα

<https://en.wikipedia.org/wiki/Photoresist>

2.5.6. Θερμοπλαστικά υλικά (Thermoplastics)

Οι θερμοπλαστικές διατάξεις προσφέρουν τη δυνατότητα της διαγραφής και επανεγγραφής ολογραμμάτων στο ίδιο υλικό. Αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα ενός ηλεκτρικού αγωγού όπως το οξείδιο του ινδίου προστατευμένο από φιλμ κασσίτερου ή χαλαζία. Οι δύο στρώσεις επικαλύπτονται από μια λεπτή επιφάνεια περίπου 1,2 μm οργανικού φωτοαγωγικού μέσου ενώ στην κορυφή όλων βρίσκεται μία επίστρωση θερμοπλαστικού υλικού με χαμηλή θερμοκρασία τήξης (70°C) σε πάχος περίπου ίσο με 0,7 μm.

Αρχικά η συσκευή φορτίζεται ηλεκτρικά κι όταν δεχτεί την ενέργεια της ακτινοβολίας, το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει στις εκτεθειμένες περιοχές. Η ελεύθερη επιφάνεια του θερμοπλαστικού επαναφορτίζεται με ίσο δυναμικό και οι καταγεγραμμένοι κροσσοί συμβολής αναπτύσσονται περνώντας το ηλεκτρικό ρεύμα διαμέσου του οξειδίου του ινδίου που με τη σειρά του θερμαίνει την επιφάνεια του θερμοπλαστικού με τρόπο ώστε το ανάγλυφό της να σχηματιστεί ανάλογα με το προφίλ του ηλεκτρικού φορτίου.



Διάγραμμα 2.5 Απόδοση περίθλασης και λόγος σήματος/θορύβου για θερμοπλαστικό υλικό.

Σε περίπτωση που ο ηλεκτραγωγικός παράγοντας φορτιστεί με ρεύμα υψηλής έντασης ή μακράς διάρκειας, το ολόγραμμα διαγράφεται κι η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου. Η εγγραφή διαγράφεται σε περίπτωση που το υλικό φωτιστεί με ακτινοβολία ταυτόσημου μήκους κύματος. Αυτό είναι σαφές πως δημιουργεί προβλήματα στην ανασκευή του ολογράμματος, όμως μια ακόμα ιδιότητα του υλικού είναι πως χαρακτηρίζεται από δύο δείκτες διάθλασης (birefringent). Έτσι η ανασκευή χρησιμοποιεί το δεύτερο δείκτη διάθλασης που αντιστοιχεί συνήθως σε μεγαλύτερα μήκη κύματος στα οποία το υλικό δεν είναι φωτοευαίσθητο και η εγγραφή δεν επηρεάζεται. Η ευαισθησία των υλικών αυτών είναι αρκετά χαμηλή, τέσσερις τάξεις μεγέθους χαμηλότερη των διαλυμάτων αλογονιδίων, στα 100 – 500 mJ/cm² (Διάγραμμα 2.6).

2.6. Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο είχε ως σκοπό την παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών της αναλογικής ολογραφίας. Οι βασικές αρχές και οι κατηγοριοποιήσεις των εκάστοτε διατάξεων και υλικών βοηθούν να γίνει σαφές ότι πρόκειται για μια πολυπαραμετρική και ευαίσθητη τεχνική με πολλές εφαρμογές. Η ψηφιακή ολογραφία βασίζεται στις ίδιες αρχές και διατάξεις συμβολής και περίθλασης όσον αφορά στην εγγραφή, προχωρώντας την τεχνική και την ανάλυση των ολογραμμάτων σε σπουδαία επιστημονικά επίπεδα. Η ψηφιακή ολογραφία είναι το πεδίο για να περιγραφεί το state-of-the-art της μεθόδου και οι πιο σύγχρονες εφαρμογές της. Όμως χωρίς τη μελέτη των βασικών κανόνων αυτό θα ήταν ανέφικτο. Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές της ψηφιακής ολογραφίας, καθώς και οι συγκεκριμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα επιστημονικά πεδία.

ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

3.1. Εισαγωγή

Η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή ολογραφία ξεκίνησε το 1970. Η εδραίωση της όμως συνέβη 24 χρόνια μετά με την εμφάνιση δύο σημαντικών εξελίξεων στον τομέα της τεχνολογίας. Η ανάπτυξη των φωτοευαίσθητων αισθητήρων με πολυάριθμα μικροσκοπικά εικονοστοιχεία (pixels), καθώς και η εμφάνιση ισχυρών επεξεργαστών με αυξημένη χωρητικότητα, αποτέλεσαν τη βάση για την ψηφιακή ολογραφία όπως είναι γνωστή έως σήμερα. Η συγκεκριμένη τεχνολογία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων χρησιμοποιώντας πλήθος διατάξεων και χαρακτηριστικών. Συνεπώς η ψηφιακή ολογραφία αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, όπως η βιοϊατρική, η βιομηχανική και οι επιστημονικές και βιομηχανικές μετρολογίες.

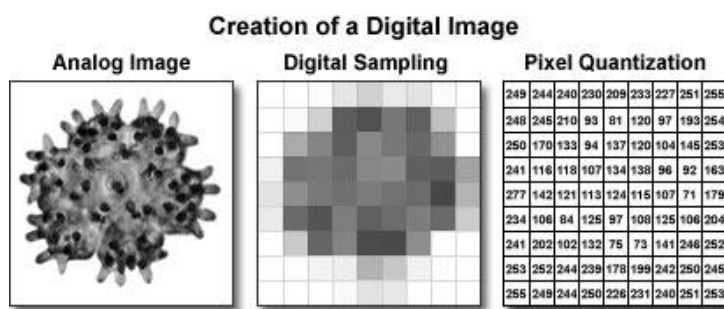
Χρονολογικά, η ιδέα της ψηφιακής ανασκευής του οπτικού κύματος πρώτα εμφανίστηκε το 1967 με ένα άρθρο που δημοσίευσε ο Goodman στο Applied Physics Letters στο οποίο αναφερόταν στην αντικατάσταση της εγγραφής του αντικειμένου από αναλογική σε ψηφιακή. Σύμφωνα με το άρθρο, αυτό θα ήταν δυνατό με την προσομοίωση του προφίλ περίθλασης μέσω ενός ψηφιακού πλέγματος, δηλαδή ενός πίνακα διακριτών τιμών του ολογράμματος. Η πρώτη εισήγηση του όρου της ψηφιακής ολογραφίας πραγματοποιήθηκε το 1971 από τον Huang, ο οποίος αναφέρθηκε στην ανάλυση οπτικών κυμάτων μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ένα χρόνο μετά ο Kronrad παρουσίασε τις πρώτες προσπάθειες ανασκευής, κατά τις οποίες απαιτούνταν 6 ώρες υπολογισμού για την ανασκευή ενός πεδίου 512×512 εικονοστοιχείων με τον υπολογιστή Minsk-22. Χρειάστηκαν άλλα 20 χρόνια για την υλοποίηση της ψηφιακής ολογραφίας, κι αυτό επετεύχθη μέσω της εξέλιξης της τεχνολογίας των αισθητήρων συζευγμένου φορτίου (CCD) και των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Η φυσική αρχή της ψηφιακής ολογραφίας είναι παρόμοια με αυτήν της αναλογικής ολογραφίας. Η βασική διαφορά έγκειται στην αντικατάσταση ορισμένων βημάτων της διαδικασίας από αναλογικά σε ψηφιακά. Πιο συγκεκριμένα η ψηφιακή ολογραφία περιλαμβάνει τα εξής στάδια: εγγραφή σε ψηφιακό αισθητήρα (recording), αποδιαμόρφωση (demodulation) και ψηφιακή ανασκευή (reconstruction). Τέλος μια ακόμη διαφορά είναι πως το μέγεθος των pixels ενός αισθητήρα (CCD ή CMOS) είναι σαφώς μεγαλύτερο από αυτό των κόκκων ενός αναλογικού μέσου εγγραφής (2-3 μm έναντι περίπου 25 nm).

3.2. Θεωρία Ανάλυσης Εικόνας

Το πέρασμα της ολογραφίας στην ψηφιακή εποχή συνέβη με τη διαμεσολάβηση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της ψηφιακής εικόνας. Βασικά μεγέθη της ανάλυσης εικόνας είναι απαιτούμενα για να γίνει κατανοητή η διαδικασία ψηφιοποίησης ενός ολογράμματος. Αυτά θα παρουσιαστούν στο παρόν υποκεφάλαιο.

Μια ψηφιακή εικόνα (raster image) είναι ένα ψηφιακό αρχείο αποτελούμενο από πολλά, διακριτά στοιχεία (elements) που ονομάζονται pixels (picture elements). Στην πραγματικότητα η δημιουργία μιας ψηφιακής εικόνας είναι μια διαδικασία ψηφιοποίησης. Μια μετατροπή, δηλαδή, ενός αναλογικού σήματος σε ένα ψηφιακό που προϋποθέτει την χαρτογράφηση της εικόνας σε ένα πλέγμα διακριτών στοιχείων (pixels) και την κατανομή των εντάσεων του φωτός που καταγράφονται. Για τις ψηφιακές εικόνες, το αναλογικό σήμα ξεκινά από τους φωτοευαίσθητους αισθητήρες (sensors) και είναι ανάλογο της έντασης του φωτός που ένα αντικείμενο αντανακλά ή μεταδίδει. Στη συνέχεια η αναλογία αυτή μετατρέπεται σε διακριτές τιμές στο ψηφιακό πλέγμα των pixels. Συνοψίζοντας η διαδικασία μετατρέπει την εικόνα ενός αντικειμένου σε ένα πλέγμα τετράγωνων εικονοστοιχείων (pixels) που φέρουν, το καθένα, μία τιμή. Η τιμή αυτή αναλογεί σε συγκεκριμένη απόχρωση (έγχρωμη ή ασπρόμαυρη). Ποσοτικοποιώντας τις αποχρώσεις μιας εικόνας σε ένα πλέγμα μεγάλου αριθμού στοιχείων, ουσιαστικά κατασκευάζεται μια ψηφιακή προσέγγιση της πραγματικότητας (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Δημιουργία Ψηφιακής Εικόνας: (α) αναλογική εικόνα, (β) ψηφιοποίηση, (γ) Πλέγμα τιμών εικονοστοιχείων.

<https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/digitalimagebasics.html>

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Η απόκριση ενός αισθητήρα είναι ανάλογη της ενέργειας ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Εφόσον η ψηφιακή εικόνα κατασκευαστεί, ψηφιοποιηθεί, ακολουθεί μια αντίστροφη διαδικασία μετατροπής του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό. Η μετατροπή αυτή δίνει τη δυνατότητα σε έναν Η/Υ να παρουσιάσει την εικόνα σε μια μορφή που να αποκωδικοποιείται από το ανθρώπινο μάτι. Η προβολή της εικόνας σε οθόνη ή η εκτύπωσή της αποτελούν δύο συνήθη παραδείγματα αυτής της διαδικασίας. Η εικόνα που εμφανίζεται αποτελείται από έναν δισδιάστατο πίνακα από χιλιάδες ή εκατομμύρια pixels, καθένα από τα οποία διαθέτει συγκεκριμένη θέση, μέγεθος κι απόχρωση. Έτσι αποτυπώνεται η ψηφιακή μορφή ενός αντικειμένου. Το μέγεθος και η θέση των αντικειμένων που περιέχονται σε μια εικόνα είναι εκτιμήσεις και η ακρίβειά τους έγκειται στην ανάλυση της εικόνας.

Υπάρχουν τρία βασικά μετρήσιμα μεγέθη για μια ψηφιακή εικόνα: η χωρική ανάλυση (spatial resolution) (συνήθως αναφέρεται απλώς ως ανάλυση), το βάθος ψηφίων (pixel bit depth) και το χρώμα. Η ανάλυση ορίζεται ως ο αριθμός των εικονοστοιχείων που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των χωρικών μεγεθών ενός αντικειμένου. Όσο περισσότερα pixels χρησιμοποιούνται ανά μονάδα χωρικής διάστασης, τόσο υψηλότερη η ανάλυση της εικόνας (Σχήμα 3.2). Το μέγεθος της ανάλυσης μετράται σε dpi (dots per inch), ppi (pixel per inch) ή lpi (line pairs per inch). Παρ' όλα αυτά στη μηχανική συνήθως η ανάλυση μιας εικόνας εκφράζεται σε μονάδα μήκους ανά pixel (π.χ. μm/pixel). Η ανάλυση εμφανίζεται στις εικόνες με τη μορφή μπάρας που δηλώνει το πραγματικό μήκος που αναπαριστά.



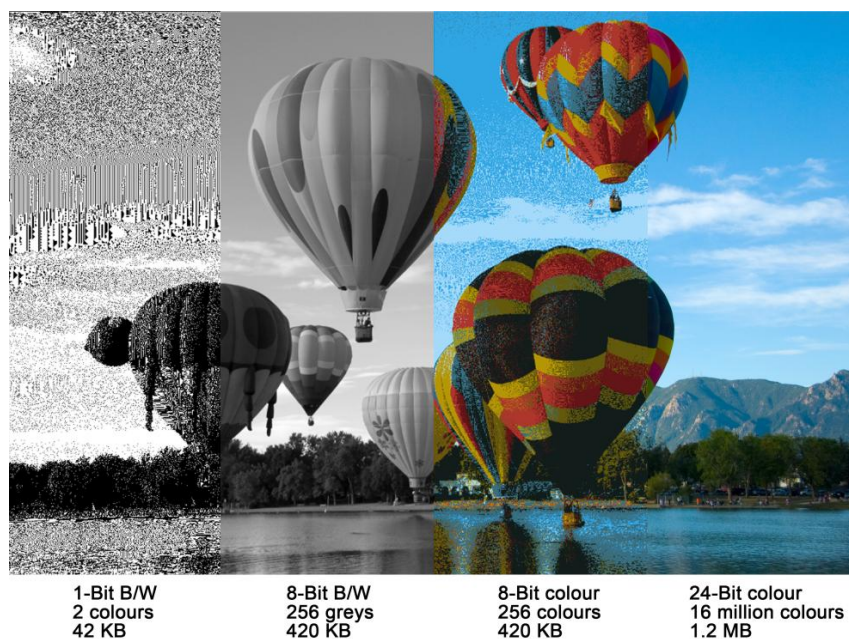
Σχήμα 3.3 Ανάλυση εικόνας: Φθίνουσα διάταξη από 256 ppi έως 4 ppi

<https://www.wildlifeinpixels.net/blog/pixel-resolution/>

Το μέγεθος του βάθους ψηφίων πολλές φορές ονομάζεται βάθος εικονοστοιχείου (pixel depth) ή βάθος χρώματος (color depth). Ορίζει τον αριθμό των πιθανών αποχρώσεων, μία εκ των οποίων θα αποτυπώνεται σε κάθε pixel. Πιο συγκεκριμένα, ένας Η/Υ δουλεύει με δυαδικό σύστημα. Αυτό σημαίνει πως αναγνωρίζει μόνο δύο τιμές 0 και 1. Κάθε pixel αποτελείται από μια σειρά δυαδικών ψηφίων (bits) που αντιστοιχούν σε μία απόχρωση. Ο αριθμός των ψηφίων ορίζεται ως βάθος ψηφίων (bit depth).

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Έτσι, μια μονοψήφια εικόνα (one-bit image) επιτρέπει σε κάθε pixel να πάρει τιμή 0 ή 1 που αποτυπώνει μαύρο ή άσπρο. Μία οκταψήφια εικόνα (8-bit image) επιτρέπει σε κάθε pixel συνδυασμούς 8 ψηφίων με τιμές 0 και 1. Συνολικά 256 συνδυασμούς και κάθε pixel μπορεί να αποτυπώνει μία εκ των 256 αποχρώσεων. Αντιστοίχως μια εικοσιτετραψήφια εικόνα (24-bit image) επιτρέπει 16,8 εκατομμύρια συνδυασμούς και αντίστοιχες αποχρώσεις (Σχήμα 3.3). Το βάθος ψηφίου μετρά τον αριθμό των πιθανών αποχρώσεων που μπορεί να αποτυπώνει ένα pixel. Είναι προφανές πως μεγαλύτερος αριθμός βάθους έχει σαν συνέπεια ακριβέστερη αποτύπωση των διαφορών μιας εικόνας.



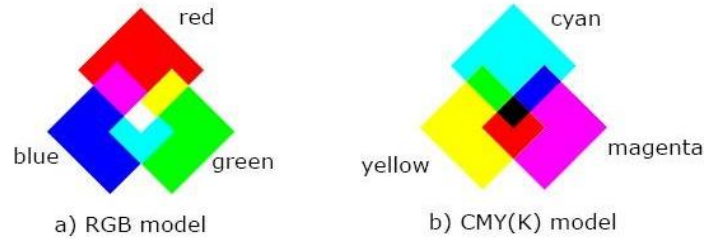
Σχήμα 3.4 Εικόνα και βάθος ψηφίων. (α) 1-Bit, (β) 8-Bit (Ασπρόμαυρη), (γ) 8-Bit (Εγχρωμη), (δ) 24-Bit

<https://www.futurelearn.com/info/courses/representing-data-with-images-and-sound/0/steps/53142>

Όσον αφορά στη χρωματική αναπαράσταση μιας εικόνας υπάρχουν ποικίλα συστήματα ορισμού. Τα κυριότερα από αυτά είναι το RGB, το CMYK, το HSV και το CIELAB. Το σύστημα RGB χρησιμοποιεί τα τρία πρωταρχικά χρώματα (Κόκκινο (Red), Πράσινο (Green), Μπλε (Blue)) προσθετικά, έτσι ώστε να μπορεί να συνθέτει κάθε χρώμα ανάλογα τα ποσοστά πρόσθεσης κάθε πρωταρχικού.

Το μοντέλο δουλεύει προσθέτοντας διαφορετικά χρώματα φωτός, με τη προσθήκη όλων των χρωμάτων να οδηγεί στο λευκό. Οι τιμές για την ασπρόμαυρη κλίμακα (Grayscale) ακολουθούν τη πορεία από το λευκό στο μαύρο, με όλες τις ενδιάμεσες αποχρώσεις του γκρι. Το RGB σύστημα χρησιμοποιείται από ψηφιακές κάμερες και οθόνες H/Y. Αντίθετα το σύστημα CMYK λειτουργεί με βάση τα συμπληρωματικά χρώματα (Κυανό (Cyan), Magenta (M), Κίτρινο (Yellow)) καθώς και το μαύρο χρώμα (K) (Σχήμα 3.4).

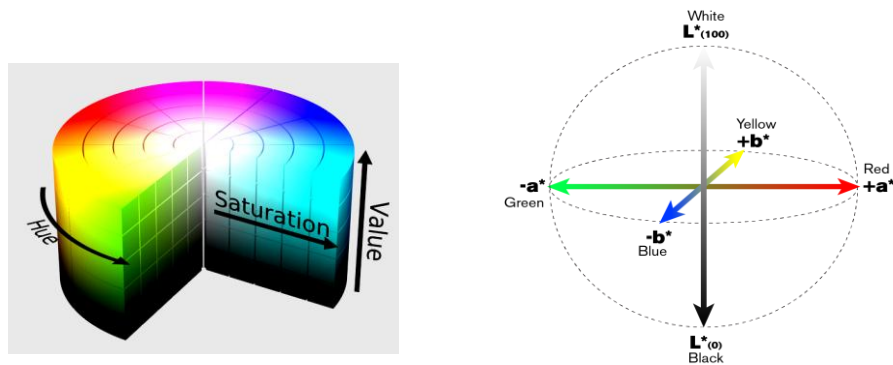
Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία



Σχήμα 3.5 (α) Μοντέλο RGB (Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε, Λευκό) , (β) μοντέλο CMYK (Κυανό, Magenta, Κίτρινο, Μαύρο)

<https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/documentation/ipp-dev-reference/top/volume-2-image-processing/image-color-conversion/color-models.html?language=es>

Το μοντέλο HSV είναι βασισμένο στα εξής μεγέθη: Απόχρωση (Hue), Κορεσμός (Saturation) και Συνολική Φωτεινότητα (Value) που παίρνουν τιμές από 0 έως 1. Η απόχρωση ξεχωρίζει τα χρώματα. Ο κορεσμός αναφέρεται στο ποσό του φωτός που έχει συγκεντρωθεί σε κάθε απόχρωση. Τέλος το σύστημα CIELAB ή $L^*a^*b^*$ προσιδιάζει περισσότερο στον τρόπο αντίληψης του ανθρώπου. Εδώ χρησιμοποιούνται τρεις παράμετροι. Η πρώτη είναι η φωτεινότητα (luminance or lightness component (L)) που παίρνει τιμές από 0 (μαύρο) έως 100 (λευκό). Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι χρωματικοί παράγοντες. Ο a^* – παράγοντας εκτείνεται από το πράσινο στο κόκκινο, ενώ ο b^* – παράγοντας από το μπλε στο κίτρινο, με τιμές από -120 έως +120 (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.6. (α) Μοντέλο HSV: Απόχρωση, κορεσμός, Φωτεινότητα (β) Μοντέλο $L^*a^*b^*$

<https://www.wildlifeinpixels.net/blog/pixel-resolution/>

<https://www.nazdar.com/en-us/News-events/ArtMID/4165/ArticleID/224>

3.3. Επεξεργασία Ψηφιακής Εικόνας - Χωρικά φίλτρα

Ένα φίλτρο είναι ένα ψηφιακό εργαλείο σχεδιασμένο να επεξεργάζεται μια εικόνα εφαρμόζοντας μαθηματικούς αλγόριθμους και να την επιστρέφει σε τροποποιημένη μορφή. Τα χωρικά φίλτρα είναι στην ουσία πίνακες που διορθώνουν στις τιμές των pixels σαρώνοντας την εικόνα. Χρησιμοποιώντας την πράξη της συνέλιξης, η εφαρμογή ενός χωρικού φίλτρου έχει σκοπό να ελαττώσει τον θόρυβο, να ενισχύσει συγκεκριμένες περιοχές μέσα στην εικόνα, να εξομαλύνει τις διακυμάνσεις ή να αναδείξει τις ακμές.

Στην ουσία τα χωρικά φίλτρα αποτελούνται από έναν πίνακα που καταλαμβάνει ορισμένο αριθμό pixels της εικόνας. Κάθε στοιχείο του φίλτρου αντιστοιχεί σε ένα pixel της εικόνας. Όλα τα φίλτρα είναι μονών διαστάσεων, συνήθως 3×3 , 5×5 και 7×7 και συνεπώς διαθέτουν ένα κέντρο. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης το πλαίσιο μετακινείται με βάση το κέντρο εφαρμόζοντας τον προκαθορισμένο αλγόριθμο στα γειτονικά εικονοστοιχεία. Μετά τους υπολογισμούς, το κεντρικό εικονοστοιχείο λαμβάνει νέα τιμή βάσει των τιμών που έλαβαν τα γειτονικά του εικονοστοιχεία.

Το φίλτρο κινείται οριζόντια με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιείται σάρωση της εικόνας από γραμμή σε γραμμή έχοντας σαν αφετηρία το εικονοστοιχείο που βρίσκεται επάνω αριστερά της εικόνας με συντεταγμένες (0,0). Εδώ εμφανίζεται ένα τεχνικό εμπόδιο: Με βάση τη συγκεκριμένη ακολουθία δεν είναι δυνατή η σάρωση των ακραίων γραμμών και στηλών της εικόνας. Η λύση προκύπτει από την πρόσθεση στηλών και γραμμών εκατέρωθεν του πλέγματος, ίδιων με τις υπάρχουσες ακραίες γραμμές και στήλες της εικόνας. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα σάρωσης σε όλα τα pixels.

Η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί θεωρώντας ένα φίλτρο ως συνάρτηση φ το οποίο μετατρέπει με καθορισμένο τρόπο ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα με συνάρτηση ψ ώστε να προκύψει τελική συνάρτηση ω (Σχήμα 3.6). Ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται μαθηματικά το φίλτρο διατυπώνεται ως:

$$\omega_{i,j} = \varphi_{i,j} * \psi_{i,j} \quad [3.1]$$

$$\omega_{i,j} = \begin{vmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \psi_{i-1,j-1} & \psi_{i-1,j} & \psi_{i-1,j+1} \\ \psi_{i,j-1} & \psi_{i,j} & \psi_{i,j+1} \\ \psi_{i+1,j-1} & \psi_{i+1,j} & \psi_{i+1,j+1} \end{vmatrix} \quad [3.2]$$

Η πράξη μέσω της οποίας το φίλτρο φ επιδρά επάνω στην συνάρτηση ψ με τελικό αποτέλεσμα την συνάρτηση ω λέγεται *συνέλιξη (convolution)* και εκφράζεται μαθηματικά για τις συνεχείς συναρτήσεις ως το ολοκλήρωμα συνέλιξης των συναρτήσεων $\psi(t)$ και $\varphi(t)$ με τη μορφή:

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

$$\omega(t) = \int \psi(t)\varphi(t - \tau) d\tau, \quad [3.3]$$

και για διακριτές συναρτήσεις υπό μορφή αθροισμάτων:

$$\omega(t) = \sum \psi(t)\varphi(t - \tau) \quad [3.4]$$

Τα όρια της ολοκλήρωσης και αντίστοιχα του αθροίσματος εξαρτώνται από το πεδίο ορισμού της συνάρτησης φ .

Το παραπάνω ολοκλήρωμα λόγω του ότι οι τιμές των pixels της εικόνας είναι συνάρτηση των δύο χωρικών μεταβλητών (x,y) παίρνει την παρακάτω μορφή:

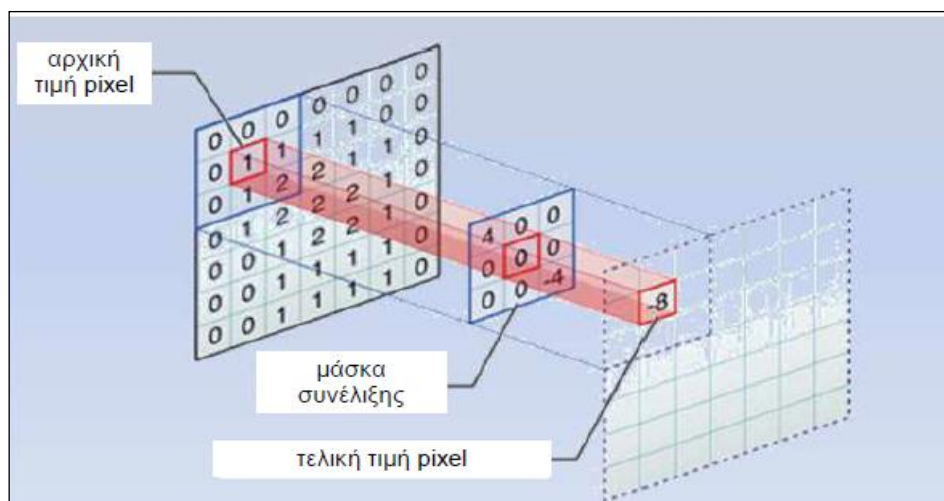
$$\omega(x,y) = \iint \psi(r,s) \varphi(x - r, y - s) dr ds \quad [3.5]$$

Κατά συνέπεια και το άθροισμα μετατρέπεται σε διπλό άθροισμα:

$$\omega(x,y) = \sum \sum \psi(r,s) \varphi(x - r, y - s) \quad [3.6]$$

με όρια για κεντρικό στοιχείο $\psi_{i,j}$:

- για φίλτρο 3×3 από $i-1$ έως $i+1$ και από $j-1$ έως $j+1$,
- για φίλτρο 5×5 από $i-2$ έως $i+2$ και από $j-2$ έως $j+2$,
- για φίλτρο 7×7 από $i-3$ έως $i+3$ και από $j-3$ έως $j+3$.



Σχήμα 3.6 Φίλτρο συνέλιξης: Αρχικό πλέγμα τιμών pixels, Φίλτρο - μάσκα συνέλιξης, Τελικό πλέγμα τιμών pixels.

3.4. Αισθητήρες

Η βασική διαφορά μεταξύ αναλογικής και ψηφιακής ολογραφίας έγκειται στο γεγονός ότι για την τελευταία χρησιμοποιείται ως μέσο εγγραφής ένας αισθητήρας ανίχνευσης φωτός. Οι αισθητήρες στην ουσία μετατρέπουν το προσπίπτον φως σε ηλεκτρικό σήμα και αναλόγως με τον τρόπο της μετατροπής διακρίνονται σε CCD (Charged Coupled Device) ή CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Οι αισθητήρες τεχνολογίας CCD και CMOS αποτελούνται από εκατομμύρια μικρές κυψέλες που ονομάζονται pixels και το πλήθος τους ορίζει την ανάλυση του αισθητήρα και συνεπώς και την ανάλυση της εικόνας. Τα pixels είναι μεγέθους της τάξεως του μικρόμετρου (μm).

3.4.1. Αισθητήρες CCD

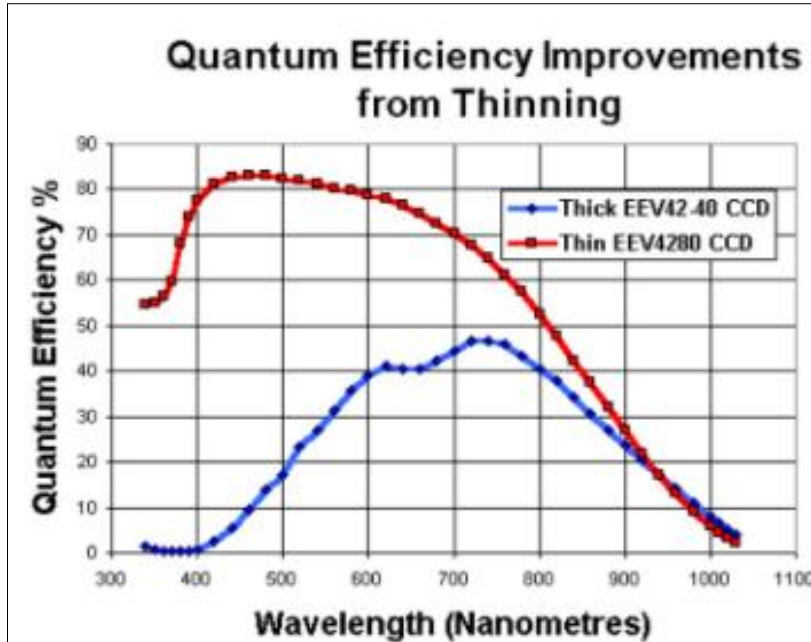
Οι αισθητήρες CCD – Charge Coupled Devices (Συσκευές Συζευγμένου Φορτίου) είναι διατάξεις που μετατρέπουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα. Στη συνέχεια το σήμα μεταφέρεται από τη συσκευή σε μια έξοδο όπου καταγράφεται και τέλος ψηφιοποιείται. Εφευρέθηκαν το 1969 στα Bell Labs της AT&T, από τους Willard Boyle και George Smith.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το δομικό στοιχείο των αισθητήρων CCD είναι οι πυκνωτές MOS (Metal Oxide Semiconductor). Ένας τέτοιος πυκνωτής αποτελείται από μία μεταλλική επιφάνεια, έναν μονωτή διοξειδίου του πυριτίου κι έναν ημιαγωγό τύπου - p. Η μεταλλική επιφάνεια, ή αλλιώς πύλη, λειτουργεί σαν φωτοδίοδος κι αντιστοιχεί σε ένα pixel. Τα φωτόνια που προσπίπτουν πάνω στην επιφάνεια του αισθητήρα, απελευθερώνουν ηλεκτρόνια από το μεταλλικό υλικό. Το φορτίο αυτό πολώνει τον πυκνωτή δημιουργώντας διαφορά δυναμικού (ηλεκτρικό σήμα) κι αποθηκεύει το φορτίο. Το μέγεθος του φορτίου είναι ανάλογο της ποσότητας του φωτός που έχει δεχθεί το συγκεκριμένο pixel του αισθητήρα.

Η κβαντική απόδοση ενός αισθητήρα CCD εκφράζει τον λόγο μεταξύ των απελευθερωμένων ηλεκτρονίων προς τα προσπίπτοντα φωτόνια. Εξαρτάται από το πάχος, τη γωνία πρόσπτωσης και το μήκος κύματος του φωτός. Μεγαλύτερες κβαντικές αποδόσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση λεπτότερων αισθητήρων. Το μειονέκτημα αυτών είναι η ακριβή παραγωγή τους. Αντιθέτως οι αισθητήρες μεγαλύτερου πάχους έχουν χαμηλότερη κβαντική απόδοση λόγω ανακλάσεων κι απορροφήσεων φωτονίων.

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Η απόδοση ενός παχύ ανιχνευτή είναι μηδενική στο μπλε χρώμα (430 - 480 nm), ενώ μεγιστοποιείται λίγο πάνω από το κόκκινο (635 - 760 nm), ενώ η απόδοση ενός λεπτού ανιχνευτή εμφανίζει μέγιστο στην μπλε περιοχή (Διάγραμμα 3.1).

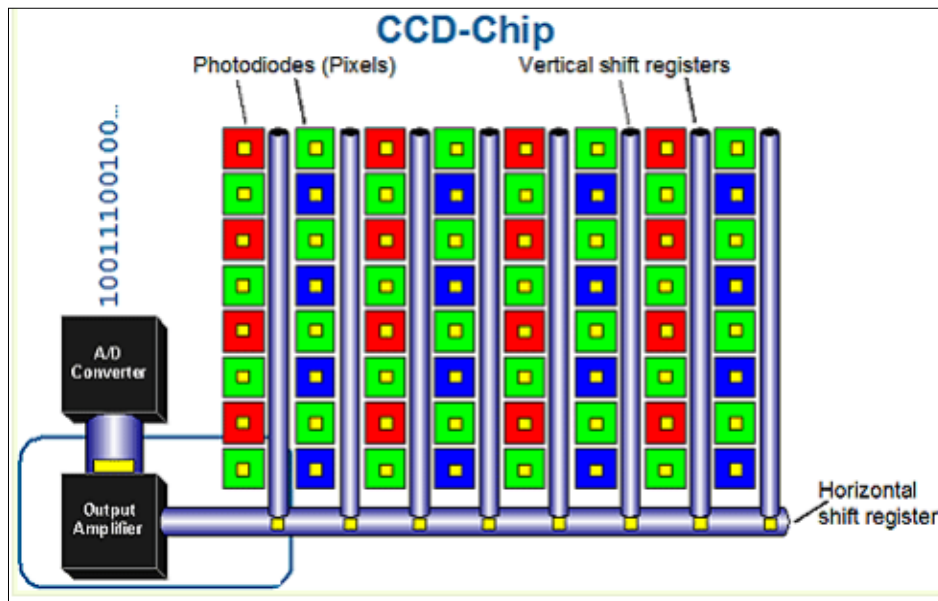


Διάγραμμα 3.6 Κβαντική απόδοση (%) - Μήκος κύματος (nm) για αισθητήρες CCD: EEV4280 λεπτού τύπου (Κόκκινη γραμμή) και EEV42 - 40 παχύ τύπου (Μπλε γραμμή)

http://www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/detectors/phy217_det_performance.html

Ως εδώ περιγράφηκε τρόπος με τον οποίο το φως συλλέγεται και μετατρέπεται σε φορτίο. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια από κάθε pixel μεταφέρονται από κατακόρυφους αγωγούς που ονομάζονται καταχωρητές. Ανάμεσα στις στήλες των pixels υπάρχει ένας κατακόρυφος καταχωρητής. Αφότου συγκεντρωθεί το φορτίο από τα pixels, αυτό ολισθαίνει μέσω ενός κατακόρυφου καταχωρητή και οδηγείται σε οριζόντιο καταχωρητή. Στη συνέχεια το ρεύμα μεταφέρεται σε ενισχυτή και μετατρέπεται σε τάση. Έπειτα οδηγείται σε έναν μετατροπέα A/D (analog to digital) όπου πραγματοποιείται η κωδικοποίηση, και με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το ψηφιακό σήμα, δηλαδή διακριτές τιμές τάσης 0 και 1.

Οι αισθητήρες καταγράφουν την ένταση της ακτινοβολίας κι όχι το χρώμα. Για την αποτύπωση έγχρωμων εικόνων, τοποθετείται πάνω από τον αισθητήρα ένα φίλτρο Bayer. Το φίλτρο Bayer αποτελείται από pixels 50% πράσινου χρώματος, 25% μπλε και 25% κόκκινου. Έτσι κάθε pixel καταγράφει ένα από τα τρία αυτά βασικά χρώματα και όλο το ορατό φάσμα προκύπτει από τη σύνθεση τους. Επειδή το μάτι του ανθρώπου είναι πιο ευαίσθητο στο πράσινο χρώμα, προκύπτουν περισσότερα pixels πράσινου χρώματος (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 Διάταξη CCD: Φωτοδιόδοι, Κάθετοι καταχωρητές, Οριζόντιος καταχωρητής, Ενισχυτής εξόδου, A/D μετατροπέας, ψηφιακό σήμα. Φίλτρο Bayer <http://aivpnathanstrang.blogspot.com/2014/11/lecture-digital-image-processing.html>

3.4.2. Αισθητήρες CMOS

Οι αισθητήρες CMOS, Complimentary Metal Oxide Semiconductors (συμπληρωματικοί ημιαγωγοί μεταλλικού οξειδίου) εφευρέθηκαν το 1967, δύο χρόνια πριν τους αισθητήρες CCD. Οι αισθητήρες αυτής της τεχνολογίας αποτελούνται από εκατομμύρια pixels, όπου η συλλογή του φωτός, η μετατροπή του σε τάση και η κωδικοποίησή του σε ψηφιακό αριθμό πραγματοποιείται στο καθένα από αυτά τα pixel ξεχωριστά. Δηλαδή, η κύρια διαφορά των αισθητήρων CMOS με τους CCD είναι ότι εδώ η ψηφιοποίηση των εικονοστοιχείων πραγματοποιείται εσωτερικά σε μετασχηματιστή που φέρει κάθε pixel. Τα φωτόνια που προσπίπτουν μετατρέπονται σε ηλεκτρόνια και στη συνέχεια σε τάση. Συγκεκριμένα ενώ σε ένα CCD αισθητήρα από τα pixels παράγεται ηλεκτρικό φορτίο το οποίο μέσω εξωτερικού μικροσπίπ μετατρέπεται σε τάση και στη συνέχεια σε ψηφία (bits), σε ένα CMOS αισθητήρα τα pixels παράγουν απευθείας τάση η οποία ψηφιοποιείται αμέσως. Το κόστος είναι χαμηλότερο λόγω του μικρότερου εξοπλισμού, η κατασκευή τους ευκολότερη και το μέγεθος τους είναι αρκετά μικρό με αποτέλεσμα να είναι ευρεία η χρήση τους σε μικρές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, όπως αυτές που είναι ενσωματωμένες στα κινητά τηλέφωνα και στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Οι αισθητήρες CMOS επίσης καταναλώνουν ως και ένα εκατοστό της ισχύος των CCD. Συγκεκριμένα, στους αισθητήρες CCD η ενέργεια που καταναλώνεται φτάνει τις τιμές των 2 - 5 W, ενώ στην περίπτωση των CMOS τα 20 - 50 mW.

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι οι αισθητήρες CMOS είναι πιο ευαίσθητοι στο φως, έτσι σε κακές συνθήκες φωτισμού συμπεριφέρονται πολύ καλύτερα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι ενισχυτές σήματος βρίσκονται στο ίδιο το pixel, οπότε υπάρχει λιγότερη κατανάλωση στην ίδια τροφοδοσία. Όσον αφορά την ταχύτητα, το CMOS είναι σαφώς ανώτερο από το CCD επειδή όλη η επεξεργασία γίνεται μέσα στον ίδιο τον αισθητήρα, προσφέροντας μεγαλύτερη ταχύτητα. Ένα μεγάλο τους μειονέκτημα είναι η εμφάνιση έντονου θορύβου αναλογικά με τον αντίστοιχο των αισθητήρων CCD. Τέλος μια σημαντική διαφορά των δύο αισθητήρων αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

3.5. Εγγραφή Ψηφιακού Ολογράμματος

3.5.1. Βασικές εξισώσεις ψηφιακής ολογραφίας

Η βασική διαδικασία εγγραφής ενός ολογράμματος είναι η εξής: Το κύμα αντικειμένου συμβάλλει με το κύμα αναφοράς και οι κροσσοί συμβολής καταγράφονται στο επίπεδο εγγραφής. Στην ψηφιακή ολογραφία, η εγγραφή εκτελείται χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα όπως αυτοί περιγράφηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Το αντικείμενο φωτίζεται με μονοχρωματικό σύμφωνο κύμα. Το κύμα παραμορφώνεται από το αντικείμενο και διαδίδεται προς το επίπεδο παρατήρησης. Η επιφάνεια του αντικειμένου δημιουργεί ένα κύμα $A(x,y)$:

$$A(x,y) = A_0(x,y)e^{iy_0(x,y)} \quad [3.7]$$

Όπου το πλάτος A_0 περιγράφει την ανακλαστικότητα του αντικειμένου και η φάση y_0 σχετίζεται με την επιφάνεια, το δείκτη διάθλασης και το σχήμα ή το πάχος του αντικειμένου. Λόγω της φυσικής τραχύτητας του αντικειμένου, το y_0 είναι μια τυχαία μεταβλητή κατανομημένη ομοιόμορφα σε διάστημα $[-\pi, +\pi]$. Το μέτωπο της δέσμης αντικειμένου στο επίπεδο καταγραφής στην απόσταση d_0 , και στις χωρικές συντεταγμένες (X, Y) του επιπέδου παρατήρησης εκφράζεται εν αντιστοιχία με την εξίσωση [2.2] ως εξής:

$$U_0(X,Y,d_0) = O(X,Y)e^{i\varphi_0(X,Y)} \quad [3.8]$$

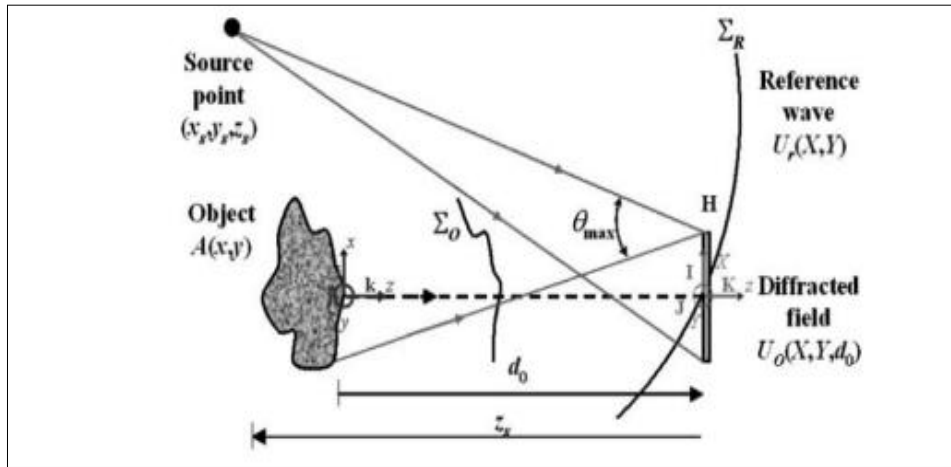
Όπου το $O(X,Y)$ είναι το μέτρο του μιγαδικού πλάτους και φ_0 είναι η οπτική του φάση.

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Το μιγαδικό πλάτος του κύματος αναφοράς στο επίπεδο εγγραφής U_r ,

$$U_r(X, Y, d_0) = R(X, Y)e^{i\varphi_r(X, Y)} \quad [3.9]$$

Το κύμα αναφοράς προέρχεται συνήθως από μια μικρή οπή, έτσι είναι ένα σφαιρικό αποκλίνον κύμα που επηρεάζει το επίπεδο με μη μηδενική γωνία προσβολής. Οι συντεταγμένες του σημείου της πηγής του ολογράμματος είναι: (x_s, y_s, z_s) , όπου $z_s < 0$ (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Γεωμετρία εγγραφής ψηφιακού ολογράμματος: Θέση πηγής, Δέση Αναφοράς, Αντικείμενο, Περιθλασμένο πεδίο - Δέση αντικειμένου.

www.iste.co.uk/pic

Η οπτική φάση του κύματος αναφοράς μπορεί να γραφεί με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\varphi_r(X, Y) = \frac{\pi}{\lambda z_s} ((X - x_s)^2 + (Y - y_s)^2) \quad [3.10]$$

$$\varphi_r(X, Y) = 2\pi(u_0 X + v_0 Y) + \frac{\pi}{\lambda z_s} (X^2 + Y^2) + \varphi_s \quad [3.11]$$

Όπου (u_0, v_0) είναι οι χωρικές συχνότητες του ολογράμματος, και φ_s ένας σταθερός όρος που μπορεί να παραλειφθεί. Όταν το $(u_0, v_0) = (0, 0)$, δηλαδή η πηγή του σημείου αναφοράς είναι στον άξονα z , τότε η ολογραφία λέγεται *in-line*. Όταν όμως $(u_0, v_0) \neq (0, 0)$ τότε η ολογραφία ονομάζεται *off-axis*.

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Ο συνολική ακτινοβολία H , έχει τη μορφή της εξίσωσης [2.4]:

$$H = |U_r + U_0|^2 = |U_r|^2 + |U_0|^2 + U_r^* U_0 + U_r U_0^* \quad [3.12]$$

ή εναλλακτικά:

$$H = O^2 + R^2 + 2OR \cos(\varphi_R - \varphi_0) \quad [3.13]$$

Οι δύο παραπάνω συναρτήσεις εκφράζουν ουσιαστικά το ψηφιακό ολόγραμμα.

3.5.2. Συνθήκη Shannon

Ο ρόλος του αισθητήρα εγγραφής είναι αρκετά σημαντικός. Το ολόγραμμα καταγράφεται σε $N \times M$ εικονοστοιχεία. Ως βήμα εικονοστοιχείου (pixel pitch) p_x και p_y , ορίζεται η απόσταση από το κέντρο ενός pixel μέχρι το κέντρο του επόμενου, και ως ενεργή επιφάνεια Δ_x και Δ_y , η επιφάνεια κάθε εικονοστοιχείου που συμβάλλει στη συλλογή του φωτός. Κατά την εγγραφή ενός ψηφιακού ολογράμματος, το συνεχές οπτικό πεδίο μετατρέπεται σε διακριτό σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Προκειμένου το διακριτό πεδίο να περιλαμβάνει επαρκώς τις πληροφορίες του συνεχούς, θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη Shannon.

Οι χωρικές συντεταγμένες στο επίπεδο εγγραφής παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$(X, Y) = (np_x, mp_y) \quad [3.14]$$

Όπου $n \in (-N/2, +N/2 - 1)$ και $m \in (-M/2, +M/2 - 1)$. Θεωρώντας θ_{max} τη μέγιστη γωνία μεταξύ των δύο συμβαλλόμενων κυμάτων και λαμβάνοντας ως δείγμα τους κροσσούς συμβολής που παράγονται, χρειάζεται το βήμα εικονοστοιχείου να είναι τουλάχιστον ίσο με το διπλάσιο της περιόδου της συμβολής των κροσσών. Αυτός ο περιορισμός ικανοποιείται με την συνθήκη Shannon και η μέγιστη αποδεκτή γωνία παίρνει τιμές σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\theta_{max} < 2 \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{4 \max(p_x, p_y)} \right) \quad [3.15]$$

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Το ψηφιακό ολόγραμμα που καταγράφεται από τον αισθητήρα δεν περιγράφεται πλήρως από την εξίσωση [3.12]. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η ενεργή επιφάνεια των pixels. Έτσι το καταγεγραμμένο ολόγραμμα στο σημείο (np_x, mp_y) του αισθητήρα παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$U_{PIX}(np_x, mp_y) = [H(X, Y) * P_{\Delta_x, \Delta_y}(X, Y)](np_x, mp_y) \quad [3.16]$$

$$\text{όπου} \quad P_{\Delta_x, \Delta_y}(X, Y) = \begin{cases} 1/\Delta_x * 1/\Delta_y & \text{αν } |x| < \frac{\Delta_x}{2} \text{ και } |y| < \frac{\Delta_y}{2} \\ 0 & \text{αν όχι} \end{cases}$$

Από τον ορισμό του $P_{\Delta_x, \Delta_y}(X, Y)$ προκύπτει ότι η ενεργή περιοχή κάθε εικονοστοιχείου επιβάλλει χωρικούς περιορισμούς στην εγγραφή των κροσσών με συχνή συνέπεια τη θόλωση του ολογράμματος.

3.5.3. Χρόνος έκθεσης

Κατά την εγγραφή του ολογράμματος, το εικονοστοιχείο συλλέγει φως για μια ορισμένη χρονική διάρκεια, που ονομάζεται χρόνος έκθεσης T . Η συνολική ενέργεια που λαμβάνεται από τον αισθητήρα είναι:

$$W = \int_{T_1}^{T_1+T} H(t) dt \quad [3.17]$$

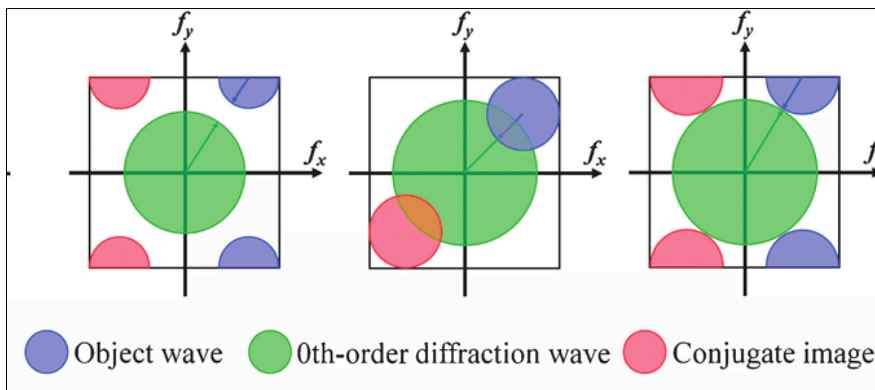
Όταν το ολόγραμμα δεν έχει χρονική εξάρτηση, η ολοκλήρωση του χρόνου μπορεί να παραλειφθεί. Ωστόσο, στην περίπτωση που το αντικείμενο εμφανίζει εξάρτηση από το χρόνο, όπως μια ημιτονοειδή ταλάντωση, ο χρόνος έκθεσης επηρεάζει σημαντικά το καταγεγραμμένο ολόγραμμα. Η χαρακτηριστική παράμετρος της εγγραφής είναι η κυκλική συχνότητα που ορίζεται $a = T/T_0$, όπου T ο χρόνος έκθεσης και T_0 η περίοδος της ταλάντωσης. Όταν η κυκλική συχνότητα $a \ll 1$, η διαδικασία εγγραφής χρησιμοποιεί παλμικές εκπομπές και ισοδυναμεί με «πάγωμα» του αντικειμένου τη στιγμή κατά την οποία πραγματοποιείται η εγγραφή και ονομάζεται «παλμική εγγραφή» (impulse regime). Όταν, αντίθετα, έχουμε $a \gg 1$, η διαδικασία λέγεται «εγγραφή μέσου χρόνου» (time-averaging). Όταν $0 \ll a < 1$, η κυκλική συχνότητα είναι πολύ υψηλή για να χαρακτηριστεί ως παλμική και πολύ χαμηλή για να θεωρηθεί μέσου χρόνου. Αυτή η ενδιάμεση διαδικασία ονομάζεται «εγγραφή ψευδούς μέσου χρόνου» (quasi-time-averaging).

3.5.4. Αποδιαμόρφωση Ψηφιακού Ολογράμματος

Ένα ολόγραμμα λειτουργεί σαν φράγμα περίθλασης και περιλαμβάνει εγγεγραμμένους τρεις όρους: τον μηδενικό (0), το πραγματικό είδωλο (-1) (real image) και το εικονικό είδωλο (+1) (virtual image). Με τον όρο αποδιαμόρφωση (demodulation) ψηφιακού ολογράμματος περιγράφεται η διαδικασία ανάκτησης του θετικού όρου περίθλασης που περιλαμβάνει το σύνολο των απαραίτητων πληροφοριών για το αντικείμενο της ολογραφίας. Όπως αναφέρθηκε οι εξισώσεις που περιγράφουν το ολόγραμμα είναι οι [3.12] και [3.13]. Ο όρος που χρειάζεται να ανακτηθεί μετά την εγγραφή του ψηφιακού ολογράμματος είναι ο $U_1^*U_0$ που εκφράζει τον +1 περιθλαστικό όρο. Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους πετυχαίνεται η ανάκτηση. Ο πρώτος, γνωστός από την αναλογική ολογραφία, είναι η ολογραφία εκτός άξονα (off - axis), ο δεύτερος είναι η τεχνική της μεταβολής φάσης (phase - shifting).

Η διάταξη της ολογραφίας εκτός άξονα χρησιμοποιεί μια μικρή γωνιακή απόκλιση μεταξύ δέσμης αντικειμένου και δέσμης αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό, σε πρακτικό επίπεδο, οι όροι της περίθλασης διαχωρίζονται και στην βέλτιστη περίπτωση δεν έχουν καμία επικάλυψη (Σχήμα 3.9). Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει την εφαρμογή φίλτρων στο επίπεδο των συχνοτήτων (επίπεδο Fourier) έτσι ώστε να απομονωθεί και να ανακτηθεί οποιαδήποτε τάξη περίθλασης. Μεταφέροντας την εξίσωση [3.12] στο πεδίο των συχνοτήτων (Fourier transform):

$$FT[H](u, v) = C_0(u, v) + C_1(u - u_0, v - v_0) + C_1^*(u - u_0, v - v_0) \quad [3.18]$$



Σχήμα 3.9 Όροι περίθλασης στο επίπεδο των συχνοτήτων. **Πραγματικό Είδωλο (Μπλε), Μηδενικός Όρος (Πράσινο), Εικονικό (Συζυγές) Είδωλο (Ροζ).** (a) Ευρύς διαχωρισμός όρων, (b) Επικάλυψη όρων, (c) Οριακός διαχωρισμός όρων

https://www.researchgate.net/figure/Spatial-frequency-distributions-of-a-recorded-hologram-in-the-cases-where-a-b-no_fig1_258748450

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Ο όρος C_0 αναφέρεται στον μηδενικό όρο περίθλασης κι αντίστοιχα οι C_l και C_l^* στο εικονικό και πραγματικό είδωλο. Εφαρμόζοντας ένα φίλτρο διαστάσεων Δu και Δv πετυχαίνεται η απομόνωση του όρου C_1 κι αυτός εκφράζεται ως:

$$O_{+1} = FT^{-1}[C_1] = R[O(x,y)e^{i\varphi_0(x,y)}e^{2i\pi(u_0x+v_0y)}] * h(x,y) \quad [3.19]$$

Όπου το σύμβολο (*) σηματοδοτεί τη συνέλιξη. Η συνάρτηση $h(x,y)$ περιγράφει την απόκριση του φίλτρου που εφαρμόζεται για την ανάκτηση του όρου στο πεδίο συχνοτήτων. Ο όρος της φάσης $e^{2i\pi(u_0x+v_0y)}$ δεν είναι απαραίτητος και γι' αυτό απαλείφεται πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση με $e^{-2i\pi(u_0x+v_0y)}$. Το τελικό αποτέλεσμα είναι πως η φάση και το πλάτος του +1 όρου υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\varphi_0(x,y) = \arctan \left[\frac{Im(O_{+1})}{Re(O_{+1})} \right] \quad [3.20]$$

$$O(x,y) = \sqrt{Im^2(O_{+1}) + Re^2(O_{+1})} \quad [3.21]$$

Η μεταβολή φάσης (phase shifting) λειτουργεί αρκετά διαφορετικά από την ολογραφία εκτός άξονα. Αν παρατηρήσουμε την εξίσωση [3.13] μπορούμε να διακρίνουμε τρεις άγνωστους όρους: $O^2 + R^2$, $2OR$ και $\varphi_R - \varphi_0$. Συνεπώς τρεις διαφορετικές τιμές του H δίνουν τη δυνατότητα επίλυσης ενός συστήματος 3x3. Πρακτικά αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την φάση στο όρισμα του συνημιτόνου.

Ένα πιεζοηλεκτρικό σύστημα εφαρμόζεται επάνω σε καθρέφτη. Με κάθε μικρή φόρτιση του συστήματος, η γωνία του καθρέφτη μεταβάλλεται με συνέπεια τη μεταβολή της διαδρομής της δέσμης αναφοράς, άρα και της φάσης του ολογράμματος. Τρεις μεταβολές είναι αρκετές για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων. Η εξίσωση ενός ολογράμματος μεταβολής φάσης (phase shifted hologram) για μεταβολή κατά ακέραιο κλάσμα του 2π είναι:

$$H_p = O^2 + R^2 + 2OR \cos \left(\varphi_R - \varphi_0 + \frac{2(p-1)\pi}{P} \right) \quad [3.22]$$

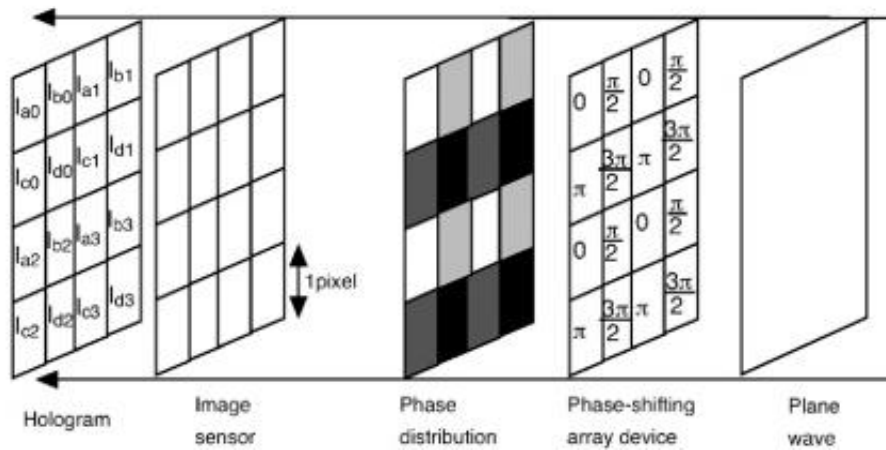
Όπου $p = 1, 2, \dots, P$. Για $P \geq 3$ η φάση και το πλάτος του +1 όρου περίθλασης υπολογίζεται ως εξής:

$$\varphi_0(x,y) = \varphi_R + \arctan \left\{ \frac{\sum_1^P H_p \sin \left(\frac{2(p-1)\pi}{P} \right)}{\sum_1^P H_p \cos \left(\frac{2(p-1)\pi}{P} \right)} \right\} \quad [3.23]$$

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

$$O(x, y) = \frac{1}{2R} \sqrt{\left[\sum_1^P H_p \sin\left(\frac{2(p-1)\pi}{P}\right) \right]^2 + \left[\sum_1^P H_p \cos\left(\frac{2(p-1)\pi}{P}\right) \right]^2} \quad [3.24]$$

Όπως είναι εμφανές, η τεχνική της μεταβολής φάσης απαιτεί πολλαπλή εγγραφή. Αυτό σημαίνει πως η παρούσα μέθοδος αποκλείεται από την ολογραφία φαινομένων που θεωρούνται στιγμιαία ή διαρκούν ελάχιστο χρόνο. Η λύση εδώ δίνεται με την παράλληλη μεταβολή φάσης (parallel phase shifting). Σε αυτή την εκδοχή τέσσερα ολογράμματα διαφορετικής φάσης εγγράφονται ταυτόχρονα στην επιφάνεια του αισθητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση συσκευής μεταβολής φάσης. Η συσκευή είναι στην πραγματικότητα ένας πίνακας μιας επαναλαμβανόμενης γυάλινης 2x2 διάταξης, που μεταβάλλει τη φάση της δέσμης αναφοράς ανάλογα με το πάχος του υλικού και εγγράφει ταυτόχρονα τέσσερα ολογράμματα διαφορετικών φάσεων (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10 Ολόγραμμα παράλληλης μεταβολής φάσης: (Από δεξιά) Επίπεδο Κύμα, Συσκευή Μεταβολής Φάσης, Κατανομή Φάσης, Αισθητήρας, Ολόγραμμα
<https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-45-13-2995>

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως κάθε στοιχείο της 2x2 διάταξης, απαιτείται να αναλογεί στο μέγεθος ενός pixel του αισθητήρα. Στη συνέχεια τα pixel κοινής φάσης διαχωρίζονται κι αποτυπώνονται σαν τέσσερα νέα ολογράμματα (Σχήμα 3.11). Με τον τρόπο αυτό το πλάτος και η φάση του θετικού όρου περίθλασης υπολογίζονται από τις εξισώσεις [3.23] και [3.24] για $P = 4$.

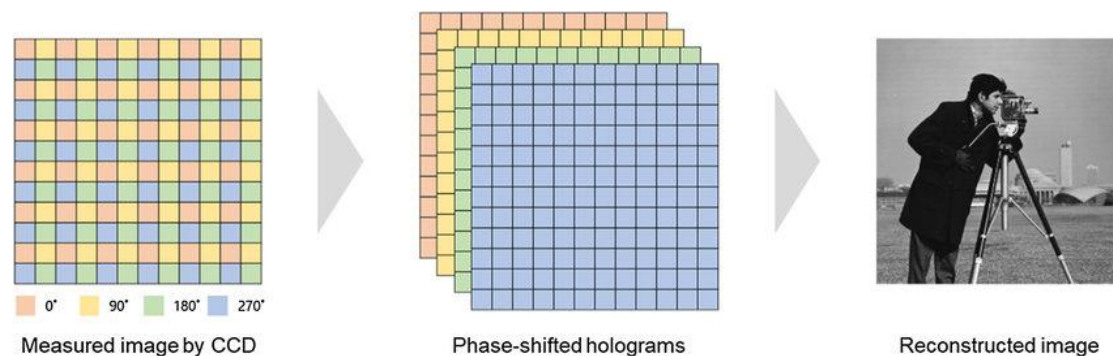
Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Η τελευταία τεχνική ολογράμματος μεταβολής φάσης είναι η ετερόδυνη ψηφιακή ολογραφία (heterodyne digital holography). Η συγκεκριμένη μέθοδος μεταβάλλει τη φάση της δέσμης αναφοράς συνεχόμενα και όχι διακριτά όπως στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις. Συνήθως η μεταβολή είναι γραμμική ως προς τον χρόνο και γι' αυτό αναφέρεται και ως συχνοτική μεταβολή (frequency shift). Με τον τρόπο αυτό το ολόγραμμα που εμφανίζεται στο επίπεδο του αισθητήρα είναι προϊόν συμβολής μεταξύ της δέσμης αντικειμένου και της μεταβαλλόμενης δέσμης αναφοράς κατά δf και περιγράφεται ως:

$$H = |U_R e^{2i\pi\delta f t} + U_o|^2 = |U_R|^2 + |U_o|^2 + U_R^* U_o e^{-2i\pi\delta f t} + U_o^* U_R e^{2i\pi\delta f t} \quad [3.25]$$

Το σύνολο των P ολογραμμάτων (H_p) εγγράφονται σε χρόνο $t_p = \frac{2(p-1)\pi}{\delta f}$ και ο αλγόριθμος αποδιαμόρφωσης είναι:

$$U_o = \frac{1}{P} \frac{1}{U_R^*} \sum_1^P H_p e^{\frac{2i\pi(p-1)}{P}} \quad [3.26]$$



Σχήμα 3.11 Ολόγραμμα παράλληλης μεταβολής φάσης: Καταγραφή Εικόνας από τον Αισθητήρα, Διαχωρισμένα Ολογράμματα Μεταβολής Φάσης, Ανασκευασμένη Εικόνα

https://www.researchgate.net/figure/Parallel-phase-shift-digital-holography_fig1_330071799

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Παραπάνω παρουσιάστηκαν οι βασικές μέθοδοι αποδιαμόρφωσης ενός ψηφιακού ολογράμματος καθώς και οι αλγόριθμοι που αντιστοιχούν σε καθεμία. Βασικό πλεονέκτημα της ολογραφίας εκτός άξονα είναι η ανάκτηση της δέσμης αντικειμένου με μία και μόνο ολογράφηση. Η μέθοδος λειτουργεί χωρίς μετάβαση φάσης, μετακίνηση κατόπτρων ή συχνοτική μετάβαση και οι επιδράσεις των ταλαντώσεων ή δονήσεων του συστήματος θεωρούνται αμελητέες. Παρ' όλα αυτά η γωνία που χρησιμοποιείται χρειάζεται να είναι ακριβής και αποτελεσματική σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Στην περίπτωση της μεθόδου μετάβασης φάσης το ολόγραμμα που προκύπτει έχει ελάχιστο θόρυβο, όμως η διαδικασία αποδιαμόρφωσης απαιτεί κάποιου είδους πολλαπλότητα, είτε αυτή προκύπτει στην ολογράφηση του αντικειμένου (phase shifting), είτε στους υπολογισμούς μετά την ολογράφηση (parallel phase shifting – heterodyning).

3.6. Ανασκευή Ψηφιακού Ολογράμματος (Reconstruction)

3.6.1. Διάδοση οπτικού πεδίου

Όπως είναι φανερό η ψηφιακή ολογραφία μετά το στάδιο της εγγραφής βασίζεται στη επεξεργασία των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Για το λόγο αυτό οι διαδικασίες που ακολουθούν την εγγραφή του ολογράμματος (recording) εκφράζονται με τη μορφή αλγορίθμων και όχι διατάξεων. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι βασικές αλγοριθμικές μέθοδοι για τη διάδοση ενός οπτικού πεδίου και στη συνέχεια για την αριθμητική ανασκευή (numerical reconstruction) ενός εγγεγραμμένου ψηφιακού ολογράμματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η ανασκευή ενός ολογράμματος είναι η περίθλαση του φωτός. Έστω ένα σημείο $P(x,y,z)$ σε σύστημα συντεταγμένων $Oxyz$. Η απόσταση OP ισούται με $r = |OP| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Επίσης $k = 2\pi/\lambda$, είναι ο κυματάρηθος και λ είναι το μήκος κύματος του φωτός. Το οπτικό πεδίο για σημείο P γράφεται ως:

$$U(p, t) = U(p)e^{(-2i\pi vt)} \quad [3.27]$$

Όπου το $U(p)$ είναι το μιγαδικό πλάτος στο σημείο παρατήρησης $P(x, y, z)$ και το v είναι η συχνότητα του φωτός.

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Εάν η σημειακή πηγή ενός σφαιρικού κύματος βρίσκεται στην αρχή ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, το πεδίο εκφράζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις [1.20β]:

$$U(x, y, z) = \begin{cases} \frac{A_0}{r} e^{ikr} & \text{για αποκλίνων κύμα} \\ \frac{A_0}{r} e^{(-ikr)} & \text{για συγκλίνων κύμα} \end{cases} \quad [3.28]$$

Όταν το κέντρο του σφαιρικού κύματος είναι στο σημείο (x_c, y_c, z_c) , το r αντικαθίσταται από: $r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2}$

Για ένα επίπεδο κύμα που διαδίδεται σε ένα ομοιογενές μέσο, το μέτωπο του κύματος είναι κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσης. Το επίπεδο κύμα γράφεται ως εξής:

$$U(x, y, z) = A_0 e^{ik(x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma)} \quad [3.29]$$

Για κάθε πραγματικό αριθμό $C = x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma$, περιγράφεται ένα επίπεδο φάσης προς την κατεύθυνση που δίνουν τα συνημίτονα α , β και γ . Διαφορετικές τιμές του C αντιστοιχούν σε διαφορετικά παράλληλα επίπεδα και η εξίσωση [3.29] αντιπροσωπεύει ένα κύμα που διαδίδεται προς την κατεύθυνση αυτών των επιπέδων. Όταν η σημειακή πηγή τείνει στο άπειρο, το σφαιρικό κύμα τείνει σε ένα επίπεδο κύμα. Σε αυτήν την περίπτωση, οι ακτίνες γίνονται παράλληλες και η δέσμη διαδίδεται χωρίς καμία παραμόρφωση.

Η κυματομορφή του φωτός περιγράφεται από την κλασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, από τις εξισώσεις του Maxwell. Στην περίπτωση ενός ομοιογενούς μέσου, οι εξισώσεις του Maxwell συμπυκνώνονται σε αυτήν την εξίσωση διάδοσης:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad [3.30]$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση [3.27] στην εξίσωση [3.30] προκύπτει μια εξίσωση ανεξάρτητη του χρόνου, γνωστή ως εξίσωση Helmholtz:

$$(\nabla^2 + k^2)U(P) = 0 \quad [3.31]$$

Έστω z η απόσταση μεταξύ του αρχικού επιπέδου και του επιπέδου παρατήρησης, και $U(x, y, 0)$ και $U(x, y, z)$ οι μιγαδικές μορφές του κύματος στα δύο επίπεδα. Στο πεδίο των συχνοτήτων, οι φασματικές συναρτήσεις του κύματος ορίζονται ως $G_0(u, v)$ και $G_z(u, v)$ όπου u, v οι χωρικές συχνότητες, σύμφωνα με τον μετασχηματισμό:

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

$$G_w(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, w) e^{-2i\pi(ux+vy)} dx dy, \quad \text{όπου } w = 0, z \quad [3.32]$$

Από μετασχηματισμό Fourier προκύπτει η σχέση του κύματος στα δύο επίπεδα:

$$G_z(u, v) = G_0(u, v) e^{\frac{2i\pi}{\lambda} z \sqrt{1-(\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}} \quad [3.33]$$

Το μιγαδικό πεδίο σε απόσταση z εκφράζεται:

$$U(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_z(u, v) e^{2i\pi(ux+vy)} du dv \quad [3.34]$$

Έτσι, προκύπτει μια σχέση μεταξύ του φάσματος του κύματος στο αρχικό επίπεδο και αυτού που λαμβάνεται στο επίπεδο παρατήρησης [3.33]. Αυτή η σχέση δείχνει ότι η φασματική διακύμανση του μιγαδικού πλάτους που προκαλείται από τη διάδοση του φωτός στην απόσταση z , αντιπροσωπεύεται από τον πολλαπλασιασμό του με έναν παράγοντα καθυστέρησης φάσης:

$$G(u, v) = e^{\left(\frac{2i\pi}{\lambda} z \sqrt{1-(\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}\right)} \quad [3.35]$$

Ο συντελεστής καθυστέρησης φάσης μπορεί να ερμηνευθεί ως συνάρτηση μεταφοράς στο χώρο συχνοτήτων και η εξίσωση [3.35] ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς γωνιακού φάσματος.

Από τη σχέση [3.33], προκύπτει πως οι συχνότητες του επιπέδου παρατήρησης πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση: $1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2 > 0$, δηλαδή $u^2 + v^2 < 1/\lambda^2$. Οπότε η διάδοση στον ελεύθερο χώρο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ιδανικό φίλτρο χαμηλής διέλευσης ακτίνας $1/\lambda$ στο χώρο συχνοτήτων. Με την προϋπόθεση υπολογισμού του φάσματος της $U(x, y, 0)$, μπορεί να υπολογιστεί το φάσμα στο επίπεδο παρατήρησης από τη σχέση [3.33]. Χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Fourier και αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier ο αλγόριθμος υπολογισμού περίθλασης περιγράφεται ως:

$$U(x, y, z) = FT^{-1}[FT\{U(x, y, 0)\} e^{\frac{2i\pi}{\lambda} z \sqrt{1-(\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}}] \quad [3.36]$$

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Στην πράξη, για το φαινόμενο της περίθλασης, συνηθέστερα χρησιμοποιείται η προσέγγιση του Fresnel. Εάν η απόσταση d_0 είναι η απόσταση περίθλασης, η σχέση [3.35] μετατρέπεται σε:

$$G(u, v) \cong e^{ikd_0} e^{-i\pi\lambda d_0(u^2+v^2)} \quad [3.37]$$

και με τη μορφή συνέλιξης, η σχέση [3.36] σε:

$$U(x, y, d_0) = U(x, y, 0) * FT^{-1}\{G(u, v)\} \quad [3.38]$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση [3.37] στη σχέση [3.38] προκύπτει:

$$U(x, y, d_0) = U(x, y, 0) * \frac{e^{ikd_0}}{i\lambda d_0} e^{\frac{i\pi}{\lambda d_0}(x^2+y^2)} \quad [3.39]$$

Η σχέση [3.39] γράφεται ως εξής:

$$U(x, y, d_0) = \frac{e^{ikd_0}}{\lambda d_0} \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(X, Y, 0) e^{\frac{i\pi}{\lambda d_0}[(x-X)^2+(y-Y)^2]} dXdY \quad [3.40]$$

Η σχέση [3.40] αποτελεί το ολοκλήρωμα περίθλασης Fresnel. Η ανάπτυξη των τετραγωνικών όρων στο εκθετικό οδηγούν:

$$U(x, y, d_0) = \frac{e^{ikd_0}}{\lambda d_0} e^{\frac{i\pi}{\lambda d_0}(x^2+y^2)} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(X, Y, 0) e^{\frac{i\pi}{\lambda d_0}(X^2+Y^2)} e^{-2i\pi(\frac{x}{\lambda d_0}X + \frac{y}{\lambda d_0}Y)} dXdY \quad [3.41]$$

Αν εξαιρεθούν οι πολλαπλασιαστικοί παράγοντες φάσης και πλάτους που είναι ανεξάρτητοι από το X και Y , υπολογίζεται η συνάρτηση $U(x, y, d_0)$ με μετασχηματισμό Fourier. Αυτός ο μετασχηματισμός εκτιμάται στις συχνότητες $(u, v) = (x/\lambda d_0, y/\lambda d_0)$ για τη διασφάλιση της σωστής χωρικής κλίμακας στο επίπεδο παρατήρησης. Ορίζοντας τη συνάρτηση μεταφοράς Fresnel ως:

$$G_F(u, v) = e^{\frac{2i\pi z}{\lambda}} e^{-i\lambda z(u^2+v^2)} \quad [3.42]$$

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

ο αλγόριθμος Fresnel εκφράζεται ως:

$$U(x, y, z) = FT^{-1}[FT\{U(x, y, 0)\}G_F(u, v)] \quad [3.43]$$

Η εξίσωση [3.43] είναι ανάλογη με την εξίσωση [3.36], και η διαφορά έγκειται στις διαφορετικές συναρτήσεις μεταφοράς των δύο τύπων.

3.6.2. Αριθμητική ανασκευή

Εφόσον περιγράφηκε ο αλγόριθμος υπολογισμού της διάδοσης ενός οπτικού πεδίου, το τελευταίο στάδιο της ψηφιακής ολογραφίας είναι η αριθμητική ανασκευή. Δύο είναι οι μέθοδοι που ακολουθούνται για την ανασκευή ψηφιακών ολογραμμάτων και βασίζονται στις εξισώσεις διάδοσης του κύματος αντικειμένου (object wave propagation equations) και πιο συγκεκριμένα στο ολοκλήρωμα περίθλασης Fresnel (Fresnel's diffraction integral) [3.40].

Η μία μέθοδος ονομάζεται *διακριτή μετατροπή Fresnel* (Discrete Fresnel Transform - DFT) και η άλλη *ανασκευή μέσω συνέλιξης* (Reconstruction with Convolution).

3.6.2.1. Διακριτή Μετατροπή Fresnel (Discrete Fresnel Transform – DFT)

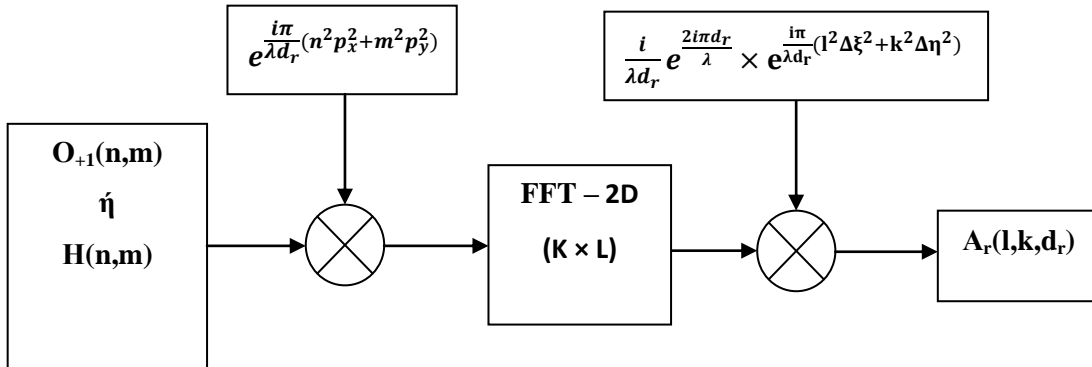
Η αριθμητική ανασκευή ενός ψηφιακού ολογράμματος με τη διακριτή μετατροπή Fresnel βασίζεται στη διακριτή μορφή του ολοκληρώματος περίθλασης Fresnel. Ο αλγόριθμος υπολογισμού εκφράζεται ως εξής:

$$A_r(x, y, d_r) = -\frac{i}{\lambda d_r} e^{\frac{2i\pi d_r}{\lambda}} e^{\frac{i\pi}{\lambda d_r}(x^2+y^2)} \left[\sum_{l=-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} O_{+1}(lp_x, kp_y) e^{\frac{i\pi}{\lambda d_r}(l^2 p_x^2 + k^2 p_y^2)} e^{-\frac{2\pi i}{\lambda d_r}(lp_x x + kp_y y)} \right] \quad [3.44]$$

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Στην παραπάνω εξίσωση η απόσταση d_r μετράται από το επίπεδο εγγραφής. Η εξίσωση O_{+l} εκφράζει το κύμα αντικειμένου, όπως αυτό ανακτήθηκε κατά τη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης (demodulation). Τα μεγέθη p_x και p_y εκφράζουν το βήμα εικονοστοιχείου του αισθητήρα και τα μεγέθη $(l, k) \in (-\frac{L}{2} : \frac{L}{2} + 1, -\frac{K}{2} : \frac{K}{2} + 1)$ εκφράζουν τις διαστάσεις της χωρικής κατανομής στο επίπεδο του ανασκευασμένου πεδίου.

Η χωρική κατανομή του ανασκευασμένου πεδίου χρησιμοποιεί $(K, L) \geq (M, N)$ pixels. Το βήμα εικονοστοιχείου στο επίπεδο της ανασκευασμένης εικόνας είναι $\Delta\eta = \frac{\lambda d_r}{L p_x}$, $\Delta\xi = \frac{\lambda d_r}{K p_y}$, επομένως και οι χωρικές συντεταγμένες εκφράζονται ως $x = l\Delta\eta, y = k\Delta\xi$. Ο αλγόριθμος που μόλις περιγράφηκε, αποκαλείται Single Fast Fourier Transform (S - FFT) (Διάγραμμα 3.2).



Διάγραμμα 3.2 Ροή για τον αλγόριθμο S - FFT

Το όρισμα της φάσης που πολλαπλασιάζεται με το ολόγραμμα H (ή το αποδιαμορφωμένο ολόγραμμα O_{+l}) υπόκειται στην συνθήκη Shannon. Με τον τρόπο αυτό ορίζεται ένα ελάχιστο όριο για την απόσταση ανασκευής ως εξής:

$$d_r^{min} \geq \max\left(\frac{N p_x^2}{\lambda}, \frac{M p_y^2}{\lambda}\right) \quad [3.45]$$

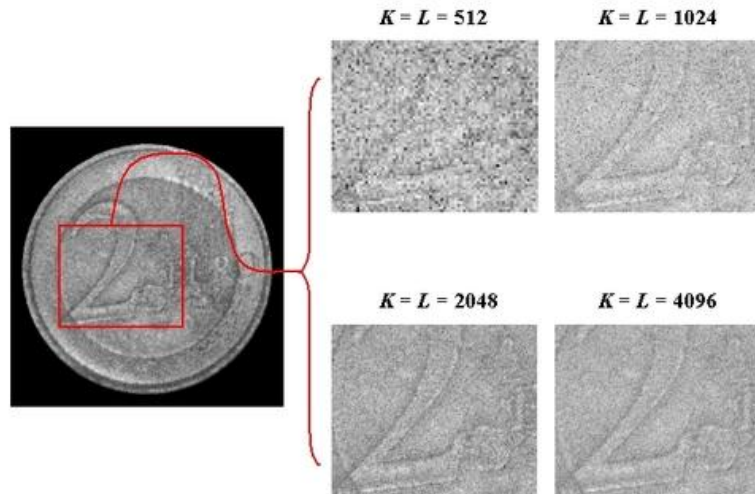
Υπάρχουν ορισμένα μεγέθη που προσδιορίζουν το ανασκευασμένο ολόγραμμα. Το πρώτο από αυτά ονομάζεται ενδογενής χωρική ανάλυση (intrinsic spatial resolution). Η χρήση της μετατροπής Fourier στον αλγόριθμο ανασκευής περιορίζει την ανάλυση της εικόνας στο επίπεδο ανασκευής. Οι ενδογενείς διαστάσεις της ανάλυσης δίδονται από τους τύπους

$$\rho_x = \frac{\lambda d_r}{N p_x}, \rho_y = \frac{\lambda d_r}{M p_y}$$

Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ολογραφία

Επιπροσθέτως η εικόνα που ανασκευάζεται διαθέτει ένα βάθος εστίασης (depth of focus). Η βέλτιστη εστίαση επιτυγχάνεται όταν η ανάλυση της εικόνας φτάσει την βέλτιστη θεωρητική τιμή της. Αν θεωρήσουμε ως d_i τη βέλτιστη απόσταση ανασκευής και την απόκλιση $\Delta z = |d_r - d_i|$, τότε το βάθος εστίασης εκατέρωθεν της βέλτιστης τιμής δίνεται ως εξής: $2\Delta z \cong \frac{2\lambda d_i^2}{N^2 p_x^2}$. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της αριθμητικής διαδικασίας είναι ο αριθμός των pixels και το βήμα εικονοστοιχείου που χρησιμοποιείται κατά την εγγραφή και μετατρέπεται κατά την ανασκευή. Κατά την εγγραφή χρησιμοποιούνται (N, M) pixels με βήμα p_x, p_y . Κατά την ανασκευή αντίστοιχα (K, L) pixels και βήμα $\Delta\eta, \Delta\xi$. Αν ισχύει $(N, M) = (K, L)$ τότε η ανασκευασμένη εικόνα χρησιμοποιεί ακριβώς ίσα εικονοστοιχεία με αυτά του εγγεγραμμένου ολογράμματος.

Στην περίπτωση όμως που $(N, M) < (K, L)$ προστίθενται στις μήτρες των pixels $(K - N, L - M)$ μηδενικά στοιχεία, που δεν φέρουν πληροφορίες σχετικές με την εικόνα. Ωστόσο με την πρόσθεση αυτή επηρεάζεται το βήμα των στοιχείων της εικόνας ανασκευής $\Delta\eta, \Delta\xi$ και μπορεί να γραφεί ότι $\rho_x > \Delta\eta$ και $\rho_y > \Delta\xi$. Οι ανισότητες αυτές εκφράζουν την ανεξαρτησία της ενδογενούς ανάλυσης από τις διαστάσεις των pixels σε εγγραφή και ανασκευή. Συγχρόνως, εφόσον διαπιστώνεται μείωση του βήματος εικονοστοιχείων, αυτό αναγκαία οδηγεί σε αύξηση της ανάλυσης της εικόνας. Η ανίσωση $(K, L) \geq (N, M)$ ονομάζεται *μηδενική επένδυση* (zero - padding effect) και στην πραγματικότητα βελτιώνει την απεικόνιση του ολογράμματος χωρίς να επηρεάζει τις διαστάσεις των αντικειμένων που ολογραφήθηκαν (Σχήμα 3.12).

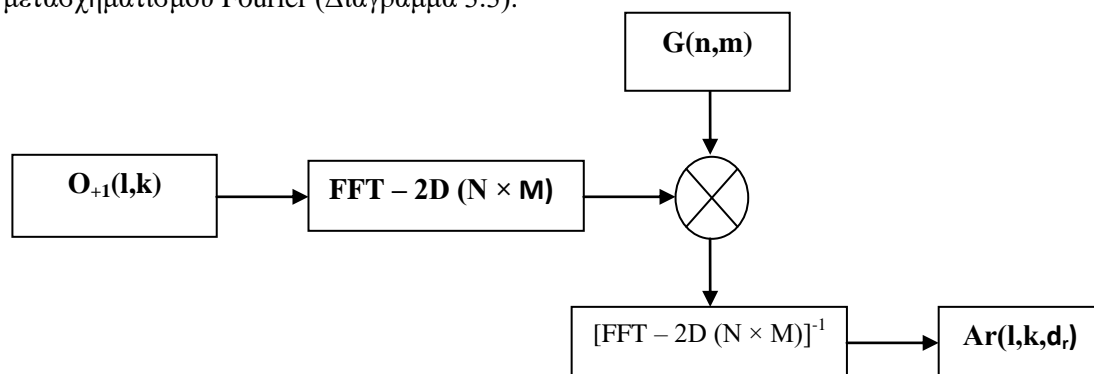


Σχήμα 3.12 Μηδενική Επένδυση (Zero - Padding Effect) στην ανασκευασμένη εικόνα νομίσιματος εγγεγραμμένου από αισθητήρα 1024 x 1360 pixels και $p_x = p_y = 4,65\mu m$. (a) $(K, L) < (M, N)$, (b) $(K, L) = (M, N)$, (c) $(K, L) > (M, N)$, (d) $(K, L) > (M, N)$

http://www.optique-ingenieur.fr/en/courses/OPI_ang_M02_C10/co/Contenu_09.html

3.6.2.2. Συνέλιξη (Convolution)

Η ανασκευή ενός ολογράμματος με τη μέθοδο της συνέλιξης βασίζεται επίσης στην εξίσωση [3.45]. Στη συγκεκριμένη μέθοδο δε λαμβάνεται υπόψη μονάχα η χωρική κατανομή του αισθητήρα αλλά κι αυτή της συνάρτησης μεταφοράς γωνιακού φάσματος $G(u, v)$ [3.35]. Στο πεδίο των συχνοτήτων η κατανομή της συνάρτησης μεταφοράς εκφράζεται ως: $(u, v) = (n \delta u, m \delta v)$, όπου $(n, m) \in \left(-\frac{N}{2} : \frac{N}{2} - 1, -\frac{M}{2} : \frac{M}{2} - 1\right)$ και $(\delta u, \delta v) = \left(\frac{1}{Np_x}, \frac{1}{Mp_y}\right)$. Για απόσταση ανασκευής d_r και είσοδο το O_{+1} ο αλγόριθμος ανασκευής που ακολουθείται ονομάζεται *Double Fast Fourier Transform (D - FFT)* λόγω της διπλής χρήσης του μετασχηματισμού Fourier (Διάγραμμα 3.3).



Διάγραμμα 3.3 Ροή για τον αλγόριθμο D - FFT

Πρέπει να αναφερθεί πως η κατανομή της συνάρτησης μεταφοράς γωνιακού φάσματος χρειάζεται να ικανοποιεί τη συνθήκη του Shannon. Το αποτέλεσμα είναι ο φραγμός της απόστασης ανασκευής ως εξής:

$$d_r^{max} \leq \min \left(\frac{Lp_x^2}{\lambda}, \frac{Kp_y^2}{\lambda} \right) \quad [3.46]$$

Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ένα άνω όριο ως προς την απόσταση ανασκευής, αντίθετα προς τη μέθοδο διακριτής μετατροπής Fresnel, όπου οριζόταν μέσω της συνθήκης Shannon ένα κάτω όριο για την απόσταση ανασκευής.

3.7. Συμπεράσματα

Η ψηφιακή ολογραφία εισαγάγει στη μέθοδο τη δυνατότητα της ψηφιακής επεξεργασίας. Η ανασκευή του ολογράμματος γίνεται πια διαδικασία αλγοριθμική, παραβλέποντας φυσικά την διεργασία του μέσου εγγραφής, και εξαιρετικά ταχύτερη από αυτή της αναλογικής ολογραφίας. Η ταχύτητα και η ακρίβεια της μεθόδου, καθώς και η είσοδός της στο ψηφιακό περιβάλλον οδήγησε στην μετρητική χρήση της. Η ολογραφική συμβολομετρία είναι μια μετρητική τεχνική που η ευαισθησία της οφείλεται στην ολογραφική μέθοδο. Η χρήση της στον μη καταστρεπτικό έλεγχο (NDT), τη μη καταστρεπτική εκτίμηση (NDE) και τον υπολογισμό των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών είναι το πεδίο με το οποίο θα ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

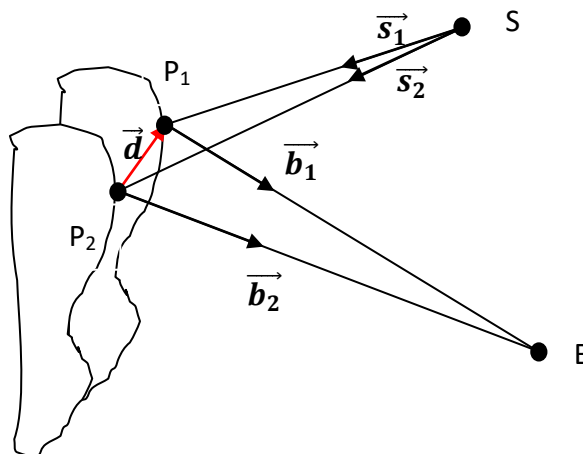
4.1. Εισαγωγή

Η χρήση της ψηφιακής ολογραφίας στον μη καταστρεπτικό έλεγχο και την ανάλυση τάσεων αποτελεί μία από τις πιο σύγχρονες εφαρμογές της τεχνικής. Η ευαισθησία της ολογραφίας σε συνδυασμό με την ακρίβεια και την ταχύτητα εξαγωγής αποτελεσμάτων, την καθιστούν εύφορο έδαφος για έρευνα και βελτιστοποίηση. Η ολογραφία λειτουργεί σαν μετρητικό εργαλείο αυξημένης ευαισθησίας στηριζόμενη στη μέθοδο της συμβολομετρίας. Με τον τρόπο αυτό γίνονται μετρήσεις μετατοπίσεων της τάξεως του εκατοστού του μήκους κύματος που χρησιμοποιείται. Η ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία (Digital Holographic Interferometry - DHI), καθώς και παρόμοιες τεχνικές (Electronic Speckle Pattern Interferometry και Shearography), καταφέρνουν ως σήμερα να χρησιμοποιούνται και να ερευνούνται σαν όργανα μη καταστρεπτικών ελέγχων (Non Destructive Testing - NDT) και εκτιμήσεων (Non Destructive Evaluation - NDE).

4.2. Βασικές Αρχές Ολογραφικής Συμβολομετρίας

Η ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία (DHI) χρησιμοποιείται ως ένα ευαίσθητο μετρητικό όργανο στηριζόμενη στη συσχέτιση δύο μεγεθών: πρώτον, τη μετατόπιση των σημείων της επιφάνειας ενός αντικειμένου που παραμορφώνεται και δεύτερον τη φάση που εγγράφεται στο ολόγραμμα. Οι δύο αυτές ποσότητες σχετίζονται διαμέσου της μεταβολής της οπτικής διαδρομής που ακολουθεί η δέσμη αντικειμένου λόγω της παραμόρφωσης.

Η παραπάνω μεταβολή συνδέεται με τη μετατόπιση ενός σημείου της επιφάνειας του στοιχείου ως εξής (Σχήμα 4.1):



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση γεωμετρικών μεγεθών για τον υπολογισμό της σχέσης φάσης και μεταβολής οπτικής διαδρομής

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Το διάνυσμα $\vec{d}(x, y, z)$ ονομάζεται διάνυσμα μετατόπισης (displacement vector) και εκφράζει την τρισδιάστατη μετατόπιση ενός σημείου της επιφάνειας του εξεταζόμενου στοιχείου από την θέση P_1 στην θέση P_2 , που προκλήθηκε από το φορτίο που εφαρμόστηκε. Τα \vec{s}_1, \vec{s}_2 εκφράζουν τα μοναδιαία διανύσματα στην διεύθυνση των αποστάσεων πηγής - αντικειμένου $|SP_1|, |SP_2|$ κι αντίστοιχα τα διανύσματα \vec{b}_1, \vec{b}_2 είναι μοναδιαία στη διεύθυνση των αποστάσεων αντικειμένου - παρατηρητή $|P_1B|, |P_2B|$. Η διαφορά της οπτικής διαδρομής $|SP_1B|, |SP_2B|$ μπορεί να γραφτεί ως:

$$\delta = |SP_1| + |P_1B| - (|SP_2| + |P_2B|) = \vec{s}_1 \overrightarrow{SP_1} + \vec{b}_1 \overrightarrow{P_1B} - (\vec{s}_2 \overrightarrow{SP_2} + \vec{b}_2 \overrightarrow{P_2B}) \quad [4.1]$$

Η διαφορά στις τάξεις μεγέθους μεταξύ του μέτρου του διανύσματος μετατόπισης $|\vec{d}(x, y, z)|$ (μm) και των αποστάσεων $|SP_i|, |P_iB|$ (m), επιτρέπει στα μοναδιαία διανύσματα \vec{s}_i, \vec{b}_i να αντικατασταθούν από ένα διάνυσμα \vec{s}, \vec{b} στην διεύθυνση της διχοτόμου των προηγούμενων διανυσμάτων. Συνεπώς ορίζονται:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 = \vec{s}_2 \text{ και } \vec{b} = \vec{b}_1 = \vec{b}_2 \quad [4.2]$$

Το διάνυσμα μετατόπισης δίνεται ως:

$$\vec{d}(x, y, z) = \overrightarrow{SP_2} - \overrightarrow{SP_1} = \overrightarrow{P_1B} - \overrightarrow{P_2B} \quad [4.3]$$

Από τις εξισώσεις [4.1] - [4.3] προκύπτει:

$$\delta = (\vec{b} - \vec{s}) \vec{d}(x, y, z) \quad [4.4]$$

Η ολογραφική συμβολομετρία είναι μια μη καταστρεπτική, οπτική μέθοδος μέτρησης της μεταβολής της οπτικής διαδρομής που οφείλεται είτε σε παραμορφώσεις στερεών σωμάτων, είτε σε μεταβολές του δείκτη διάθλασης ρευστών. Όσον αφορά τις παραμορφώσεις, η διαδικασία της μεθόδου έχει τα εξής στάδια: Αρχικά το αντικείμενο που μελετάται, ολογραφείται σε μία πρώτη κατάσταση ή κατάσταση αναφοράς, έχοντας σαν αποτέλεσμα το ολόγραμμα αναφοράς. Χρησιμοποιώντας τις βασικές εξισώσεις περιγραφής μιας δέσμης αντικειμένου, προκύπτει:

$$U_o^{ref} = U_o^1 = O^{+1}(x, y) e^{i\varphi(x, y)} \quad [4.5]$$

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Ακολούθως εφαρμόζεται στο υπό εξέταση στοιχείο το είδος και το μέγεθος φορτίου που μελετάται και το στοιχείο ολογραφείται ξανά χρησιμοποιώντας την ίδια πηγή, την ίδια δέσμη αναφοράς και την ίδια θέση του αντικειμένου. Το ολόγραμμα που προκύπτει ονομάζεται ολόγραμμα διέγερσης και εκφράζεται ως:

$$U_o^{exc} = U_o^2 = O^{+1}(x, y)e^{i(\varphi(x, y) + \Delta\varphi)} \quad [4.6]$$

Η διαφορά φάσης $\Delta\varphi$ που εμφανίζεται στο ολόγραμμα διέγερσης οφείλεται στις μεταβολές της επιφάνειας του στοιχείου. Στην πραγματικότητα η διαφορά αυτή εκφράζει τη μεταβολή του στοιχείου από την κατάσταση αναφοράς στην κατάσταση διέγερσης και ονομάζεται φάση συμβολής. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται ολογραφία διπλής έκθεσης (double exposure holography). Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των εγγραφών μπορεί να γίνει τόσο αμελητέος (attoseconds) ώστε να μελετηθούν στιγμιαία φαινόμενα ή κρουστικές διεγέρσεις με τη χρήση laser παλμικής εκπομπής. Όσον αφορά φαινόμενα μεγάλης διάρκειας ή περιοδικές διεγέρσεις και ταλαντώσεις η παραπάνω μέθοδος καθίσταται και πάλι ικανή για την μελέτη τους, καθώς υπάρχει η δυνατότητα εγγραφής πολλαπλών ολογραμμάτων διέγερσης και ο υπολογισμός της φάσης συμβολής για κάθε στάδιο που εγγράφεται.

Η ψηφιακή καταγραφή των ολογραμμάτων βελτίωσε σε ασύλληπτο βαθμό τη μέθοδο της ολογραφικής συμβολομετρίας δίνοντας τη δυνατότητα στους ερευνητές να ανακτούν αλγοριθμικά τις φάσεις των ψηφιακών ολογραμμάτων και να υπολογίζουν τη φάση συμβολής σε ελάχιστο χρόνο και χωρίς την απαραίτητη ανασκευή του ολογράμματος (Σχήμα 4.2, 4.3). Όπως εμφανίζονται στο τέταρτο κεφάλαιο, οι εξισώσεις [3.20] και [3.21] δίνουν τη δυνατότητα άμεσου υπολογισμού της φάσης ενός ψηφιακού ολογράμματος. Συνεπώς είναι δυνατό να υπολογιστεί εξίσου ευθέως η φάση συμβολής με απλή αφαίρεση.

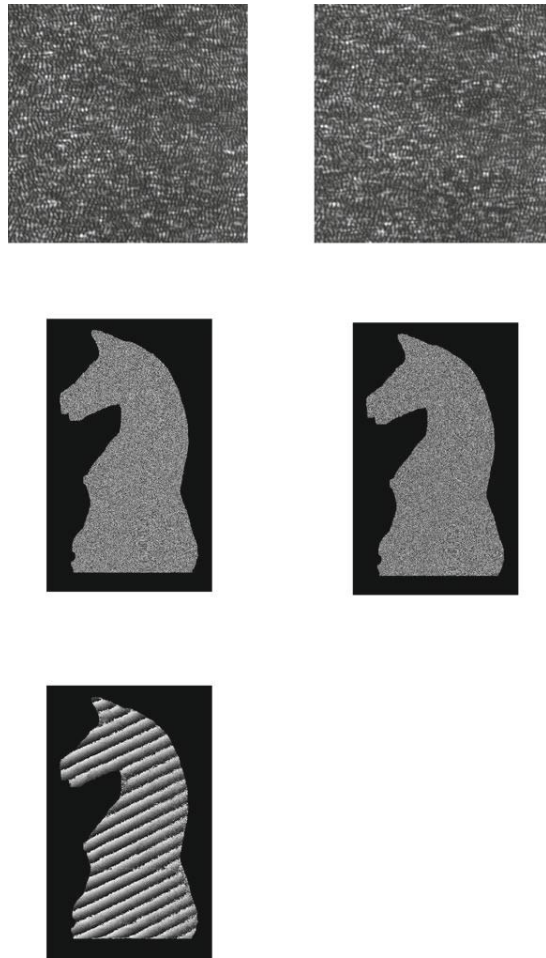
$$\varphi_i = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{O_i^{+1}\}}{\text{Re}\{O_i^{+1}\}} \right), \quad i = 1, 2, \dots \quad [4.7]$$

Στην εξίσωση [4.7] τα αποτελέσματα που προκύπτουν ορίζονται εντός του διαστήματος $[-\pi, \pi]$. Η φάση συμβολής υπολογίζεται ως:

$$\Delta\varphi_i = \begin{cases} \varphi_i - \varphi_{i+1}, & \text{αν } \varphi_i \geq \varphi_{i+1} \\ \varphi_i - \varphi_{i+1} + 2\pi, & \text{αν } \varphi_i < \varphi_{i+1} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots \quad [4.8]$$

Η συνολική φάση συμβολής μπορεί να υπολογιστεί είτε αθροίζοντας τις επιμέρους φάσεις συμβολής, είτε αφαιρώντας την τελική από την αρχική φάση συμβολής.

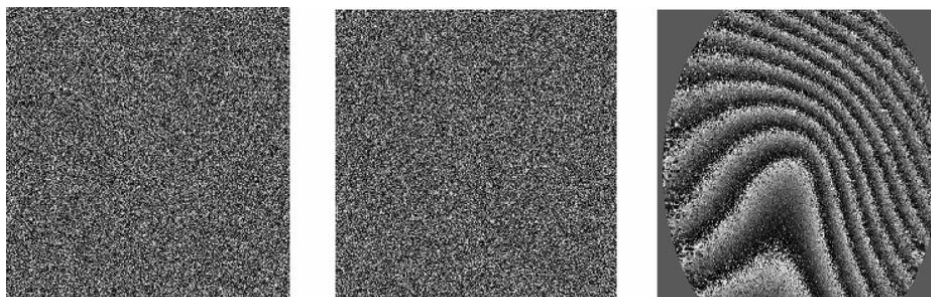
Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων



Σχήμα 4.2 (α) Ολόγραμμα αναφοράς, (β) Ολόγραμμα διέγερσης, (γ) Φάση αναφοράς, (δ) Φάση διέγερσης, (ε) Φάση Συμβολής

Digital Holography and Wavefront Sensing - Principles, Techniques and Applications - Ulf Schanrs, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner.

Κεφάλαιο 4.3.2 σελίδα 71



Σχήμα 4.3 Μέθοδος αφαίρεσης φάσεων (α) φ_1 , (β) φ_2 , (γ) $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$

New Techniques in Digital Holography - Edited by Pascal Picart. Κεφάλαιο 1.5.3 Σελίδα 48

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Η βασική σχέση στην οποία στηρίζεται η ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία είναι αυτή μεταξύ της φάσης συμβολής $\Delta\varphi$, της μεταβολής οπτικής διαδρομής δ και του διανύσματος μετατόπισης και γράφεται ως εξής:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{b} - \vec{s}) \vec{d}(x, y, z) = \vec{d}(x, y, z) \vec{S} \quad [4.9]$$

Ορίζεται ως διάνυσμα ευαισθησίας το παρακάτω:

$$\vec{S} = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{b} - \vec{s}) \quad [4.10]$$

Το διάνυσμα ευαισθησίας εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των μοναδιαίων διανυσμάτων πηγής και παρατηρητή και καθορίζει τη διεύθυνση στην οποία το σύστημα ελέγχου έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στις παραμορφώσεις. Όπως είναι φανερό το διάνυσμα αυτό εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά της διάταξης του συστήματος ολογραφίας εφόσον εξαρτάται μόνο από το μήκος κύματος της πηγής και τις διευθύνσεις των μοναδιαίων διανυσμάτων πηγής και παρατηρητή. Στην πραγματικότητα αυτό που υπολογίζεται από τη βασική εξίσωση της ολογραφικής συμβολομετρίας [4.9] είναι η προβολή του διανύσματος μετατόπισης επάνω στο διάνυσμα ευαισθησίας.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, το διάνυσμα μετατόπισης είναι τρισδιάστατο και συνεπώς μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες $u(x,y)$, $v(x,y)$ και $w(x,y)$, παράλληλες στους άξονες x,y και z αντίστοιχα. Οι συνιστώσες u,v είναι παράλληλες στην επιφάνεια του στοιχείου που ελέγχεται γι' αυτό και ο υπολογισμός των μετατοπίσεων ή των παραμορφώσεων ονομάζεται ομοεπίπεδος (*in-plane*). Αντίθετα ο υπολογισμός που προκύπτει από τη συνιστώσα w αφορά την κάθετη διεύθυνση στην επιφάνεια του στοιχείου και ως εκ τούτου αναφέρεται ως εκτός επιπέδου (*out-of-plane*).

Προκειμένου να μελετηθούν οι μετατοπίσεις ή οι παραμορφώσεις της επιφάνειας ενός στοιχείου σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις είναι αναγκαία η διαμόρφωση τη διάταξης του συστήματος ολογραφίας έτσι ώστε το διάνυσμα ευαισθησίας να προσεγγίζει τις εκάστοτε διευθύνσεις υπό μελέτη. Η τελευταία διαπίστωση είχε ως αποτέλεσμα τη μέθοδο της 3D - ψηφιακής ολογραφικής συμβολομετρίας (3D - DHI) για την ανάλυση των παραμορφώσεων από τις τρεις συνιστώσες μετατόπισης ταυτοχρόνως.

4.3. Ολογραφική Συμβολομετρία στον Μη - Καταστρεπτικό Έλεγχο

Η μέθοδος της ψηφιακής ολογραφικής συμβολομετρίας διαθέτει χαρακτηριστικά που συνεισφέρουν στον εντοπισμό ατελειών κοντά στη επιφάνεια των στοιχείων που εξετάζονται. Όπως έχει αναφερθεί πρόκειται για μια μέθοδο που εντοπίζει μεταβολές και μετατοπίσεις τις τάξεως του εκατοστού του μικρόμετρου (10^{-2} μm) χωρίς επαφή με το στοιχείο.

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.2 και 4.3 είναι εμφανές πως η διαδικασία της ψηφιακής ολογραφικής συμβολομετρίας οδηγεί στην απεικόνιση της φάσης συμβολής. Η απεικόνιση αυτή εμφανίζει κροσσούς συμβολής και ονομάζεται *συμβολόγραμμα* (interferogram). Η φάση συμβολής $\Delta\varphi$ είναι στην πραγματικότητα η φάση που θα προέκυπτε σε περίπτωση που τα δύο εγγεγραμμένα ολογράμματα (αναφοράς και διέγερσης) συνέβαλαν μεταξύ τους. Αυτό αποδεικνύεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 4.4 και 4.5 και εκφράζοντας την ένταση της συμβολής των δύο κυμάτων:

$$I = |U_o^i + U_o^{i+1}|^2 = (U_o^i + U_o^{i+1})(U_o^i + U_o^{i+1})^* = 2(O^{+1})^2(1 + \cos \Delta\varphi) \quad [4.11]$$

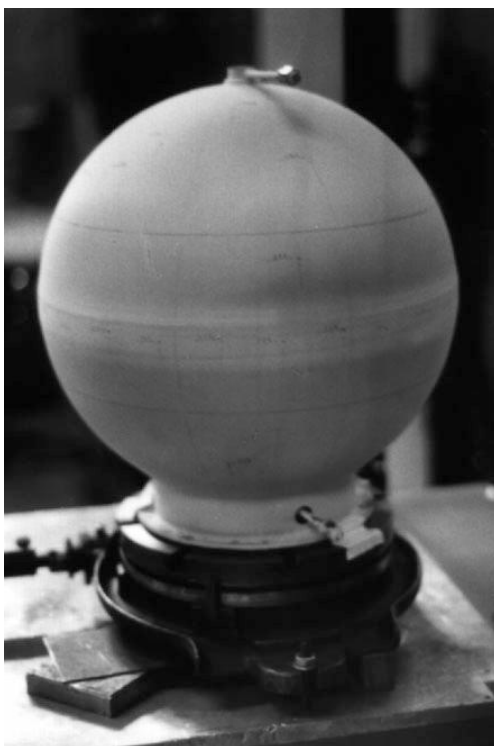
Οι κροσσοί που εμφανίζονται είναι περιοχές σταθερής φάσης και λαμβάνουν τιμές από το πεδίο τιμών της αντίστροφης εφαπτομένης $[-\pi, \pi]$. Ως εκ τούτου διαπιστώνεται μια ομαλή χρωματική μετάβαση από το μαύρο ($-\pi$) προς το άσπρο ($+\pi$) κι έπειτα ένα άλμα τιμών από το άσπρο στο μαύρο. Επίσης το αποτέλεσμα της απεικόνισης έχει θόρυβο εφόσον η φάση εξαρτάται από την επιφάνεια του στοιχείου και συνεπώς είναι μια τυχαία μεταβλητή.

Η ολογραφική συμβολομετρία χρησιμοποιείται στον μη - καταστρεπτικό έλεγχο εντοπίζοντας μεταβολές που προκύπτουν σε στοιχεία λόγω μηχανικών ή θερμικών φορτίων και διαφορών πίεσης. Οι ατέλειες στο εσωτερικό των υλικών δημιουργούν μετατοπίσεις στην επιφάνεια του στοιχείου που ανιχνεύονται σαν ανομοιογένειες στους κροσσούς του συμβολογράμματος. Το μέγεθος των φορτίων που χρησιμοποιούνται βρίσκεται σε ασφαλείς περιοχές, μακριά από το όριο διαρροής των υλικών, εφόσον η μέθοδος διαθέτει τέτοια ευαισθησία που οι κροσσοί συμβολής είναι διακριτοί με την εφαρμογή πολύ ασθενών φορτίων.

Στην πραγματικότητα ο έλεγχος που λαμβάνει χώρα μέσω της ολογραφικής συμβολομετρίας είναι ποιοτικός. Για τον εντοπισμό των ατελειών δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των συνιστωσών του διανύσματος μετατόπισης, παρά μόνο οι φάσεις του εκάστοτε ολογράμματος για τον υπολογισμό της φάσης μεταβολής. Κάθε ανομοιογένεια που εντοπίζεται στο συμβολόγραμμα είναι ένδειξη ατέλειας του στοιχείου.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Ένα παράδειγμα θα αποσαφηνίσει τη μη - καταστρεπτική μέθοδο: Ένα σφαιρικό δοχείο πίεσης διαμέτρου 2 m χρησιμοποιείται ως δεξαμενή καυσίμων για ένα δορυφόρο. Το πάχος του τοιχώματος του δοχείου είναι 1mm (Σχήμα 4.4). Η επιφάνεια του δοχείου υπόκειται σε μη - καταστρεπτικό έλεγχο και γι' αυτό χωρίζεται σε τμήματα διαστάσεων 5cm επί 5cm. Το κάθε τμήμα ολογραφείται πολλές φορές ενώ η πίεση εντός της δεξαμενής μεταξύ κάθε ολογράφησης μεταβάλλεται κατά μερικές εκατοντάδες εκατοπασκάλ (hPa).



Σχήμα 4.4 Δεξαμενή καυσίμων δορυφόρου

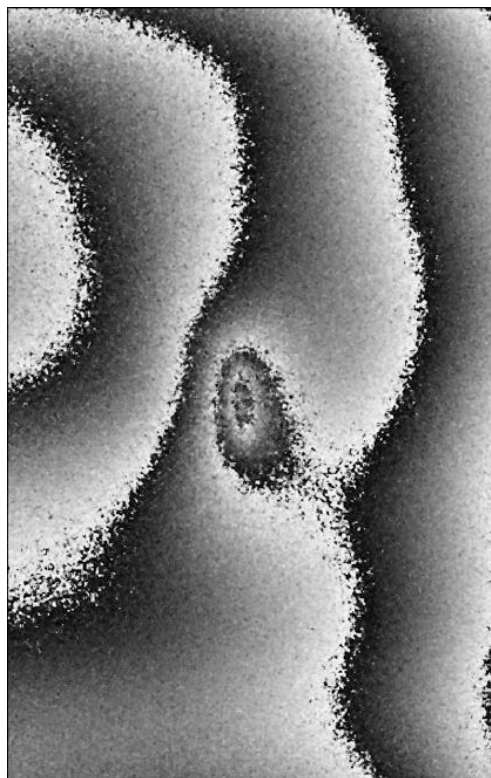
Digital Holography and Wavefront Sensing - Principles, Techniques and Applications - Ulf Schanrs, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner. Κεφάλαιο 4.2.4 σελίδα 83

Δύο αποτελέσματα συμβολογραμμάτων από τη διαδικασία παρατίθενται στα σχήματα 4.5 και 4.6, όπου εντοπίζονται ανομοιογένειες στο προφίλ των κροσσών αναδεικνύοντας ατέλειες, πιθανές ρωγμές ή εκλέπτυνση του τοιχώματος, στην επιφάνεια του δοχείου.



Σχήμα 4.5 Συμβολόγραμμα Δοχείου Πίεσης. Η ανομοιογένεια στο κέντρο της εικόνας εντοπίζει ατέλεια στο κέλυφος του δοχείου

Digital Holography and Wavefront Sensing - Principles, Techniques and Applications - Ulf Schanrs, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner. Κεφάλαιο 2.7.1 σελίδα 27



Σχήμα 4.6 Συμβολόγραμμα Δοχείου Πίεσης. Η ανομοιογένεια στο κέντρο της εικόνας εντοπίζει ατέλεια στο κέλυφος του δοχείου

Digital Holography and Wavefront Sensing - Principles, Techniques and Applications - Ulf Schanrs, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner. Κεφάλαιο 4.2.4 σελίδα 84

4.4. Ολογραφική Συμβολομετρία στην Εκτίμηση Μηχανικών Ιδιοτήτων

Το σημαντικότερο ίσως ερευνητικό πεδίο εφαρμογής της ψηφιακής ολογραφικής συμβολομετρίας είναι αυτό της εκτίμησης των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων. Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο περιγράφηκε η διαδικασία μέσα από την οποία υπολογίζονται οι συνιστώσες του διανύσματος μετατόπισης όταν ένα στοιχείο υποβάλλεται σε μία μηχανική ή θερμική διέγερση μικρού μεγέθους. Επομένως, εφόσον υπάρχει ένα φυσικό μοντέλο που να συνδέει τις μετατοπίσεις με κάποια ιδιότητα του υλικού (παραμορφώσεις, μέτρο Young, συντελεστής θερμικής διαστολής), τότε αυτή μπορεί να εκτιμηθεί με την ολογραφική συμβολομετρία.

Η μέθοδος που θα αναλυθεί είναι η τρισδιάστατη ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία (3D - Digital Holographic Interferometry) για την εκτίμηση των παραμορφώσεων, όπως αυτή παρουσιάζεται από τους Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh - Saucedo Anaya και Donato Reyes. Οι παραπάνω ερευνητές βασιζόμενοι στην βασική θεωρία της ολογραφικής συμβολομετρίας προτείνουν μία μέθοδο ανάλυσης παραμορφώσεων που χρησιμοποιείται σε ισότροπα και σύνθετα υλικά. Τα αποτελέσματα της μεθόδου συγκρίνονται και στις δύο περιπτώσεις με αυτά της προσομοίωσης του πειράματος από μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method - FEM). Τα αποτελέσματα έχουν αρκετά μεγάλη συμφωνία δείχνοντας πως η μέθοδος λειτουργεί και χρήζει περαιτέρω έρευνας. Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται οι δύο περιπτώσεις τρισδιάστατης ψηφιακής ολογραφικής συμβολομετρίας αρχικά σε πλάκα αλουμινίου με γνωστές μηχανικές ιδιότητες για την εξακρίβωση των αποτελεσμάτων της μεθόδου και στη συνέχεια στο μηριαίο οστό ενός βοοειδούς με αποτελέσματα για σύνθετα υλικά που λειτουργούν ανισότροπα. Η διάταξη που χρησιμοποιείται και στις δύο περιπτώσεις είναι κοινή, όπως και τα βήματα που ακολουθούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

4.4.1. Ειδική Θεωρία Τρισδιάστατης Ψηφιακής Ολογραφικής Συμβολομετρίας για την Ανάλυση Παραμορφώσεων

Στην παράγραφο 4.2 διαμορφώθηκε η βασική σχέση [4.9] που συνδέει την φάση συμβολής $\Delta\phi$ και το διάνυσμα μετατόπισης. Η θεωρία περιγράφει την ολογραφία διπλής έκθεσης (double exposure) ενός αντικειμένου που φωτίζεται από μία μονοχρωματική και σύμφωνη πηγή.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Τα δύο ολογράμματα εγγράφονται σε έναν CCD αισθητήρα και μετά την εγγραφή τους αποδιαμορφώνονται (demodulation), απομονώνονται οι θετικοί όροι περίθλασης και υπολογίζονται από αυτούς οι απαιτούμενες φάσεις. Με την αφαίρεση των φάσεων υπολογίζεται η φάση συμβολής και στη συνέχεια το διάνυσμα μετατόπισης.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση που προτείνεται από τους Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh - Saucedo Anaya και Donato Reyes το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός των τριών συνιστωσών του διανύσματος μετατόπισης u, v, w σε έναν κύκλο διπλής έκθεσης. Η επίτευξη του στόχου αφενός μειώνει κατά πολύ τον χρόνο εξαγωγής αποτελεσμάτων, όμως σπουδαιότερο είναι ότι δίνει την δυνατότητα στην ολογραφική συμβολομετρία για την τρισδιάστατη καταγραφή και ανάλυση φαινομένων είτε πολύ μικρής διάρκειας, είτε ακόμα μη επαναλαμβανόμενων, χωρίς κόστος στην ποιότητα της ανάλυσης. Τα παραπάνω πετυχαίνονται με τον εξής τρόπο: Η μέθοδος χρησιμοποιεί τρεις πηγές laser διαφορετικού μήκους κύματος κι έναν μονοχρωματικό αισθητήρα CCD υψηλής απόδοσης. Εκτός των δύο αυτών βασικών στοιχείων χρησιμοποιούνται επίσης οποιαδήποτε στοιχεία επεξεργασίας των φωτεινών δεσμών κρίνονται απαραίτητα όπως καθρέφτες (mirrors), φακοί (lenses), διαχωριστές (beam splitters) και συνδυαστές (beam combiners) για τη διάταξη.

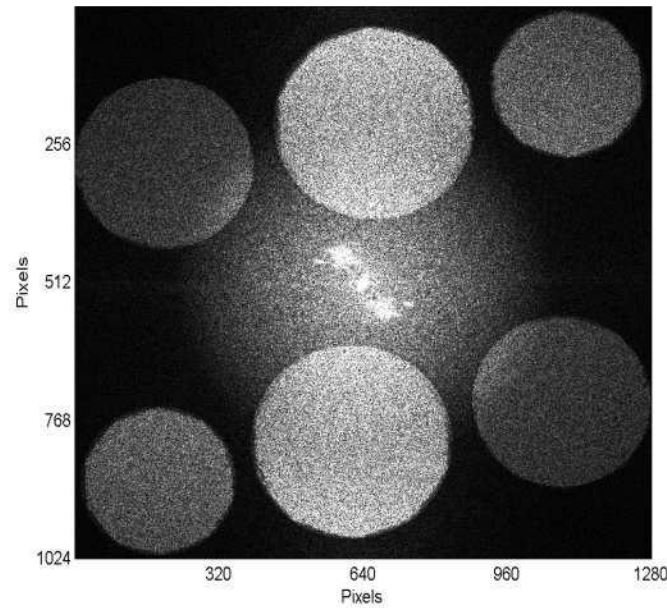
Το αντικείμενο προς μελέτη φωτίζεται ταυτόχρονα από τις τρεις πηγές και κάθε ζεύγος δεσμών (αντικειμένου και αναφοράς) αφού αλληλεπιδράσει στον συνδυαστή (beam combiner) προσπίπτει στην επιφάνεια του αισθητήρα για την εγγραφή. Με τον τρόπο αυτό στον αισθητήρα εγγράφονται ταυτόχρονα τρία ολογράμματα για κάθε έκθεση του αντικειμένου. Τρία ολογράμματα αναφοράς και τρία διέγερσης. Διατυπώνοντας μαθηματικά το αποτέλεσμα κάθε έκθεσης:

$$H^k = |U_r^k + U_0^k|^2 = |U_r^k|^2 + |U_0^k|^2 + U_r^{k*} U_0^k + U_r^k U_0^{k*}, \quad k = 1, 2, 3 \quad [4.12]$$

Για κάθε έκθεση του αισθητήρα ταυτόχρονα εγγράφονται τρία ολογράμματα ασύμφωνα (incoherent) μεταξύ τους ώστε να μην συμβάλλουν κατά την ανάμιξή τους στον συνδυαστή. Τα ολογράμματα που εγγράφονται ακολουθούν διάταξη ολογραφίας εκτός άξονα (off - axis) και ως εκ τούτου οι θετικοί όροι περίθλασης απομονώνονται στο πεδίο συχνοτήτων (Fourier) με τη χρήση ψηφιακών φίλτρων (Σχήμα 4.7). Συνεπώς η συνολική έκθεση στον αισθητήρα στο πεδίο συχνοτήτων έχει την μορφή:

$$FT[H^k](u, v) = \sum_{k=1}^3 C_0^k(u, v) + C_1^k(u - u_0, v - v_0) + C_1^{k*}(u - u_0, v - v_0) \quad [4.13]$$

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων



Σχήμα 4.7 Περιθλαστικοί όροι κάθε ζεύγους δεσμών (τρία ζεύγη) σε ένα ολόγραμμα.
Επάνω: Θετικοί όροι περίθλασης, **Κέντρο:** Μηδενικός όρος, **Κάτω:** Συζυγείς όροι
περίθλασης

Digital holographic interferometer using simultaneously three lasers and a single monochrome sensor for 3D displacement measurements - *Tonatiuh Saucedo-A. , M. H. De la Torre-Ibarra, F. Mendoza Santoyo, Ivan Moreno*

Με την απομόνωση των θετικών όρων C_1, C_2 και C_3 και την αντιστροφή του μετασχηματισμού Fourier προκύπτουν:

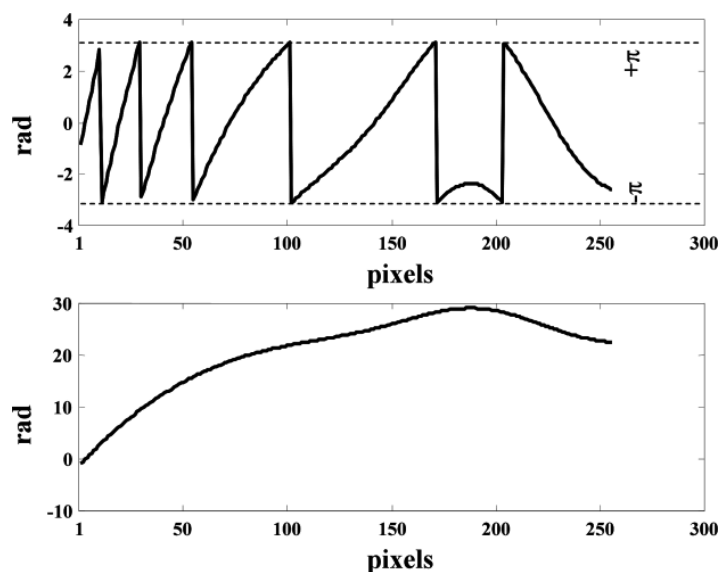
$$O_{+1}^k = FT^{-1}[C_1^k] \quad [4.14]$$

$$\varphi^k(x, y) = \arctan \left[\frac{Im(O_{+1}^k)}{Re(O_{+1}^k)} \right] \quad [4.15]$$

Από ένα ολόγραμμα υπολογίζονται τρεις φάσεις που σχετίζονται με τρεις διαφορετικές διευθύνσεις διανυσμάτων ευαισθησίας για τον υπολογισμό των συνιστωσών του διανύσματος μετατόπισης. Ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία μετά τη φόρτιση του αντικειμένου, υπολογίζονται και οι φάσεις διέγερσης $\varphi^k(x, y)'$.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Προηγουμένως αναφέρθηκε πως οι φάσεις που υπολογίζονται από τις εξισώσεις [4.15] βρίσκονται εντός του διαστήματος $[-\pi, \pi]$ εμφανίζοντας τα χαρακτηριστικά άλματα στις αποτυπώσεις της φάσης συμβολής $\Delta\varphi$. Η μορφή αυτή ονομάζεται δεσμευμένη (wrapped phase). Η επαναφορά των τιμών σε συνεχή μορφή ονομάζεται αποδέσμευση φάσης (phase unwrapping) και λειτουργεί αλγοριθμικά πάνω στη δεσμευμένη αποτύπωση. Ο αλγόριθμος κινείται ανά pixel αναζητώντας τα άλματα στις τιμές της φάσης. Εφόσον εντοπισθεί, το άλμα μηδενίζεται προσθέτοντας στις ασυνεχείς τιμές μία σταθερά φάσης ώστε να αποκατασταθεί η συνέχειά τους (Διάγραμμα 4.1).



Διάγραμμα 4.1 Δεσμευμένη και Αποδέσμευμένη φάση ολογράμματος

New Techniques in Digital Holography - Edited by Pascal Picart. Κεφάλαιο 1.5.4 Σελίδα 49

Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται οι φάσεις συμβολής:

$$\Delta\varphi_k = \varphi^{k'} - \varphi^k \quad [4.16]$$

Εφόσον η συνέχεια των τιμών κάθε φάσης συμβολής αποκατασταθεί, υπολογίζονται οι συνιστώσες του διανύσματος από την προέκταση της εξίσωσης [4.9]:

$$\begin{pmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \\ \Delta\varphi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{1/x} & S_{1/y} & S_{1/z} \\ S_{2/x} & S_{2/y} & S_{2/z} \\ S_{3/x} & S_{3/y} & S_{3/z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad [4.17]$$

Όπου S_{ij} είναι η προβολή του εκάστοτε διανύσματος ευαισθησίας στον αντίστοιχο άξονα συντεταγμένων.

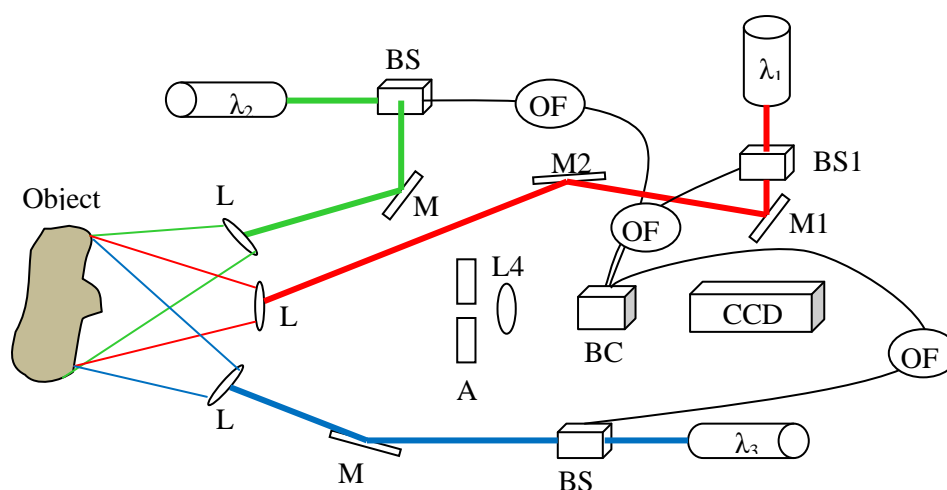
Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Το τελικό στάδιο της μεθόδου έγκειται στον υπολογισμό των παραμορφώσεων. Οι μετατοπίσεις υπολογίζονται στις τρεις διαστάσεις έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των παραμορφώσεων εντός επιπέδου (*in-plane*) και συγκεκριμένα των ορθών $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ και της διατμητικής γ_{xy} . Όπως έχει αναφερθεί, για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων χρειάζεται ένα φυσικό μοντέλο που να συνδέει τις μετατοπίσεις με την ιδιότητα. Το μέγεθος των μηχανικών φορτιών που χρησιμοποιούνται κατά την ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία επιτρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις την προσέγγιση των υλικών ως τοπικώς ισότροπα και ομοιογενή. Η ευαισθησία της μεθόδου διατηρεί τα υλικά στην ελαστική περιοχή, χωρίς καμία μη αντιστρεπτή συνέπεια και ανιχνεύει παραμορφώσεις της τάξεως του μικρόμετρου (μm). Δεδομένων των παραπάνω παραδοχών οι παραμορφώσεις που υπολογίζονται μπορούν να εκφραστούν με τους απλούς τύπους της μηχανικής:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \delta u / \delta x \\ \varepsilon_y &= \delta v / \delta y \\ \gamma_{xy} &= \delta u / \delta y + \delta v / \delta x\end{aligned}\quad [4.18]$$

Υπολογίζοντας τις κλίσεις των μετατοπίσεων η μέθοδος οδηγεί στον υπολογισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας το παραπάνω φυσικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα για κάθε υλικό συγκρίνονται με αυτά του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων και βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία.

4.4.2. Πειραματική Διάταξη



Σχήμα 4.8 Συμβολομετρική Διάταξη Πειραμάτων: λ_i πηγές laser, BS_i διαχωριστές, M_i καθρέφτες, L_i οπτικοί φακοί, OF_i οπτικές ίνες, A κυκλική οπή, BC συνδυαστής δεσμών, CCD αισθητήρας εγγραφής, Object Αντικείμενο Μέτρησης

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

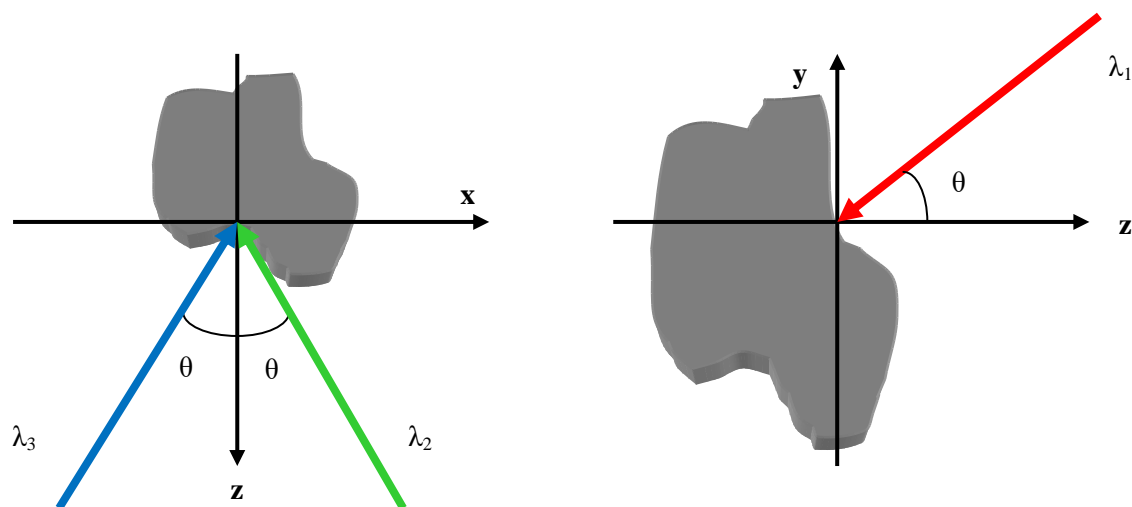
Η διάταξη του συμβολόμετρου που χρησιμοποιήθηκε στις δύο περιπτώσεις από τους ερευνητές είναι κοινή. Στο σχήμα της διάταξης βρίσκονται τα εξής στοιχεία: Τρεις πηγές laser συνεχούς κύματος (Continuous Wave - CW). Η πρώτη δέσμη (λ_1) εκπέμπεται από He - Ne Laser με μήκος κύματος 632,8 μm (ερυθρό) και ισχύ εκπομπής 20 mW. Η δεύτερη δέσμη (λ_2) από Verdi V10 laser με μήκος κύματος 532 μm (πράσινο) και ισχύ 20 mW και η τρίτη δέσμη (λ_3) εκπέμπεται από Genesis G1 laser μήκους κύματος 480 μm (μπλε) και ισχύ 20 mW. Οι τρεις δέσμες οδηγούνται σε αντίστοιχους διαχωριστές (beam splitters - BS) ώστε να δημιουργηθούν οι δέσμες αντικειμένου και αναφοράς. Οι διαχωριστές χαρακτηρίζονται από τα μέρη της ακτινοβολίας που επιτρέπουν να μεταδοθεί (Transmission) και να ανακλαστεί (Reflection) με αναγραφόμενο κλάσμα R:T. Οι διαχωριστές διαφέρουν στα δύο πειράματα, λόγω διαφορετικής χωροταξίας. Η κοινή πάντως συνθήκη απαιτεί το 80% της δέσμης να προσφέρεται για την δέσμη αντικειμένου και το υπόλοιπο 20% στη δέσμη αναφοράς. Έτσι για το πρώτο πείραμα (πλάκα αλουμινίου) χρησιμοποιούνται διαχωριστές 20:80 στους BS₁ και BS₃, ενώ 80:20 στον BS₂. Στο δεύτερο πείραμα (οστό) χρησιμοποιούνται διαχωριστές 80:20 στους BS₁ και BS₂, ενώ 20:80 στον BS₃. Για τις δέσμες αναφοράς τοποθετούνται στην έξοδο των διαχωριστών προσαρμογείς οπτικής ίνας (fiber adapter) (PS) ώστε η δέσμη να οδηγηθεί μέσω της ίνας (Optical Fiber - OF) στην απαραίτητη κάθετη κατεύθυνση προς τον συνδυαστή (Beam Combiner - BC) για να συμβάλλουν με τις δέσμες αντικειμένου. Όσον αφορά τις δέσμες αντικειμένου, αυτές κατευθύνονται με τη χρήση καθρεφτών (Mirror - M) και διευρύνονται με τη χρήση φακών (Lenses - L) πετυχαίνοντας συγκεκριμένες γωνίες πρόσπτωσης που καθορίζουν τα διανύσματα ευαισθησίας.

Όπως έχει γίνει σαφές, ο καθορισμός των διευθύνσεων ευαισθησίας είναι πολύ σημαντικός για τη ολογραφική συμβολομετρία. Για τα δύο πειράματα των Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh - Saucedo Anaya και Donato Reyes οι κατευθύνσεις των διανυσμάτων τοποθετήθηκαν δημιουργώντας ίσες γωνίες σε σχέση με τη διεύθυνση παρατήρησης που συμπίπτει με τον άξονα z, ώστε $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$ (Σχήμα 4.9). Με τον τρόπο αυτό συνδυάζοντας τις εξισώσεις [4.10] και [4.17] με την γωνία θ , προκύπτει μια απλουστευμένη μορφή για τον υπολογισμό των φάσεων συμβολής:

$$\begin{pmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \\ \Delta\varphi_3 \end{pmatrix} = 2\pi \begin{pmatrix} 0 & -\sin\theta/\lambda_1 & (\cos\theta + 1)/\lambda_1 \\ \sin\theta/\lambda_2 & 0 & (\cos\theta + 1)/\lambda_2 \\ -\sin\theta/\lambda_3 & 0 & (\cos\theta + 1)/\lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad [4.19]$$

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Η διάταξη ολοκληρώνεται με το μέσον εγγραφής. Οι δέσμες αντικειμένου συλλέγονται από οπτικό φακό (L4) βάθους εστίασης 75 mm μπροστά από τον οποίο υπάρχει μια κυκλική οπή (Aperture - A) και κατευθύνονται μέσα στον συνδυαστή (BC 50:50) όπου συμβάλλουν με τις δέσμες αναφοράς και ύστερα η συμβολή τους εγγράφεται σε αισθητήρα CCD υψηλής απόδοσης. Στα δύο πειράματα η κάμερα που χρησιμοποιείται για την καταγραφή είναι η PCO Pixelfly QE με διαστάσεις 1392 x 1024 pixels βάθους 12 bit. Η εξεταζόμενη περιοχή (Field of View - FOV) του δοκιμίου και στις δύο περιπτώσεις έχει εμβαδό 22 x 15 mm².



Σχήμα 4.9 Συμβολομετρική Διάταξης Πειραμάτων: (α) τομή αντικειμένου στο επίπεδο x - z. Δέσμες λ_2 και λ_3 . Γωνίες πρόσπτωσης θ . (β) Τομή αντικειμένου στο επίπεδο y - z. Δέσμη λ_1 . γωνία πρόσπτωσης θ .

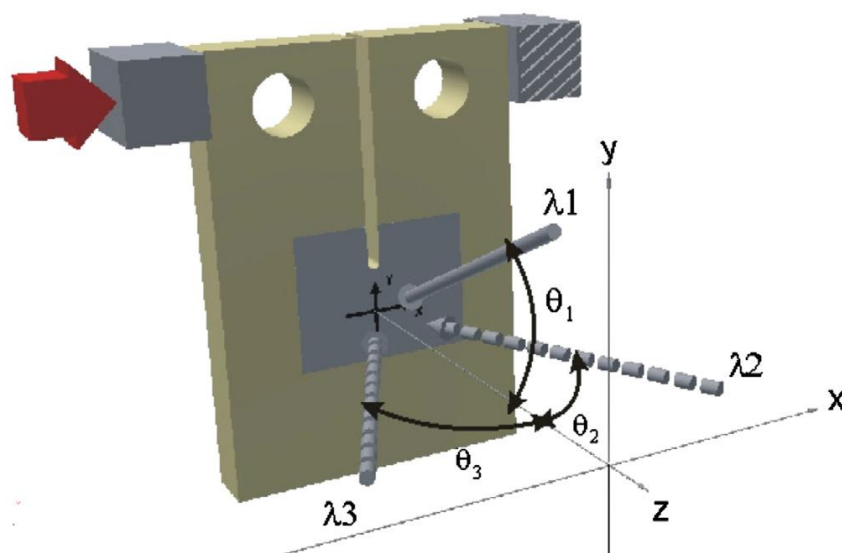
4.4.3. Αποτελέσματα Ανάλυσης Παραμορφώσεων σε Πλάκα Αλουμινίου

Για το πρώτο πείραμα των Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh - Saucedo Anaya και Donato Reyes χρησιμοποιείται πλάκα αλουμινίου διαστάσεων 50 x 70 x 9 mm (M - Y - Π) και μέτρου ελαστικότητας 73 GPa, με λόγο Poisson 0,33 και πυκνότητα 2700 kg/m³. Το δοκίμιο έχει κατακόρυφη σχισμή στο άνω κεντρικό μέρος και υπόκειται σε θλίψη μέσω μηχανικής πρέσας τοποθετημένης εντός της πειραματικής διάταξης. Η μετατόπιση του κινητού στοιχείου της πρέσας, ανάλογη του φορτίου διέγερσης του δοκιμίου υπολογίζεται σταθερά στα 20 μ m και εφαρμόζεται στην άνω αριστερή πλευρά της πλάκας.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Η άνω δεξιά μεριά εφαρμόζει σε ακίνητο στοιχείο της πρέσας. Η εξεταζόμενη περιοχή του δοκιμίου τοποθετείται στην ακμή της σχισμής όπου προβλέπονται οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παραμορφώσεων.

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου χρησιμοποιείται μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο εισάγονται όλες οι φυσικές παράμετροι του στοιχείου, η γεωμετρία της διάταξης, το φορτίο και οι αρχικές συνθήκες του πειράματος. Η μοντελοποίηση της εξεταζόμενης περιοχής κατασκευάστηκε ως τοπικό πλέγμα στο ευρύτερο μοντέλο της πλάκας, έτσι ώστε να εξαχθούν ακριβέστερα και εγκυρότερα αποτελέσματα σχετικά με τις παραμορφώσεις του δοκιμίου. Για το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν 24.000 πεπερασμένα στοιχεία τύπου 45 solid για την προσομοίωση τρισδιάστατου στερεού σώματος με τις χαρακτηριστικές ποσότητες της πλάκας αλουμινίου.

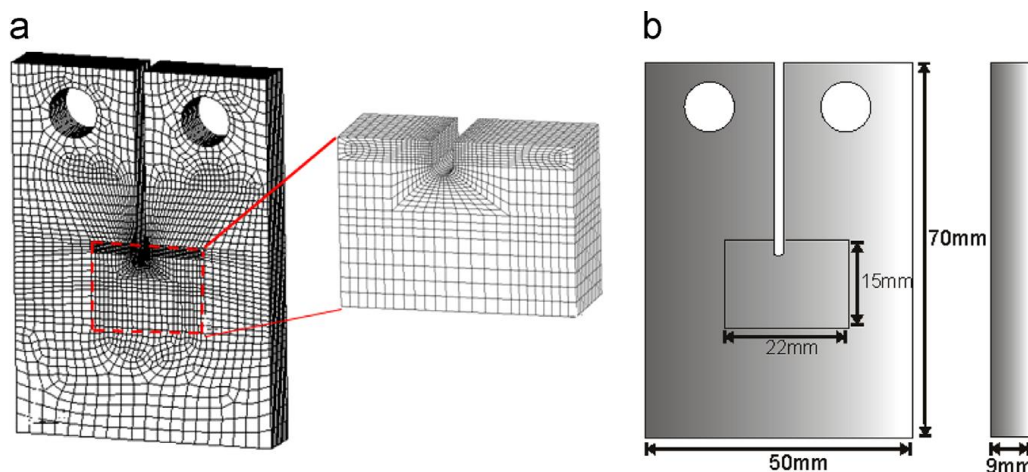


Σχήμα 4.10 Πλάκα αλουμινίου. Δεξιά Πάνω: Σταθερό στοιχείο πρέσας, Αριστερά Πάνω: Ολιπτικό φορτίο και κινητό στοιχείο πρέσας. Μέσον: Κάθετη σχισμή και εξεταζόμενη περιοχή (γκρί χρώμα). Δέσμες αντικειμένου λ_i , γωνίες πρόσπτωσης θ_i και άξονες συντεταγμένων.

Digital holographic interferometer using simultaneously three lasers and a single monochrome sensor for 3D displacement measurements - *Tonatiuh Saucedo-A. , M. H. De la Torre-Ibarra, F. Mendoza Santoyo, Ivan Moreno*

Για την αποδέσμευση των φάσεων συμβολής, αφού το δοκίμιο ολογραφήθηκε στις καταστάσεις αναφοράς και διέγερσης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό pn_srua2 της εταιρίας Phase View Ltd. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συνιστωσών του διανύσματος μετατόπισης.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

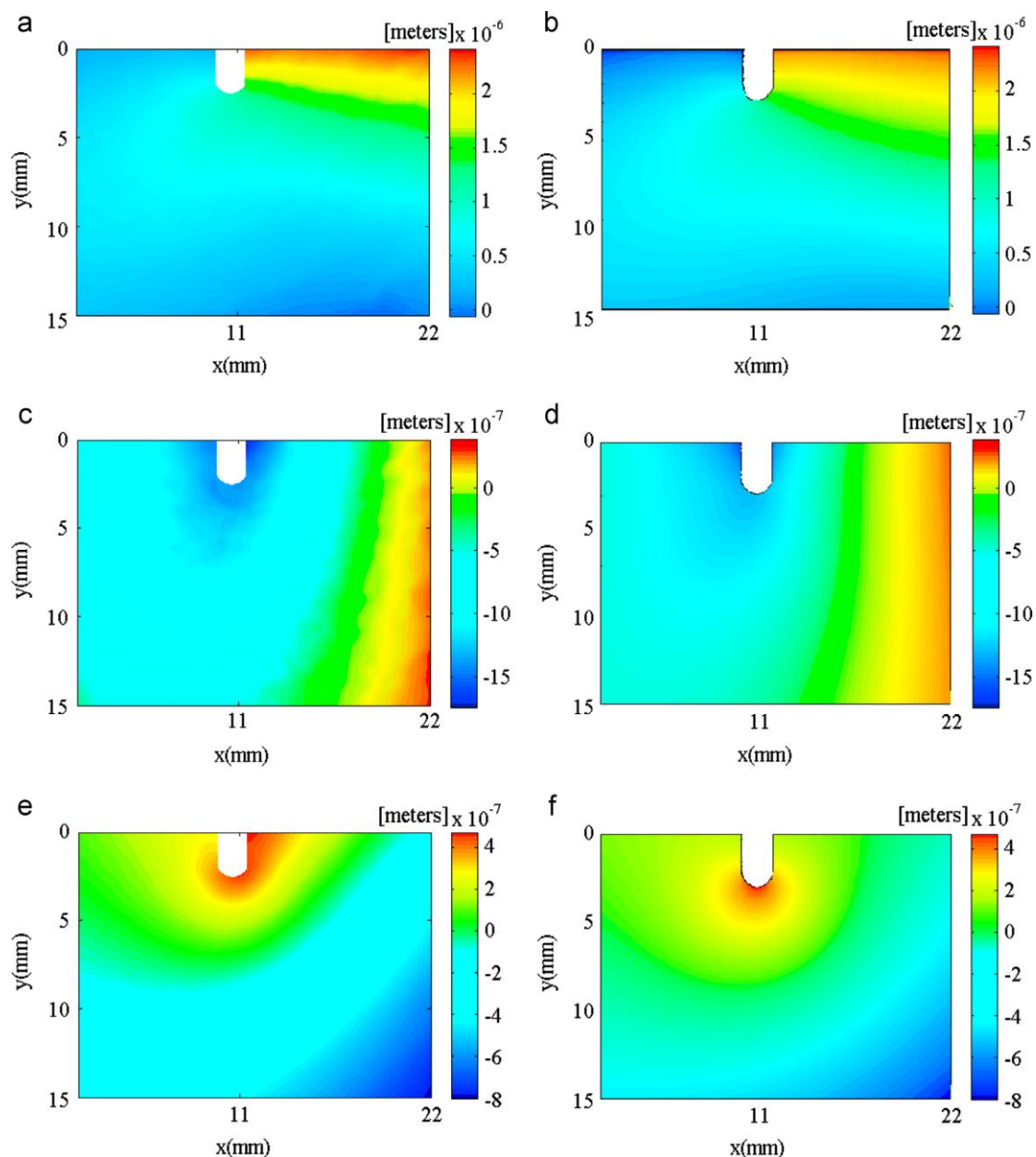


Σχήμα 4.11 (a) Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων - Πλέγμα εξεταζόμενης περιοχής. (b) Διαστάσεις Δοκιμίου

Digital holographic interferometer using simultaneously three lasers and a single monochrome sensor for 3D displacement measurements - *Tonatiuh Saucedo-A. , M. H. De la Torre-Ibarra, F. Mendoza Santoyo, Ivan Moreno*

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζονται ποιοτικά οι συνιστώσες μετατόπισης που εξήχθησαν από την διαδικασία. Οι χρωματική σκάλα που εφαρμόστηκε στα πειραματικά (3D - DHI) και στα αριθμητικά (FEM) αποτελέσματα είναι κοινή προς διευκόλυνση της σύγκρισης. Από την ποιοτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων είναι σαφές πως οι δύο μέθοδοι βρίσκονται σε σημαντική συμφωνία. Εκτός αυτού διαφαίνεται ένα βασικό ελάττωμα της ολογραφίας. Όπως έχει αναφερθεί η μέθοδος χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη ευαισθησία και ακρίβεια. Η ευαισθησία αυτή κοστίζει ως προς τις πειραματικές διατάξεις διότι πολύ παράγοντες επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Είναι φανερό πως κυρίως στα σχήματα (a) και (c) παρατηρείται θόρυβος στις τιμές των μετατοπίσεων. Ο θόρυβος αυτός μεταφράζεται σε χρωματικές διαταραχές. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να προκύπτει από μικροδονήσεις, μικρομετατοπίσεις του δοκιμίου ή από αιωρούμενα σωματίδια σκόνης που μπορεί να παρεμβαίνουν στην διαδρομή των φωτεινών δεσμών. Παρ' όλα αυτά μια αριθμητική σύγκριση ανάμεσα στις δύο μεθόδους λαμβάνει χώρα σε ύψος $y = 10 \text{ mm}$ και τα μέσα σφάλματα που υπολογίζονται για τις συνιστώσες u , v και w είναι αντίστοιχα 3,5%, 7% και 4,9%. Επιπροσθέτως η συνολική μέση διαφορά ανάμεσα σε πειραματικές και αριθμητικές τιμές υπολογίστηκε στο 4,9%.

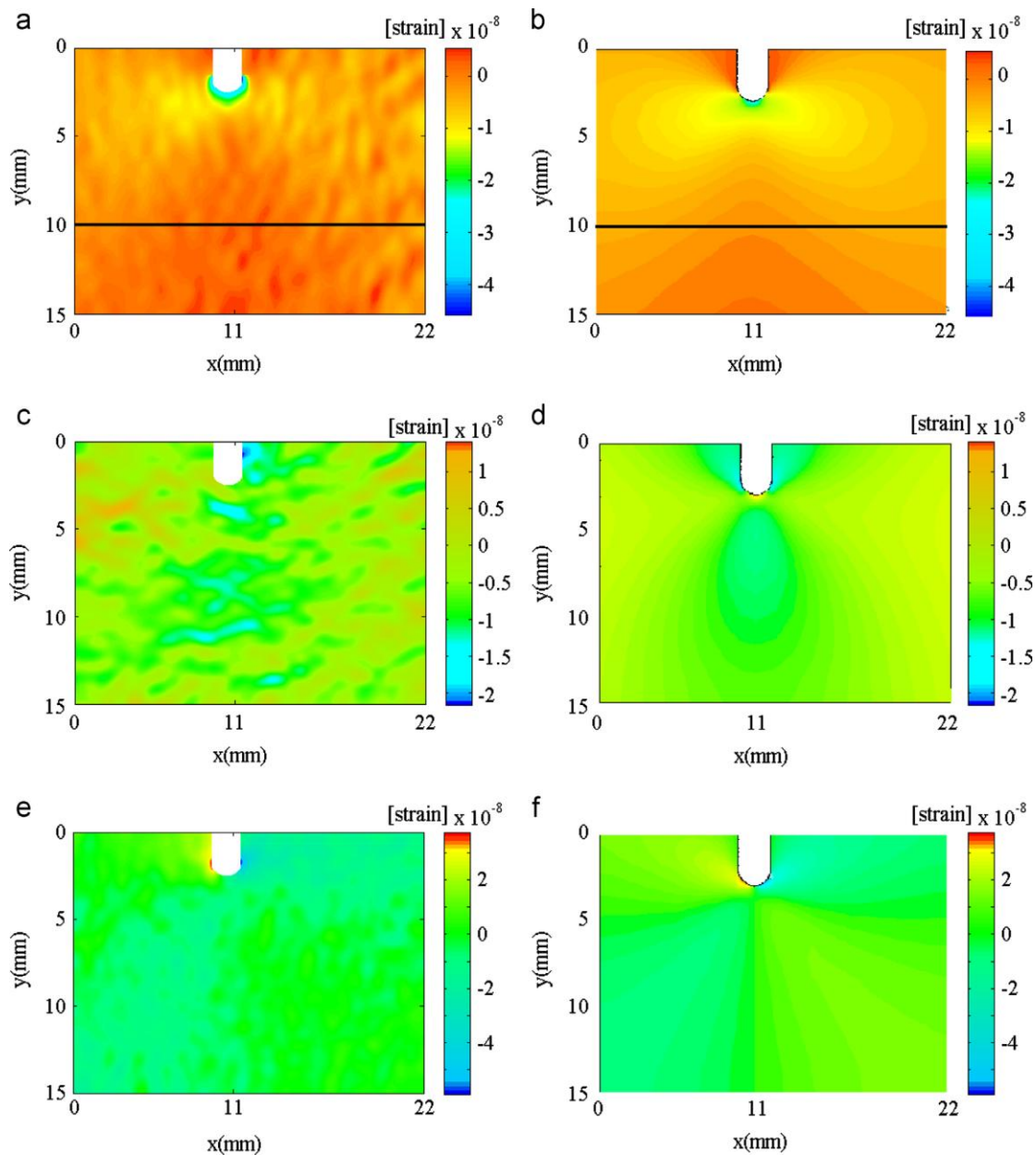
Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων



Σχήμα 4.12 Αποτελέσματα Συνιστωσών Μετατόπισης. Αριστερή Στήλη : Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία. Δεξιά στήλη: Μοντέλο Πεπερασμένων στοιχείων. Επάνω Σειρά: Συνιστώσα u . Μεσαία σειρά: Συνιστώσα v . Κάτω Σειρά: Συνιστώσα w .

Digital holographic interferometer using simultaneously three lasers and a single monochrome sensor for 3D displacement measurements - *Tonatiuh Saucedo-A. , M. H. De la Torre-Ibarra, F. Mendoza Santoyo, Ivan Moreno*

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων



Σχήμα 4.13 Αποτελέσματα Παραμορφώσεων. Αριστερή Στήλη: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία. Δεξιά Στήλη: Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων. Επάνω Σειρά: ϵ_x . Μεσαία Σειρά: ϵ_y . Κάτω Σειρά: γ_{xy} . Στα (a) και (b) η μαύρη γραμμή $y = 10$ mm απεικονίζει τις τιμές που υπολογίζουν τα σφάλματα.

Digital holographic interferometer using simultaneously three lasers and a single monochrome sensor for 3D displacement measurements - Tonatiuh Saucedo-A. , M. H. De la Torre-Ibarra, F. Mendoza Santoyo, Ivan Moreno

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Μετά τον υπολογισμό των μετατοπίσεων ακολουθεί εκείνος των παραμορφώσεων στο επίπεδο της επιφάνειας του δοκιμίου με την προσέγγιση των εξισώσεων [4.18]. Στο σχήμα 4.13 απεικονίζονται, χρησιμοποιώντας κοινή χρωματική σκάλα, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων. Είναι εμφανές πως οι δύο μέθοδοι βρίσκονται σε συμφωνία. Παρ' όλα αυτά παρατηρείται πως ακόμα κι αν η επιφάνεια του δοκιμίου είναι κατά προσέγγιση λεία, όπως αυτή τη πλάκας αλουμινίου, ο εγγενής θόρυβος που εγγράφεται στην ολογραφία, λόγω της τυχαίας κατανομής της επιφάνειας, επηρεάζει τα αποτελέσματα που εξάγονται από τη μέθοδο. Η επιρροή αυτή επιτείνεται όταν η τάξη μεγέθους των μετατοπίσεων είναι ίδια με αυτή των εξωγενών παραγόντων που επηρεάζουν τη διάταξη (μικροδομήσεις κτλ.). Αν και τα αποτελέσματα συμφωνούν ποιοτικά, φαίνεται πως το σφάλμα στον υπολογισμό των μετατοπίσεων μεταφέρεται και στις παραμορφώσεις. Μετρώντας σε κοινό ύψος $y = 10 \text{ mm}$ τα σφάλματα στις παραμορφώσεις ϵ_x , ϵ_y και γ_{xy} υπολογίστηκαν αντίστοιχα σε 14,2%, 23,2% και 17,72%.

Το ερευνητικό σύστημα που παρουσιάστηκε από τους Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh - Saucedo Anaya και Donato Reyes χαρακτηρίζεται από υψηλή υπολογιστική ισχύ, υψηλή ανάλυση κι έναν συνεκτικό μηχανολογικό σχεδιασμό των διατάξεων. Τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν από ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καταδεικνύοντας πως η τρισδιάστατη ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία αποτελεί εύφορο πεδίο μελέτης για την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς. Η μέθοδος παρουσιάζει χαρακτηριστικά ιδανικά για την μελέτη και την εξαγωγή αποτελεσμάτων από φαινόμενα υψηλών ταχυτήτων ή ακόμα και μη επαναλαμβανόμενα, εφόσον η ταχύτητα καταγραφής είναι πολύ υψηλή. Με δύο μόνο εκθέσεις του υπό μελέτη στοιχείου, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων και μάλιστα με φορτίσεις που βρίσκονται σε ασφαλέστατη περιοχή. Το επόμενο στάδιο είναι να εφαρμοστεί σε σύνθετα υλικά που εμφανίζουν ανισότροπες μηχανικές συμπεριφορές ανάλογα την φόρτιση. Η εφαρμογή αυτή λαμβάνει χώρα από τους Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo και Tonatiuh - Saucedo Anaya στο μηριαίο οστό ενός βοοειδούς.

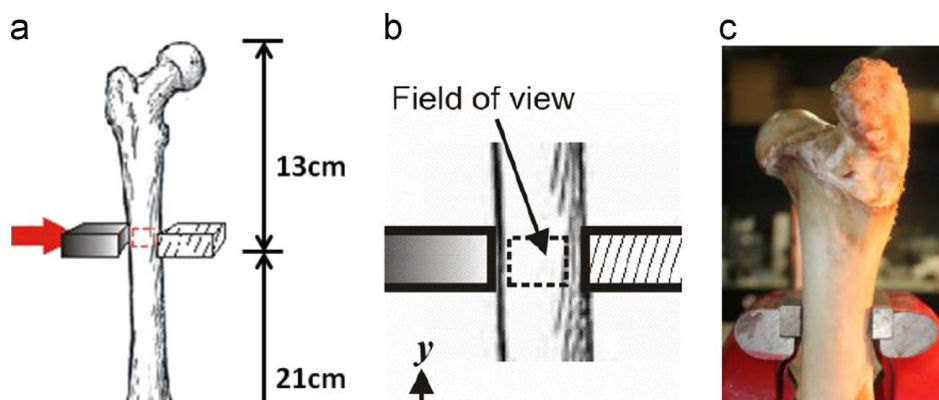
4.4.4. Αποτελέσματα Ανάλυσης Παραμορφώσεων σε Οστικό Ιστό

Η μέθοδος της τρισδιάστατης ολογραφικής συμβολομετρίας ως τώρα έβρισκε κυρίως εφαρμογή σε μηχανολογικά στοιχεία και υλικά. Κι αυτό λόγω τη γνώσης που έχει ήδη αποκτηθεί σε σχέση με τις μηχανικές συμπεριφορές των υλικών αυτών, κυρίως στις ελαστικές περιοχές και την εύκολη πρόσβαση σε μαθηματικά μοντέλα προσέγγισης των φαινομένων. Αντίθετα, υλικά με ανισότροπα χαρακτηριστικά και σύνθετες μηχανικές συμπεριφορές, όπως οι βιολογικοί ιστοί, εμφανίζουν δυσκολίες στην μοντελοποίησή τους, άρα και στην εφαρμογή της μεθόδου.

Παρ'όλα αυτά στην κλίμακα των μικρομετατοπίσεων στην οποία η ολογραφική συμβολομετρία λειτουργεί, δίνεται η δυνατότητα προσέγγισης της μηχανικής συμπεριφοράς των ιστών με όρους ισότροπων χαρακτηριστικών. Ένα οστό αποτελεί δείγμα ανομοιογενούς, σύνθετου υλικού εφόσον αποτελείται από οργανικά και μη οργανικά μέρη και οι μηχανικές του ιδιότητες μεταβάλλονται τοπικά ανάλογα τη διεύθυνση και το μέγεθος του φορτίου που ασκείται. Ωστόσο μια λειτουργική προσέγγιση για το κέλυφος ενός οστού βασίζεται στην ελαστική περιοχή ενός ανισότροπου υλικού, όπως ενός ιξωδοελαστικού υλικού. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την έκφραση των παραμορφώσεων από τις εξισώσεις [4.18].

Το δεύτερο πείραμα των Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo και Tonatiuh - Saucedo Anaya παρουσιάζει την ανάλυση παραμορφώσεων του μηριαίου οστού βοοειδούς. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι ταυτόσημα με τις παραγράφους 4.4.2 και 4.4.3. Το οστό μελετήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο αφορά το εξωτερικό κέλυφος (Cortical Region), όπου εφαρμόστηκε συνεχές θλιπτικό φορτίο με τη χρήση μηχανικής πρέσας στο αριστερό τμήμα του κεντρικού άξονα του οστού. Η δεξιά πλευρά του οστού εφαρμόζει σε ακίνητο στοιχείο της πρέσας. Η εξεταζόμενη περιοχή, όπως ακριβώς και στο πρώτο πείραμα, έχει εμβαδόν $22 \times 15 \text{ mm}^2$.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

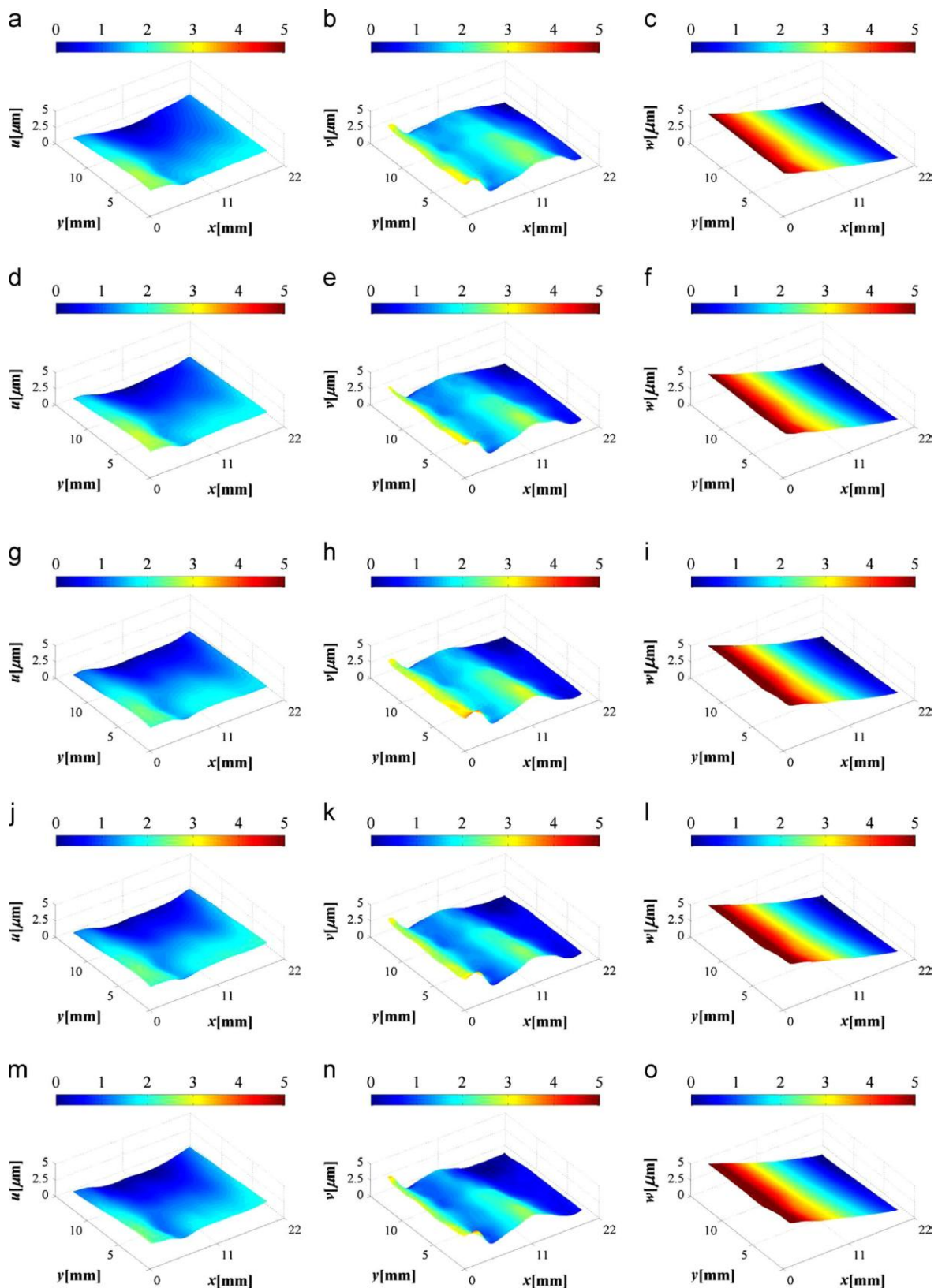


Σχήμα 4.14 Μελέτη εξωτερικού κελύφους μηριαίου οστού βοοειδούς. (a) Σχέδιο στήριξης και φόρτισης - Σημείο εφαρμογής του θλιπτικού φορτίου. (b) Εξεταζόμενη περιοχή. (c) Φωτογραφία οστού στη μηχανική πρέσα

Strain determination in bone sections with simultaneous 3D digital holographic interferometry - *Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh - Saucedo Anaya*

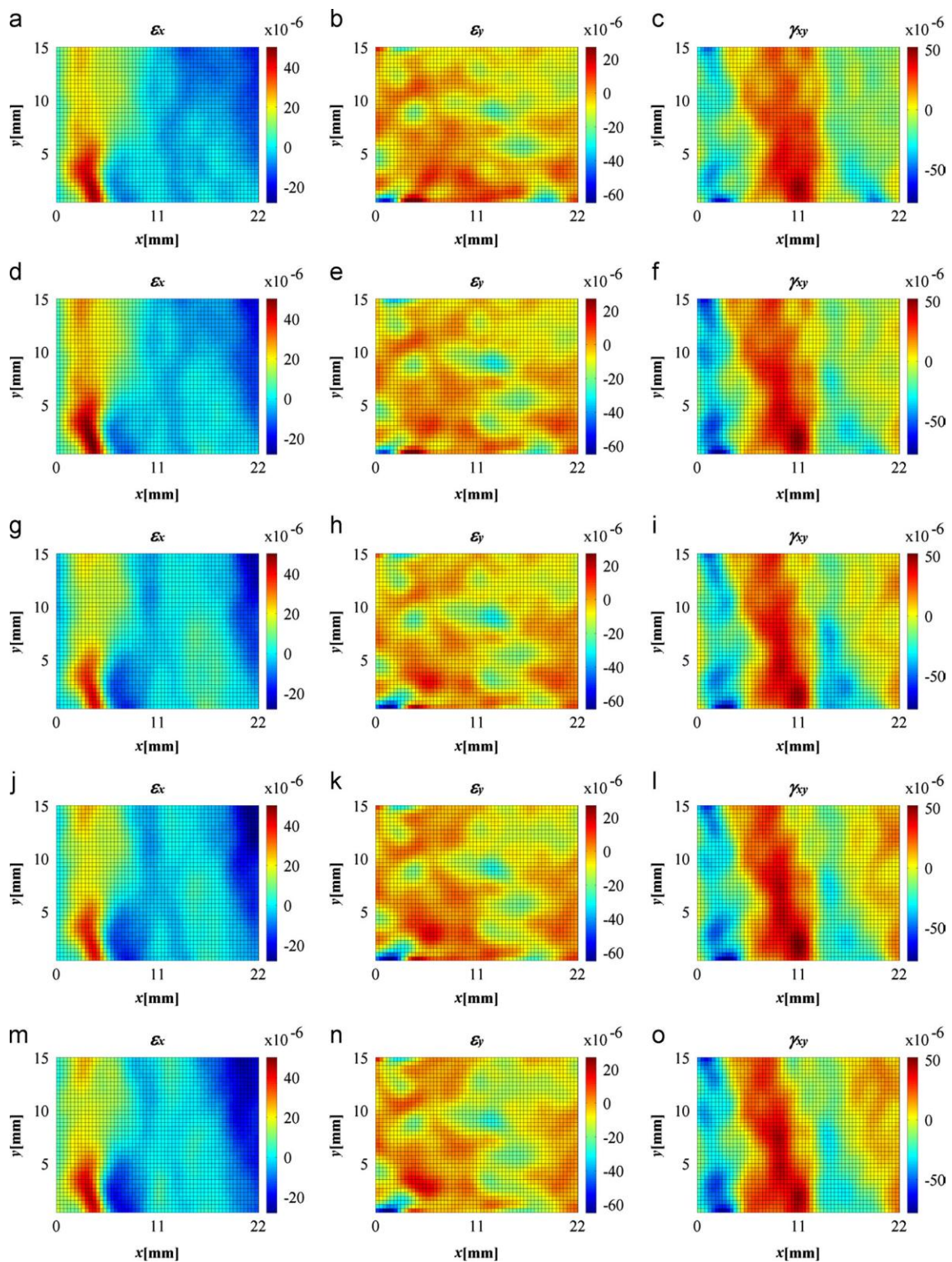
Αφού το κέλυφος ολογραφήθηκε σε πέντε διαδοχικούς χρόνους από την εφαρμογή του θλιπτικού φορτίου, οι φάσεις που ανακτήθηκαν από τα ολογράμματα αφαιρέθηκαν για τον υπολογισμό των φάσεων συμβολής. Έπειτα χρησιμοποιώντας το λογισμικό `pn_srua2` της Phase Vision Ltd οι φάσεις συμβολής αποδεσμεύτηκαν για τον υπολογισμό των συνιστωσών μετατόπισης που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.15. Κατά τον έλεγχο, το οστό παρέμεινε στην ελαστική περιοχή και αυτό επιβεβαιώνεται εφόσον το δοκίμιο ολογραφείται μετά την αποφόρτιση και η φάση συμβολής δεν εμφανίζει κανέναν κροσσό. Η ένδειξη αυτή πιστοποιεί πως δεν υπάρχει καμία πλαστική παραμόρφωση.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων



Σχήμα 4.15 Αποτελέσματα Συνιστωσών Μετατόπισης για το κέλυφος του οστού (τριδιάστατη αποτύπωση). Αριστερή στήλη: Συνιστώσα u . Μεσαία στήλη: Συνιστώσα v . Δεξιά Στήλη: Συνιστώσα w . Κάθε σειρά αποτυπώνει διαδοχικούς χρόνους μετά την φόρτιση του στοιχείου.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων



Σχήμα 4.16 Αποτελέσματα Παραμορφώσεων για το κέλυφος του οστού. Αριστερή στήλη: ϵ_x . Μεσαία στήλη: ϵ_y . Δεξιά στήλη: γ_{xy} . Κάθε σειρά αποτυπώνει διαδοχικούς χρόνους μετά την φόρτιση του δοκιμίου.

Strain determination in bone sections with simultaneous 3D digital holographic interferometry - *Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh - Saucedo Anaya*

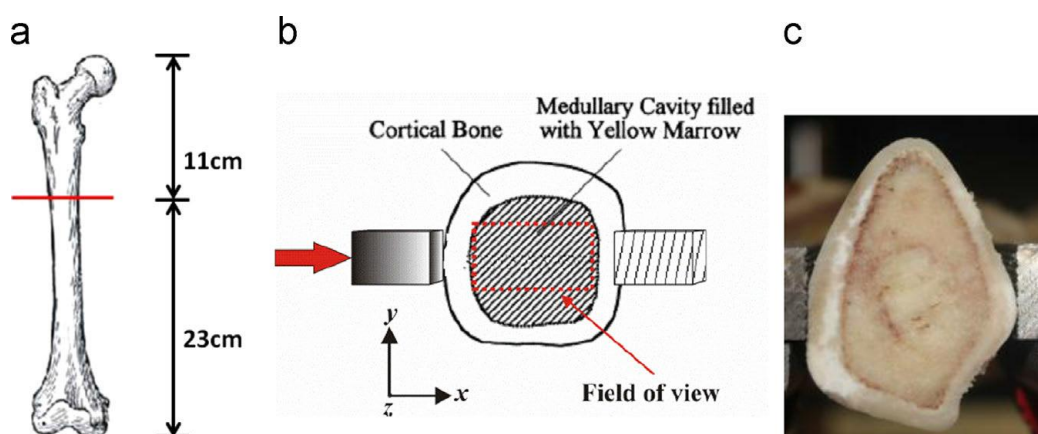
Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων είναι εμφανές πως η συνιστώσα στην διεύθυνση του άξονα x , u , εμφανίζει τις ασθενέστερες τιμές παρά το γεγονός πως το θλιπτικό φορτίο είναι παράλληλο. Η συνιστώσα v εμφανίζει ένα χαρακτηριστικό σταθερό χείλος υψηλότερων τιμών στο σημείο όπου εφαρμόζεται το φορτίο, καθώς και στο κεντρικό κάτω σημείο της εξεταζόμενης περιοχής, ενώ η w , εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές από τις υπόλοιπες συνιστώσες με μια σταδιακή ελάττωση όσο απομακρύνεται από το σημείο εφαρμογής του φορτίου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπολογίζοντας τις συνιστώσες μετατόπισης ουσιαστικά το πείραμα περνά στο επόμενο στάδιο που αφορά στον υπολογισμό των παραμορφώσεων πάνω στην εξεταζόμενη περιοχή του στοιχείου. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται σε τιμές των μετατοπίσεων που περιέχουν θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να ελαττωθεί χρησιμοποιώντας αλγόριθμους που βελτιώνουν το λόγο σήματος - θορύβου (Signal-to-Noise Ratio - SNR). Στο συγκεκριμένο πείραμα εφαρμόστηκε στα αποτελέσματα των μετατοπίσεων αριθμητικό φίλτρο ελάχιστων τετραγώνων για την βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζονται οι αποτυπώσεις των παραμορφώσεων του κελύφους του οστού σε πέντε συνεχόμενους χρόνους από την φόρτιση του δοκιμίου. Είναι εμφανές πως η υψηλότερη συγκέντρωση παραμορφώσεων εμφανίζεται στο κάτω αριστερά μέρος της αποτύπωσης της ορθής παραμόρφωσης ϵ_x . Η διαμητική παραμόρφωση γ_{xy} εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες συνιστώσες παραμόρφωσης.

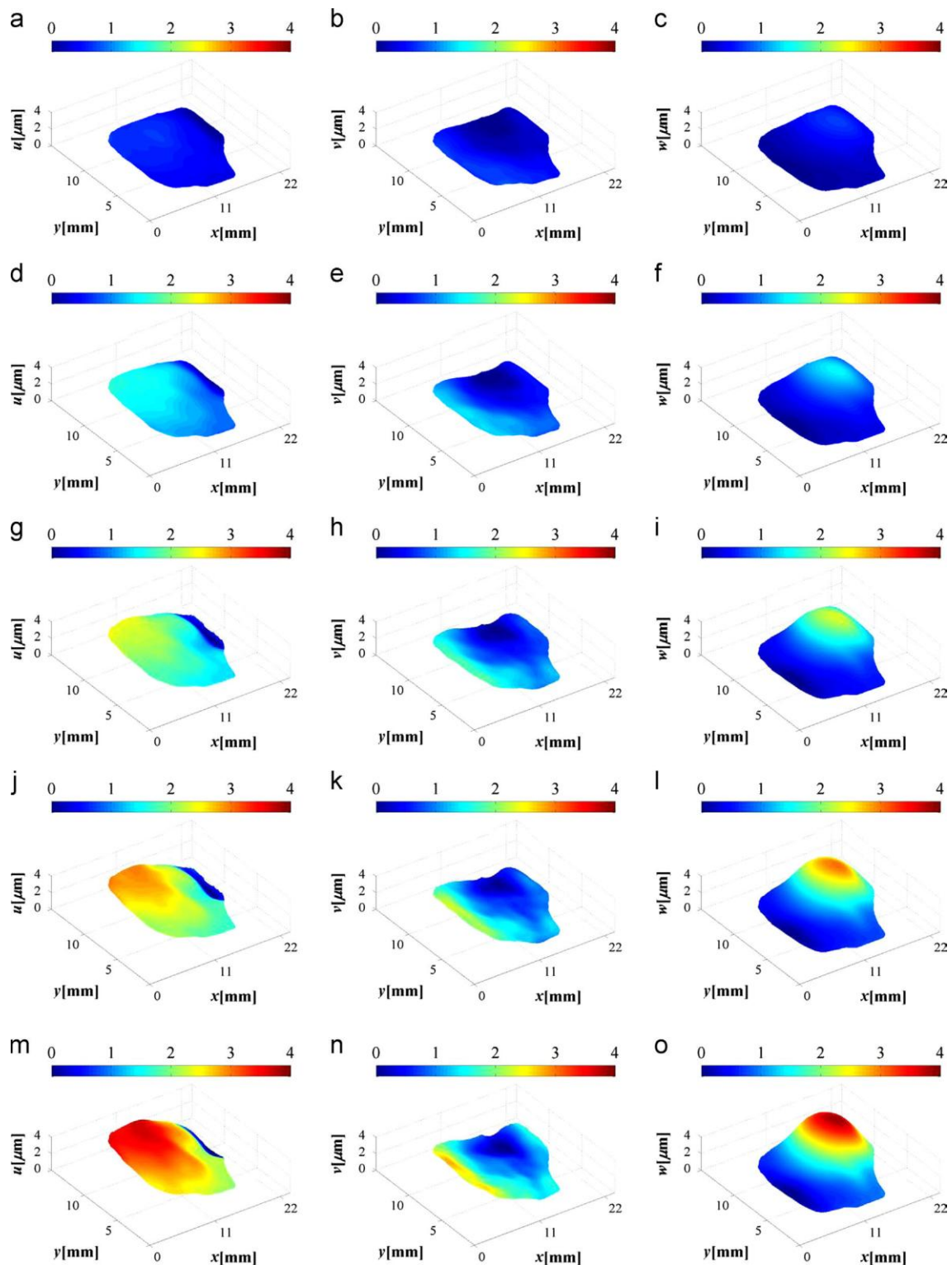
Με την αποτύπωση των παραμορφώσεων του οστικού κελύφους ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο του πειράματος. Στη συνέχεια το οστό κόβεται εγκάρσια σε ύψος 23 cm για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της μυελώδους κοιλότητας (medullary cavity) και του κίτρινου μυελού (yellow marrow) που βρίσκεται στο εσωτερικό της.



Σχήμα 4.17 Μελέτη μυελώδους κοιλότητας μηριαίου οστού βοοειδούς. (α) Σχέδιο εγκάρσιας τομής (β) Σημείο εφαρμογής θλιπτικού φορτίου. Κέλυφος Οστού, Μυελώδης Κοιλότητα και Κίτρινος Μυελός, Εξεταζόμενη Περιοχή (γ) Φωτογραφία εγκάρσιας τομής οστού στη μηχανική πρέσα.

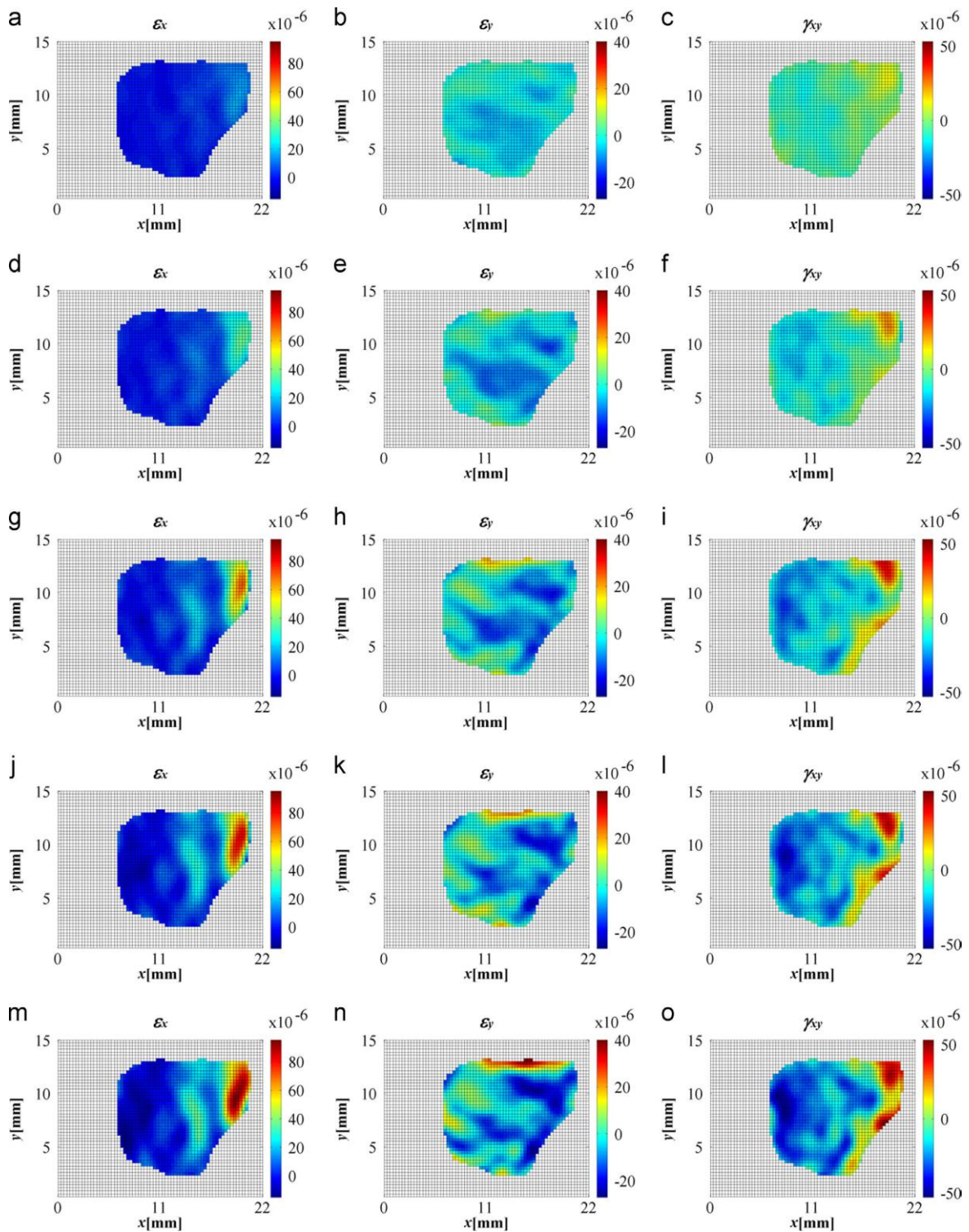
Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται για την αποτύπωση μικρομετατοπίσεων και μικροπαραμορφώσεων έχει ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με την μελέτη του κελύφους.



Σχήμα 4.18 Αποτελέσματα Συνιστωσών Μετατόπισης για τη μυελώδη κοιλότητα (τριδιάστατη αποτύπωση). Αριστερή στήλη: Συνιστώσα u . Μεσαία στήλη: Συνιστώσα v . Δεξιά Στήλη: Συνιστώσα w . Κάθε σειρά αποτυπώνει διαδοχικούς χρόνους μετά την φόρτιση του στοιχείου.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων



Σχήμα 4.19 Αποτελέσματα Παραμορφώσεων για την μυελώδη κοιλότητα. Αριστερή στήλη: ϵ_x . Μεσαία στήλη: ϵ_y . Δεξιά στήλη: γ_{xy} . Κάθε σειρά αποτυπώνει διαδοχικούς χρόνους μετά την φόρτιση του δοκιμίου.

Strain determination in bone sections with simultaneous 3D digital holographic interferometry - *Araceli Sánchez Alvarez, Manuel H. De la Torre Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh - Saucedo Anaya*

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Η αποτύπωση των μετατοπίσεων στην εγκάρσια τομή εμφανίζει πιο δυναμικές συμπεριφορές απ' ό,τι αυτή του κελύφους του οστού, όπως αυτό φαίνεται κυρίως στις συνιστώσες u, v και λιγότερο στην w όπου οι μεταβολές περιορίζονται μονάχα στο μέγεθος και όχι στον τόπο των μετατοπίσεων.

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις, η συμπεριφορά της μυελώδους κοιλότητας εμφανίζει σύνθετες συγκεντρώσεις. Η φόρτιση του κελύφους του οστού μεταφέρεται στη μυελώδη κοιλότητα με τη μορφή πίεσης η οποία ασκείται παράλληλα στον άξονα x . Το αποτέλεσμα της πίεσης είναι η εμφάνιση συκέντρωσης παραμορφώσεων στη διεύθυνση y , όπως φαίνεται στην αποτύπωση της ορθής παραμόρφωσης ϵ_y . Καταδεικνύεται μία ανακατανομή του κίτρινου μυελού, ως αντίδραση στο φορτίο του κελύφους. Οι συνιστώσες ϵ_x και γ_{xy} εμφανίζουν στάσιμες συγκεντρώσεις παραμορφώσεων είτε σταδιακά αυξανόμενου μεγέθους στην πρώτη περίπτωση (ϵ_x), είτε αντίθετων συγκεντρώσεων στις δύο πλευρές του μυελού γ_{xy} .

4.5. Συμπεράσματα

Τα παραπάνω πειράματα μαζί με τα αποτελέσματά τους τεκμηριώνουν το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η μέθοδος της τρισδιάστατης ψηφιακής ολογραφικής συμβολομετρίας όσον αφορά την εφαρμογή της στη μηχανική. Η τεχνική αυτή είναι σύνθετη και πολυπαραγοντική εφόσον διαθέτει ένα αμιγώς εργαστηριακό μέρος κι έπειτα μία αμιγώς ψηφιακή επεξεργασία.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε έχει τρία κύρια θετικά χαρακτηριστικά που επικυρώνονται στα δύο πειράματα: Πρώτον η ταχύτητά της. Η μέθοδος διασφαλίζει όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για τον υπολογισμό των συνιστωσών μετατόπισης με δύο μόνο ολογραφήσεις. Η ολογραφία διπλής έκθεσης (double exposure holography) εξάγει αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, εφόσον υπάρχει δυνατότητα πολύ σύντομου διαστήματος ανάμεσα σε δύο εκθέσεις και σχεδόν αμελητέος χρόνος ανάπτυξης των ολογραμμάτων μέσω των επεξεργαστών. Δεύτερον η ευαισθησία της: Όπως αναφέρθηκε, τα δοκίμια ελέγχονται στην κλίμακα των μικρόμετρων μm . Με τον τρόπο αυτό προσεγγίζονται σύνθετα υλικά σε περιοχές ελαστικότητας που επιτρέπουν την δημιουργία αλγορίθμων για τον υπολογισμό μηχανικών ιδιοτήτων με ασθενέστερες φορτίσεις. Τέλος στο πρώτο πείραμα (πλάκα αλουμινίου) επικυρώνεται η ακρίβεια τη μεθόδου συγκρινόμενη με τα αποτελέσματα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε η ολογραφική συμβολομετρία να χρησιμοποιηθεί στο δεύτερο πείραμα, όπου τα αποτελέσματα και πάλι ελέγχονται με τον ίδιο τρόπο.

Κεφάλαιο 4: Ψηφιακή Ολογραφική Συμβολομετρία για την εκτίμηση παραμορφώσεων

Από τα δύο πειράματα αναδεικνύονται συγχρόνως και τα ελαττώματα της τεχνικής που αποτελούν αντικείμενο περαιτέρω έρευνας. Το κυριότερο από αυτά έχει να κάνει με το πειραματικό σκέλος και με τον εγγενή θόρυβο που παρατηρείται στη διαδικασία της ολογραφίας. Δυστυχώς η ολογραφία απαιτεί ένα συγκεκριμένο περιβάλλον για να λάβει χώρα και αυτό γιατί η ευαισθησία και η υψηλή ανάλυση που πετυχαίνει εξαρτώνται από την σταθερότητα της εργαστηριακής διάταξης (μικροδονήσεις, μικρομετατοπίσεις των δοκιμίων) και την απουσία, όσο το δυνατόν περισσότερη, αιωρούμενων σωματιδίων που δημιουργούν σκεδασμούς στις δέσμες φωτός που χρησιμοποιούνται. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά είναι που εμποδίζουν την ολογραφία να εφαρμοστεί σε δοκίμια εκτός εργαστηρίου και να συνδράμει σε ελέγχους in - situ.

Παρ' όλα αυτά η ψηφιακή επεξεργασία των αποτελεσμάτων δίνει τη δυνατότητα βελτίωσης του θορύβου εφαρμόζοντας φίλτρα και αλγόριθμους στις τιμές των φάσεων με ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Η περαιτέρω έρευνα λοιπόν στοχεύει στην βελτίωση των αλγορίθμων με σκοπό να ελαττωθούν κατά το δυνατόν τα σφάλματα που εντοπίζονται στις πληροφορίες που εκμαιεύονται από τα ολογράμματα και η τρισδιάστατη ψηφιακή ολογραφική συμβολομετρία να εφαρμοστεί σε ακόμα συνθετότερα υλικά για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε σχέση με τις μηχανικές συμπεριφορές και ποσότητες. Η εφαρμογή αυτή βελτιώνει τις δυνατότητες των μη καταστρεπτικών ελέγχων αλλά και των εκτιμήσεων από τα σύνθετα πολυμερή υλικά έως τη βιομηχανική.

Βιβλιογραφία

Για τα κεφάλαιο 1 μελετήθηκαν:

- [1] Thompson Brian J., Interference and Diffraction, *Handbook of Optical Holography*, Caufield H. J. , Academic Press Inc. , New York, 29 - 41, 1979
- [2] Eugene Hecht, Wave Motion, *Optics*, Fifth Edition, Pearson, Harlow, 18 - 44, 2017
- [3] Eugene Hecht, Electromagnetic Theory, Photons, and Light, *Optics*, Fifth Edition, Pearson, Harlow, 45 - 95, 2017
- [4] Eugene Hecht, The Propagation of Light, *Optics*, Fifth Edition, Pearson, Harlow, 96 - 158, 2017
- [5] Eugene Hecht, The Superposition of Waves, *Optics*, Fifth Edition, Pearson, Harlow, 290 - 337, 2017
- [6] Eugene Hecht, Interference, *Optics*, Fifth Edition, Pearson, Harlow, 398 - 456, 2017
- [7] Eugene Hecht, Diffraction, *Optics*, Fifth Edition, Pearson, Harlow, 457 - 541, 2017
- [8] Eugene Hecht, Modern Optics: Lasers and Other Topics, *Optics*, Fifth Edition, Pearson, Harlow, 612 - 676, 2017
- [9] Graham Saxby, Stanislovas Zacharovas, Light Sources for Holography, *Practical Holography*, Fourth Edition, CRC Press, New York, 38 - 80, 2015
- [10] Ulf Schnars, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner, Light Waves, Fundamentals Principles of Holography, *Digital Holography and Wavefront Sensing*, Second Edition, Springer - Verlag, Berlin, 5 - 8, 2015
- [11] Ulf Schnars, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner, Interference, Fundamentals Principles of Holography, *Digital Holography and Wavefront Sensing*, Second Edition, Springer - Verlag, Berlin, 8 - 10, 2015
- [12] Ulf Schnars, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner, Coherence, Fundamentals Principles of Holography, *Digital Holography and Wavefront Sensing*, Second Edition, Springer - Verlag, Berlin, 10 - 15, 2015
- [13] Ulf Schnars, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner, Diffraction, Fundamentals Principles of Holography, *Digital Holography and Wavefront Sensing*, Second Edition, Springer - Verlag, Berlin, 15 - 18, 2015
- [14] (2009), Introduction to Laser Technology, Laser Guide CVI Melles Griot 2009 Technical Guide, 2(1)
- [15] Kirk W. Madison, Lasers: History, properties and applications, *Saturday morning lecture series on Quantum Physics and Chemistry TRIUMF*, University of British Columbia, November 29, 2008

Βιβλιογραφία

Για το κεφάλαιο 2 μελετήθηκαν:

- [16] Martin J. Richardson, John D. Wiltshire, *The Hologram: Principle and Techniques*, First Edition, Wiley, Chichester, 2018
- [17] Graham Saxby, Stanislovas Zacharovas, What is a Hologram?, *Practical Holography*, Fourth Edition, CRC Press, New York, 3 - 16, 2015
- [18] Graham Saxby, Stanislovas Zacharovas, Brief History of Holography, *Practical Holography*, Fourth Edition, CRC Press, New York, 17 - 26, 2015
- [19] Graham Saxby, Stanislovas Zacharovas, Basic Types of Hologram, *Practical Holography*, Fourth Edition, CRC Press, New York, 58 - 74, 2015
- [20] Graham Saxby, Stanislovas Zacharovas, Materials, Exposure and Processing, *Practical Holography*, Fourth Edition, CRC Press, New York, 75 - 103, 2015
- [21] Graham Saxby, Stanislovas Zacharovas, Making your first hologram, *Practical Holography*, Fourth Edition, CRC Press, New York, 103 - 120, 2015
- [22] Stephen A. Benton, V. Michael Bove Jr., Off-Axis “Leith & Upatnieks” Holograms, *Holographic Imaging*, Willey, New Jersey, 2008
- [23] Clark C. Guest, Holography, *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, Academic Press, California, 381 - 392, 2003
- [24] C. Shakher, A. K. Ghatak, HOLOGRAPHY, TECHNIQUES| Overview, *Encyclopedia of Modern Optics*, Elsevier, Amsterdam, 58 - 64, 2005
- [25] H.I. Bjelkhagen, HOLOGRAPHY, APPLICATIONS| Overview, *Encyclopedia of Modern Optics*, Elsevier, Amsterdam, 47 - 57, 2005
- [26] Allan H. Frey, Donnalyn Frey, (1989), Developments in Holography, *Displays*, Elsevier, Amsterdam, 37 - 40, 10(1)
- [27] Peter Binfield, (1992), Modern developments in holography and its materials, *Optics & Laser Technology*, Elsevier, Amsterdam, 24(5)
- [28] Γούλας Δημήτριος, (2012), *Διερεύνηση Μεθόδων Παραγωγής Τρισδιάστατων Χαρτών με την Χρήση της Ολογραφίας και της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Βιβλιογραφία

Για το Κεφάλαιο 3 μελετήθηκαν:

- [29] Ulf Schnars, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner, Digital Holography, *Digital Holography and Wavefront Sensing*, Second Edition, Springer - Verlag, Berlin, 39 - 68, 2015
- [30] Pascal Picart, Micehelle Gross, Pierre Marquet, Basic Fundamentals of Digital Holography, *New Techniques in Digital Holography*, First Edition, Willey and ISTE Ltd, London (UK) and Hoboken (US), 1 - 54, 2015
- [31] Fernando Mendoza, Renfu Lu, Basics of Image Analysis, [*Hyperspectral Imaging Technology in Food and Agriculture*](#), First Edition, Springer, New York, 9-56, 2015
- [32] Melania Paturzo, Vito Pagliarulo, Vittorio Bianco, Pasquale Memmolo, Lisa Miccio, Francesco Merola, Pietro Ferraro, (2018), Digital Holography, a metrological tool for quantitative analysis: Trends and future applications, *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 104, 32 - 47
- [33] J. Watson, HOLOGRPHY, APPLICATIONS| High Resolution Holographic Imaging and Subsea Holography, *Encyclopedia of Modern Optics*, Elsevier, Amsterdam, 37 - 47, 2005
- [34] W. Osten, HOLOGRAPHY, TECHNIQUES| Digital Holography, *Encyclopedia of Modern Optics*, Elsevier, Amsterdam, 79 - 87, 2005

Για το Κεφάλαιο 4 μελετήθηκαν:

- [35] Ulf Schnars, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner, Holographic Interferometry, *Digital Holography and Wavefront Sensing*, Second Edition, Springer - Verlag, Berlin, 25 - 38, 2015
- [36] Ulf Schnars, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner, Digital Holographic Interferometry, *Digital Holography and Wavefront Sensing*, Second Edition, Springer - Verlag, Berlin, 69 - 94, 2015
- [37] Ulf Schnars, Claas Falldorf, John Watson, Werner Jüptner, Digital Holography, *Digital Holography and Wavefront Sensing*, Second Edition, Springer - Verlag, Berlin, 39 - 68, 2015
- [38] M. Di Schiuvà, U. Icardi, E. Miraldi, G. Ruvinetti, (2001), Holographic interferometry assessment of stress distribution in sandwich beams in bending, *Composite part B: Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 175 - 184, 32(3)

Βιβλιογραφία

- [39] F. Vincitorio, L. Bahuer, M. P. Fioruccia, A. J. López, A. Ramil, (2018), Improvement of crack detection on rough materials by digital holographic interferometry in combination with non - uniform thermal loads, *Optics (Optik)*, Elsevier, Amsterdam, 43 - 48, 163
- [40] Vismay Trivendi, Mugdha Joglekar, Swapnil Mahajan, Nimit Patel, Vani Chhaniwal, Bahram Javidi, Arun Anand, (2019), Digital holographic imaging of refractive index distributions for defect detection, *Optics and Laser Technology*, Elsevier, Amsterdam, 439 - 446, 111
- [41] Lilia A. Sanchez, Lee E. Hornberger, (2002), Monitoring of residual stresses in injection molded plastics with holographic interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 27 - 37, 37(1)
- [42] P. Rastogi, HOLOGRAPHY, TECHNIQUES| Holographic Interferometry, *Encyclopedia of Modern Optics*, Elsevier, Amsterdam, 2015, 88 - 98
- [43] C. J. Tay, C. Quan, W. Chen, (2009), Dynamic Measurement by digital holographic interferometry based on complex phasor method, *Optics and Laser Technology*, Elsevier, Amsterdam, 172 - 180, 41(2)
- [44] C. J. Tay, C. Quan, W. Chen, (2009), Determination of displacement derivative in digital holographic interferometry, *Optics Communications*, Elsevier, Amsterdam, 809 - 815, 282(5)
- [45] Haiting Xia, Rongxin Guo, Feng Yan, Heming Cheng, Zhiwei Lin, Qianmin Ma, Fengxian Wang, (2016), Simultaneous measurement of stress-optic constant and stress field of transparent plate by digital holographic interferometry, *Optics (Optik)*, Elsevier, Amsterdam, 11974 - 11981, 127(24)
- [46] Jorge Mauricio Flores-Moreno, Manuel de la Torre-Ibarra, Maria del Socorro Hernandez-Montes, Fernando Mendoza Santoyo, (2020), DHI contemporary methodologies: A review and frontiers, *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 106184, 135
- [47] P. Greguss, (1976), Holographic interferometry in biomedical sciences, *Optics and Laser Technology*, Elsevier, Amsterdam, 153 - 159, 8(4)

Βιβλιογραφία

- [48] Tonatiuh Saucedo - A., M. H. de la Torre-Ibarra, F. Mendoza Santoyo, Ivan Moreno, (2010), Digital holographic interferometry using simultaneously three lasers and a single monochrome sensor for 3D displacement measurements, *Optic Express*, OSA Publishing, Washington D.C., 19867 - 19875, 18(19)
- [49] Maria del Socorro Hernandez-Montes, Fernando Mendoza Santoyo, Silvino Munoz, Manuel de la Torre-Ibarra, Mauricio Flores, Luis Alvarez, (2015), Surface strain-field determination of tympanic membrane using 3D-digital holographic interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 42 - 50, 71
- [50] Araceli Sánchez A. , Manuel de la Torre-Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh Saucedo - A., Donato Reyes R, (2014), Simultaneous 3D digital holographic interferometry for strain measurements validated with FEM, *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 178 - 183, 52
- [51] Araceli Sánchez A. , Manuel de la Torre-Ibarra, Fernando Mendoza Santoyo, Tonatiuh Saucedo - A., (2014), Strain determination in bone sections with 3D digital holographic interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 101 - 108, 57

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας G Ιδιότητες ολογραμμάτων για κάθε παράμετρο ρύθμισης

Όνομασία	Εγγραφή		Διαμόρφωση	Ιδιότητα αντικειμένου προς καταγραφή	Διάταξη
	Μέσον	Τεχνική			Θέση αντικειμένου
Gabor			πλάτους	πλάτος/φάση	
Leith & Upatnieks			πλάτους	πλάτος/φάση	εγγύς
Fresnel					ΕΓΓΥΣ
Fraunhofer					ΜΑΚΡΙΝΗ
Ειδώλου – Επιπέδου					ΕΠΙ ΤΟΥ ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
Μετατροπής Fourier				πλάτος/φάση	ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ FOURIER
Ανάκλασης		ΑΝΑΚΛΑΣΗ	φάσης ή φάσης/πλάτους	πλάτος/φάση	
Έγχρωμο	παχύ			πλάτος/φάση	
Λευκού φωτός	ΠΑΧΥ		φάσης ή φάσης/πλάτους	πλάτος/φάση	
Επιφανειακό λευκού φωτός	λεπτό		φάσης ή φάσης/πλάτους	πλάτος/φάση	
Φάσης			ΦΑΣΗΣ	Φάση ή πλάτος/φάση	
Πολλαπλό - Rainbow	λεπτό		φάσης		ΕΠΙ ΤΟΥ ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Παράρτημα

Ονομασία	Διάταξη		Κύμα εγγραφής		Κύμα Ανασκευής	
	Δέσμη αναφοράς	Εγγραφή	Συμφωνία	Μήκος κύματος	Συμφωνία	Μήκος κύματος
Gabor	Άπειρη απόσταση, ON AXIS		Μερικώς σύμφωνο		Σύμφωνο	
Leith & Upatnieks	OFF AXIS		Σύμφωνο		Σύμφωνο	
Fresnel	ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΕΤΩΠΟ					
Fraunhofer	ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΕΤΩΠΟ					
Ειδώλου – Επιπέδου	Off axis, επίπεδο μέτωπο		Σύμφωνο		Μερικώς σύμφωνο	
Μετατροπής Fourier	Off axis, επίπεδο μέτωπο		Σύμφωνο		Σύμφωνο	
Ανάκλασης			Σύμφωνο			
Έγχρωμο				ΔΥΟ Η ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ		ΔΥΟ Η ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ
Λευκού φωτός					ΑΣΥΜΦΩΝΟ	
Επιφανειακό λευκού φωτός			Σύμφωνο	ΠΟΛΛΑΠΛΑ	ΑΣΥΜΦΩΝΟ	
Φάσης						
Πολλαπλό - Rainbow		ΠΟΛΛΑΠΛΗ	Σύμφωνο		Μερικώς σύμφωνο	ΠΟΛΛΑΠΛΑ

Ο πίνακας Α καταγράφει τις ιδιότητες των βασικών κατηγοριών. Με κεφαλαία καταγράφονται οι χαρακτηριστικές - απαραίτητες ή ειδικές - ιδιότητες κάθε κατηγορίας. Τα κενά μέρη σηματοδοτούν πως η ονομασία δεν ορίζει την παράμετρο.

Παράρτημα

Πίνακας Η Ολογραφικά υλικά εγγραφής και τα χαρακτηριστικά τους

Υλικό	Πάχος (μm)	Φασματική Ευαισθησία (nm)	Ευαισθησία (mJ/cm^2) σε λ (nm)				Ισχύς ανάλυσης (lp/mm)	Μέγεθος κόκκου (nm)
			442	514	663	694		
<i>Διαλύματα αλογονιδίων αργύρου</i>								
<i>Slavich</i>								
Red PFG-01	7	< 700	-	-	80	-	< 3000	35 – 40
Red PFG-03M	7	< 700	-	-	1500	-	< 5000	10 – 20
Green VRP-M	7	< 550	-	80	-	-	< 3000	35 – 40
PanPFG-03C	9	< 400 – 700	1000	2000	1000	-	< 5000	10 – 20
<i>Colourholographic</i>								
RedBB-700	7	< 700	-	-	50	150	< 2500	50 - 60
RedBB-640	7	< 650	-	-	150	-	< 4000	20 – 25
GreenBB-520	7	< 540	150	150	-	-	< 4000	20 – 25
BlueBB-450	7	< 470	150	-	-	-	< 4000	20 – 25
<i>Kodak</i>								
Red131PX	9	< 650	2	-	0.5	-	< 1250	70
Red131CX	9	< 650	2	-	0.5	-	< 1250	70
Red120PX	6	< 750	60	-	40	40	< 2500	58
Red120CX	6	< 750	60	-	40	40	< 2500	50
<i>FilmoTec ORWO</i>								
RedHF65	10	< 650	-	-	1500	-	5000	30
GreenHF53	10	< 550	-	700	-	-	5000	30
Ultimate								
Ultimate15	7	< 700	-	150	150	150	> 5000	15
Ultimate08	7	< 650	120	200	200	-	> 7000	8

Παράρτημα

Υλικό	Πάχος (μm)	Φασματική Ευαισθησία (nm)	Ευαισθησία (mJ/cm ²) σε λ (nm)				Ισχύς ανάλυσης (lp/mm)	Μέγεθος κόκκου (nm)
			442	514	663	694		
<i>Διχρωμικές ζελατίνες DHG</i>								
<i>Slavich</i>								
BluePFG-04	16	< 515	10 ⁵	2×10 ⁵	-	-	10000	-
<i>Filmotec ORWO</i>								
BlueGF40	6/20	*	*	-	-	-	-	-
<i>Θερμοπλαστικά υλικά</i>								
<i>Tavex America</i>								
Pan TCC-2	-	< 800	1	1	1	1	1500	-
<i>Φωτοαντιστατικά Υλικά</i>								
<i>Towne Technologies</i>								
UV BlueShipley 1800	1.5 – 2.4	< 450	1.5×10 ⁵	-	-	-	1000	-
<i>Βακτηριοροδοσίνη (μεμβράνες BR)</i>								
<i>MIB gmbH</i>								
BR-WTB-type	30 – 100	< 650	-	8×10 ⁴	-	-	5000	-
BR-D96NM-type	30 – 100	< 650	3×10 ⁴	-	-	-	5000	-

* τα υλικά διατίθενται χωρίς ευαισθητοποίηση.