

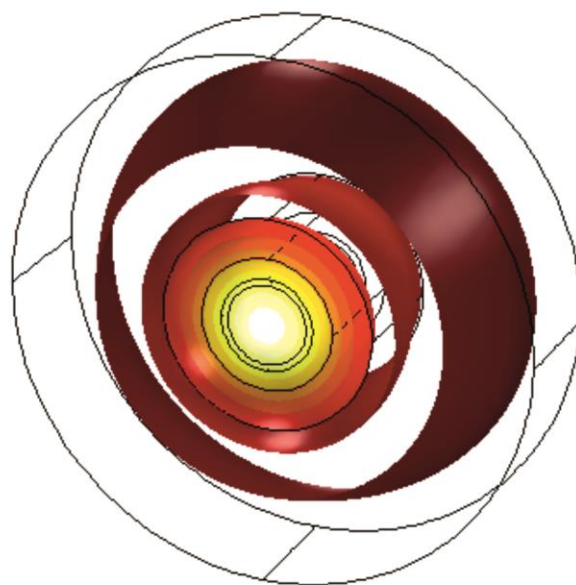


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΑΡΑΞΗΣ
ΜΕ LASER ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



ΕΡΑΣΜΙΑ ΤΣΙΑΦΗ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Η διατριβή της Τσιάφη Ερασμίας (2014019041) με τίτλο «Προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με Laser με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων» εγκρίνεται από

Αντωνιάδης Αριστομένης, Επιβλέπων Καθηγητής

Μπιλάλης Νικόλαος, Καθηγητής

Σταυρουλάκης Γεώργιος, Καθηγητής

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Αριστομένη Αντωνιάδη Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας, ανάπτυξης και συγγραφής της διατριβής μου. Επίσης, ευχαριστώ την Μαρία Παππά, την Χαρά Ευσταθίου και όλη την ομάδα του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης για την υποστήριξή τους κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Ευγνώμων είμαι στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας, για την προσεκτική ανάγνωσή της και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	8
ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	10
1.2 Δομή της εργασίας	10
2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ	12
2.1 Βασικά στοιχεία του Laser	12
2.1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	12
2.1.2 Μηχανισμός Λειτουργίας	13
2.1.3 Ιδιότητες της δέσμης Laser.....	15
2.1.4 Οι τύποι των laser και οι βασικές παράμετροι.....	18
2.2 Διάταξη ταλαντωτή Laser	22
2.3 Εγχάραξη με Laser.....	24
2.3.1 Αρχή Λειτουργίας	24
2.3.2 Βασικές μέθοδοι εγχάραξης.....	25
2.3.3 Τύποι των laser εγχάραξης	26
2.3.4 Κατεργαζόμενα υλικά	28
2.3.5 Εφαρμογές των laser	30
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	32
3.1 Εισαγωγή	32
3.2 Θεωρητική ανάλυση του μοντέλου θερμικού πεδίου	32
3.2.1 Υπολογισμός του θερμικού πεδίου	33
3.2.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (HMA).....	35
3.2.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	37
3.2.4 Οπτική.....	38
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	40
4.1 Κέντρο κατεργασίας LASERTEC 40.....	40
4.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής	40
4.1.2 Χαρακτηριστικά της δέσμης του laser χάραξης.....	41
4.1.3 Λογισμικά εργαλειομηχανής LASERTEC 40.....	42
4.2 Πρόγραμμα προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (COMSOL Multiphysics).....	49
5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΓΧΑΡΑΞΗΣ	51
5.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	51

5.1.1	Μέθοδοι Rayleigh - Ritz και Galerkin	52
5.1.2	Μέθοδοι Lagrange Euler και ALE	53
5.2	Μοντέλο Προσομοίωσης	55
5.2.1	Δημιουργία μοντέλου.....	55
5.2.2	Προσδιορισμός υλικού	57
5.2.3	Ορισμός πεδίου επίλυσης	59
5.2.4	Δημιουργία πλέγματος	62
5.2.5	Επίλυση του μοντέλου.....	65
6.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	66
7.	ΣΥΝΟΨΗ	70
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71
9.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	73

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2. 1: Μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας: ακτίνες γ, ακτίνες x, υπεριώδεις, ορατό φως, υπέρυθρο, μικροκύματα, ραδιοκύματα	12
Σχήμα 2. 2: Διαγραμματική διάταξη του laser ρουβιδίου	13
Σχήμα 2. 3: (α) απορρόφηση (β) αυθόρμητη εκπομπή (γ) εξαναγκασμένη εκπομπή.....	14
Σχήμα 2. 4: Μονοχρωματική ακτινοβολία	15
Σχήμα 2. 5: Μέτωπα σφαιρικών επιπέδων κυμάτων.....	16
Σχήμα 2. 6: Μερική χρονική συμφωνία με χρόνο συμφωνίας t_0	16
Σχήμα 2. 7: Διαγραμματική απεικόνιση της κατευθυντικότητας της δέσμης στο εσωτερικό της διάταξης του laser	17
Σχήμα 2. 8: Ενεργειακές καταστάσεις ενός laser ρουβιδίου	19
Σχήμα 2. 9: Διάγραμμα δομής ενός αερίου laser He-Ne	20
Σχήμα 2. 10: Απλοποιημένο διάγραμμα των τμημάτων της δέσμης του laser.....	22
Σχήμα 2. 11: Σύγκριση των δύο μεθόδων χάραξης.....	26
Σχήμα 2. 12: Διαγραμματική διάταξη ενός laser CO ₂	26
Σχήμα 2. 13: Διαγραμματική απεικόνιση ενός Nd: YAG laser	27
Σχήμα 2. 14: Διαγραμματική διάταξη ενός fiber laser.....	28
Σχήμα 3. 1: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής διατήρησης της ενέργειας για μια στιγμή	32
Σχήμα 3. 2: Διατήρηση ενέργειας στον στοιχειώδη όγκο dV	34
Σχήμα 3. 3: Κυματικό μοντέλο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	35
Σχήμα 3. 4: Διδιάσταση διαγραμματική απεικόνιση του ηλεκτρικού διανύσματος.....	35
Σχήμα 3. 5: Διαγραμματική απεικόνιση των ιδιοτήτων εκπομπής και απορροφητικότητας ενός σώματος.....	38
Σχήμα 4. 1: Εργαλειομηχανή χάραξης LASERTEC 40	40
Σχήμα 4. 2: Τα βασικά μέρη του θαλάμου κατεργασίας	41
Σχήμα 4. 3: Διαγραμματική απεικόνιση της λειτουργίας διακόπτη Q	42
Σχήμα 4. 4: Διαγραμματική απεικόνιση του μηχανισμού λειτουργίας της εργαλειομηχανής	42
Σχήμα 4. 5: Προσδιορισμός της αρχής των αξόνων πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου	43
Σχήμα 4. 6: Έλεγχος και αφαίρεση τριγώνων	44
Σχήμα 4. 7: Παράθυρο παραμέτρων Carving Options	45
Σχήμα 4. 8: Διαγραμματική απεικόνιση της περιοχής εισαγωγής των border cuts	45
Σχήμα 4. 9: Προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης μέσω του λογισμικού L4D Viewer	46
Σχήμα 4. 10: Περιβάλλον λογισμικού LaserSoft 3D	46
Σχήμα 4. 11: Επιλογή του σημείου μηδέν στο δοκίμιο	47
Σχήμα 4. 12: Παράμετροι του technology	48
Σχήμα 4. 13: Μηδενισμός του επιπέδου στον άξονα Z με την χρήση του probe.....	48
Σχήμα 5. 1: Επιλογή πεδίου φυσικής του μοντέλου και ρύθμιση του τύπου επίλυσης.....	56
Σχήμα 5. 2: Δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου	56
Σχήμα 5. 3: Καμπύλη της δέσμης του laser	59
Σχήμα 5. 4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του προφίλ της δέσμης του laser	60
Σχήμα 5. 5: Προσδιορισμός της ροής θερμότητας στο δοκίμιο	61
Σχήμα 5. 6: Ρύθμιση παραμέτρων της μεθόδου ALE.....	61
Σχήμα 5. 7: Οι τέσσερις τύποι τρισδιάστατων στοιχείων	62
Σχήμα 5. 8: Είδη συμμετρίας (Fagan)	62
Σχήμα 5. 9: Διακριτοποίηση με μικρό αριθμό πλεγμάτων	63
Σχήμα 5. 10: Διακριτοποίηση με μεγάλο αριθμό πλεγμάτων.....	63
Σχήμα 5. 11: Ιστόγραμμα της ποιότητας των στοιχείων του κεντρικού domain	64
Σχήμα 5. 12: Ιστόγραμμα της ποιότητας των στοιχείων της γεωμετρίας του δοκιμίου	65
Σχήμα 5. 13: Ρύθμιση των παραμέτρων της επίλυσης.....	65
Σχήμα 6. 1: Αποτύπωση κατανομής της θερμοκρασίας για τη χρονική στιγμή 0,1 sec	66
Σχήμα 6. 2: Αποτύπωση κατανομής της θερμοκρασίας μετά το πέρας της κατεργασίας (t=1sec)	67
Σχήμα 6. 3: Αποτύπωση διαβάθμισης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου κατά τους άξονες yz.....	67
Σχήμα 6. 4: Αποτύπωση διαβάθμισης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου κατά τους άξονες xy.....	68

Σχήμα 6. 5: Αποτύπωση κατανομής της θερμοκρασίας για παλμό ισχύος 40 Watt.....	68
Σχήμα 6. 6: Ισοθερμικές καμπύλες της ροής θερμότητας.....	69
Σχήμα 6. 7: Αφαίρεση στοιχείων από όγκο του δοκιμίου	69

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2. 1: Σύγκριση των laser He-Ne με τις συμβατικές πηγές.....	17
Πίνακας 2. 2: Τύποι των excimer laser	20
Πίνακας 2. 3: Βασικές παράμετροι τυπικών συστημάτων laser.....	22
Πίνακας 3. 1: Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων	36
Πίνακας 3. 2: Φασματοσκοπικές τεχνικές βασιζόμενες στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	37
Πίνακας 5. 1: Ρύθμιση των παραμέτρων του προβλήματος.....	57
Πίνακας 5. 2: Τιμές ιδιοτήτων αλουμινίου που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα.....	58
Πίνακας 5. 3: Χαρακτηριστικά των στοιχείων του κεντρικού domain	64
Πίνακας 5. 4: Τύπος και χαρακτηριστικά των στοιχείων όλης της γεωμετρίας.....	64

ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ

HMA	Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία
HM	Ηλεκτρομαγνητικό
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian
BEM	Boundary elements method
CAD	Computer-aided design
CBN	Cubic boron nitride
CCD	Charge-coupled device
CW	Continuous wave ή continuous waveform
DPI	Dots per inch
EMF	Extreme high frequencies
ESR	Electron spin resonance
FEM	Finite element method
FDM	Finite differences method
FVM	Finite volume method
HF	High frequencies
LAZ	Laser – Affected Zone
LF	Low frequencies
MF	Medium frequencies
NMR	Nuclear magnetic resonance
PCD	Polycrystalline diamond
PDEs	Partian differential equations
PPI	Pixels per inch
RF	Radio frequency
SHF	Super high frequencies
UHF	Ultra high frequencies
UV	Ultraviolet radiation
VHF	Very high frequencies
VLf	Very low frequencies
YAG	Yttrium Aluminum Garnet

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια της απόκτησης του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (ΜΔΕ) στον κλάδο των Συστημάτων Παραγωγής (Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης), είναι η προσομοίωση του μηχανισμού φωτοαποδόμησης μεταλλικών υλικών με την μέθοδο της εγχάραξης (laser engraving), λόγω της αλληλεπίδρασής τους με την ακτινοβολία laser. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την πληρέστερη και λεπτομερέστερη διερεύνηση διαφόρων πτυχών του φαινομένου αυτού. Η αφαίρεση υλικού με την χρήση δέσμης laser είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα κατεργασία, η οποία συνεχώς εξελίσσεται και τα τελευταία χρόνια βρίσκει σπουδαία εφαρμογή σε ένα πολύ μεγάλο εύρος από εργαστηριακές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Η κοπή αποτελεί μια από τις αρχαιότερες μεθόδους διαμόρφωσης και κατεργασίας των υλικών. Παράλληλα, αποτελεί βασική μηχανουργική κατεργασία, καθώς τα προϊόντα της χρησιμοποιούνται σε κάθε στάδιο της βιομηχανικής παραγωγής. Η ποιότητα των προϊόντων αυτών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την μέθοδο και το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται κατά την κατεργασία. Στις συμβατικές μηχανουργικές μεθόδους κοπής συχνά δημιουργούνται καταστροφές λόγω θερμικών φαινομένων όπως είναι η τριβή. Αντίθετα, με τη χρήση εργαλειομηχανών laser απορροφάται ενέργεια από τις εξωτερικές στοιβάδες του υλικού, χωρίς να πραγματοποιείται διάδοση της θερμότητας στο υλικό. Η αφαίρεση υλικού με laser έχει τη δυνατότητα να επιτύχει πολύ υψηλή ακρίβεια κοπής και να οδηγήσει σε επιφάνειες με πολύ ικανοποιητικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την ποιότητά τους. Παρ'όλα αυτά, παρουσιάζει ένα εμφανές μειονέκτημα ως προς τη μερική αλλοίωση της δομής και των ιδιοτήτων του υλικού, καταλήγοντας με τον τρόπο αυτό σε δημιουργία προϊόντων κατεργασίας με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα επιθυμητά.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η χάραξη μεταλλικών υλικών κράματος αλουμινίου. Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης δημιουργείται ένα μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με laser με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο αυτό στοχεύει να προσομοιώσει με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια ολόκληρη την κατεργασία της χάραξης ενός μετάλλου, σε συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας. Πρακτικά, στόχος της εργασίας είναι η αξιοποίηση και η ενδελεχής κατανόηση του μηχανισμού χάραξης με laser, έτσι ώστε να διερευνηθούν τα βέλτιστα αποτελέσματά του και οι τομείς στους οποίους βρίσκει εφαρμογή.

1.2 Δομή της εργασίας

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στην εργασία μέσω της παρουσίασης του βασικού αντικείμενου και της δομής της.

Το κεφάλαιο 2 αποτελεί το θεωρητικό μέρος της εργασίας όπου παραθέτονται ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία, τα οποία θα διευκολύνουν την κατανόηση της ανάλυσης των στοιχείων που παρουσιάζονται μετέπειτα. Επίσης, παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική έρευνα για τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έως τώρα και αφορούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται μια περιγραφή του θεωρητικού μοντέλου της προσομοίωσης. Αναλύονται τα επιμέρους φυσικά πεδία (Physics) που επηρεάζουν την αρχή λειτουργίας μιας εργαλειομηχανής laser engraver.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης που χρησιμοποιείται ως πρότυπο για την μοντελοποίηση της μηχανουργικής κατεργασίας χάραξης. Επίσης, πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή του λογισμικού COMSOL Multiphysics που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του προσομοιωτικού μοντέλου.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού COMSOL Multiphysics 5.0, αναλύοντας τα βήματα από την δημιουργία του δοκιμίου, την ρύθμιση των παραμέτρων μέχρι την επίλυση του προβλήματος. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και η προσαρμοστικότητά της ως αριθμητική μέθοδος σε τέτοιου είδους εφαρμογές.

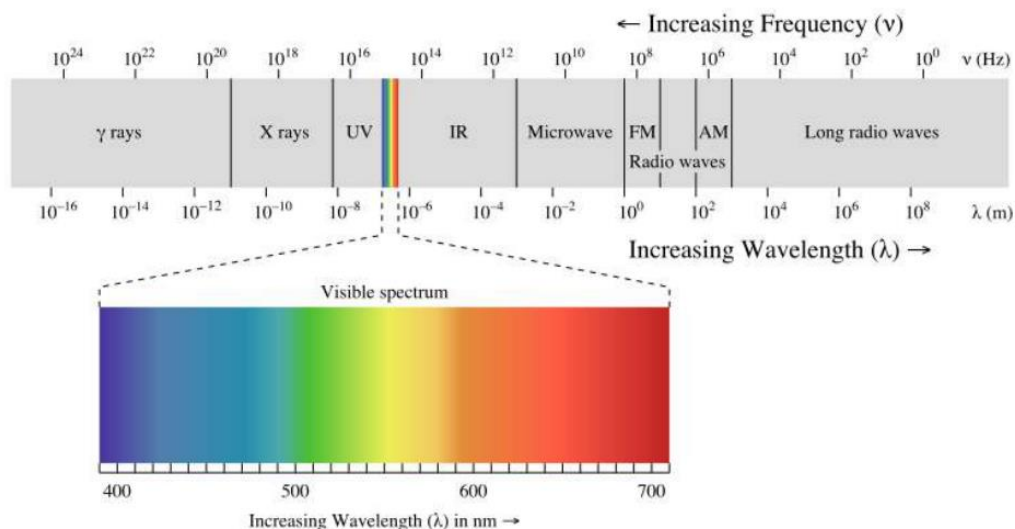
Στο 6 κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

2.1 Βασικά στοιχεία του Laser

Το φως αποτελεί μια συνιστώσα διαφόρων ακτινοβολιών διαφορετικής συχνότητας, οι οποίες καθορίζουν τα διαφορετικά χρώματα όπως αυτά γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι. Παρότι στη φύση δεν υπάρχει μονοχρωματική ακτινοβολία, στον επιστημονικό κλάδο έχει δημιουργηθεί μια μοναδική διάταξη η οποία παράγει μονοχρωματική ακτινοβολία ή αλλιώς μια δέσμη φωτός ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος, υψηλής έντασης η οποία ονομάζεται laser.

Συγκεκριμένα, το laser είναι μια συσκευή η οποία εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μέσω μιας δέσμης φωτός, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της οπτικής ενίσχυσης, η οποία βασίζεται στην πρόκληση εκπομπής φωτονίων. Αποτελεί το βασικό δομικό συστατικό των τεχνολογιών για την παραγωγή σύντομων παλμών φωτός. Η λέξη laser προέρχεται από τα αρχικά του όρου που περιγράφεται ως η ενίσχυση φωτός από την εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας ή αλλιώς όπως αναφέρεται διεθνώς “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, ένας όρος που καθιερώθηκε από τον Gordon Gould το 1959. Στον παραπάνω ορισμό με τον όρο «φως» προσδιορίζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία οποιασδήποτε συχνότητας δίχως να περιορίζεται μόνο στην περιοχή του ορατού φωτός (390 – 750 nm), αλλά και σε περιοχές μεγαλύτερου (υπέρυθρες, μικροκύματα, ραδιοκύματα) και μικρότερου (υπεριώδεις, ακτίνες X) μήκους κύματος. Επιπροσθέτως, ο όρος laser χρησιμοποιείται για την περιγραφή τόσο των συσκευών όσο και της αντίστοιχης ακτινοβολίας που αυτές παράγουν. Συνεπώς, υπάρχουν laser ποικίλων μορφών πέραν του ορατού φωτός, όπως για παράδειγμα ακτίνων X, υπεριώδους ή υπέρυθρης ακτινοβολίας κ.λ.π. όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Η λειτουργία του laser ερμηνεύεται από τη θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής.



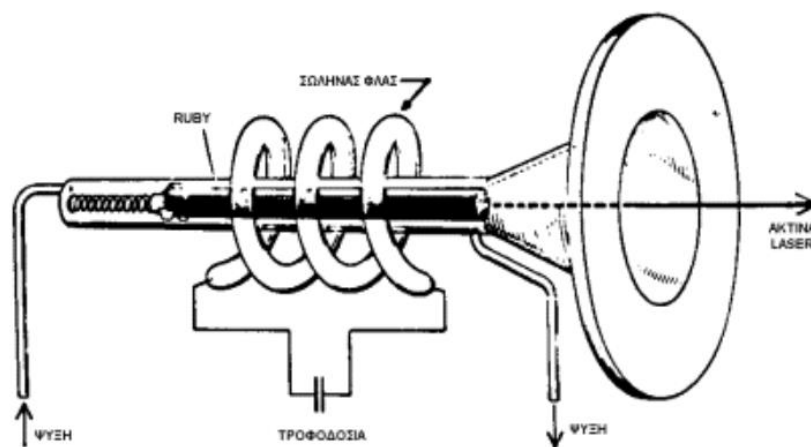
Σχήμα 2. 1: Μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας: ακτίνες γ , ακτίνες x, υπεριώδεις, ορατό φως, υπέρυθρο, μικροκύματα, ραδιοκύματα

Κύριο χαρακτηριστικό του laser αποτελεί η πηγή η οποία παρέχει το απαιτούμενο ποσοστό ενέργειας προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διέγερση. Επιπροσθέτως, βασικά χαρακτηριστικά του laser είναι ο μεγάλος βαθμός σύγκλησης, δηλαδή το γεγονός ότι η δέσμη φωτός μπορεί να εστιάσει σε μικροσκοπικές περιοχές προκαλώντας με τον τρόπο αυτό έντονη ακτινοβολή, καθώς επίσης και να φτάσει σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Το δεύτερο χαρακτηριστικό του είναι η μονοχρωματικότητά του, καθώς εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μιας συχνότητας. Διαφορετικές συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν σε διαφορετικές συχνότητες.

2.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Τα πρώτα θεμέλια για την ανάπτυξη της θεωρίας του ενισχυτή φωτός τέθηκαν το 1916, όταν ο Albert Einstein ερευνήσε την δυνατότητα ύπαρξης της εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας,

στην οποία βασίζεται η λειτουργία του laser. Δηλαδή, έθεσε την παραδοχή ότι μια δέσμη φωτός μπορεί να εξαναγκάσει άτομα να προβούν σε εκπομπή φωτός διατηρώντας τα χαρακτηριστικά της αναλύωτα. Παρ'όλα αυτά, από το 1920 έως το 1950 ο επιστημονικός τομέας εστίασε σε νέες ανακαλύψεις της κβαντομηχανικής, της φυσικής των σωματιδίων και της πυρηνικής φυσικής έχοντας ως αποτέλεσμα την παραμέληση της υλοποίησης της κατασκευής του laser. Τελικά, έπειτα από ένα σημαντικό πείραμα που έλαβε χώρα το 1960 στα εργαστήρια της Hughes Aircraft Corporation στο Μαλιμπού της Καλιφόρνια, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του πρώτου laser. Η πειραματική διάταξη ήταν αρκετά απλουστευμένη. Αποτελούνταν από έναν συνθετικό κρύσταλλο ρουβιδίου (Ruby), μήκους 2 και διαμέτρου 9 mm αντίστοιχα, με γυαλισμένες οπτικά τις δύο έδρες του και επιστρωμένες με άργυρο, ο οποίος ήταν τοποθετημένος εντός ενός ελικοειδούς σωλήνα φλας. (Σχήμα 2.2). Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το φλας τέθηκε σε λειτουργία, λούζοντας με αυτό τον τρόπο με πολυχρωματικό φως τον κρύσταλλο και είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή μιας πολύ λεπτής δέσμης από κόκκινο μονοχρωματικό φως με μήκος κύματος στα 694,3 nm. Αυτή ήταν η πρώτη επιτυχής λειτουργία μιας διάταξης laser.



Σχήμα 2. 2: Διαγραμματική διάταξη του laser ρουβιδίου

Η ανακάλυψη αυτή οφείλεται στον T.H.Maiman, παρά το γεγονός ότι η κατασκευή του πρώτου ενισχυτή ακτινοβολίας είχε πραγματοποιηθεί σε προγενέστερα χρόνια με πρωτοπόρους τους C.H.Townes στις Ηνωμένες πολιτείες, A.M.Prokhorov και N.Basov στη Σοβιετική ένωση, οι οποίοι και μοιράστηκαν το Nobel φυσικής για την εφεύρεσή τους αυτή το 1964. Έξι μήνες αργότερα από την ανακάλυψη του laser ρουβιδίου, επετεύχθει η παραγωγή ακτινοβολίας laser από μείγμα αερίων He – Ne, από τον A.Javan και τους συνεργάτες του. Έπειτα, το κατά το τέλος του 1962 οι ομάδες των M.I.Nathan, R.N.Hall και T.M.Quist ολοκλήρωσαν επιτυχώς την εκπομπή ακτινοβολίας laser από ημιαγωγό. Τις δεκαετίες που ακολούθησαν υπήρξε ραγδαία εξέλιξη των συσκευών laser, οι οποίες στην σημερινή εποχή βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς επιστημονικούς και βιομηχανικούς κλάδους.

2.1.2 Μηχανισμός Λειτουργίας

Το laser εκμεταλλεύεται τρία βασικά φαινόμενα που συμβαίνουν, όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αλληλεπιδρά με ένα υλικό, δηλαδή τις διεργασίες της αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής και τη διεργασία της απορρόφησης, που θα παρουσιαστούν ακολούθως.

Απορρόφηση

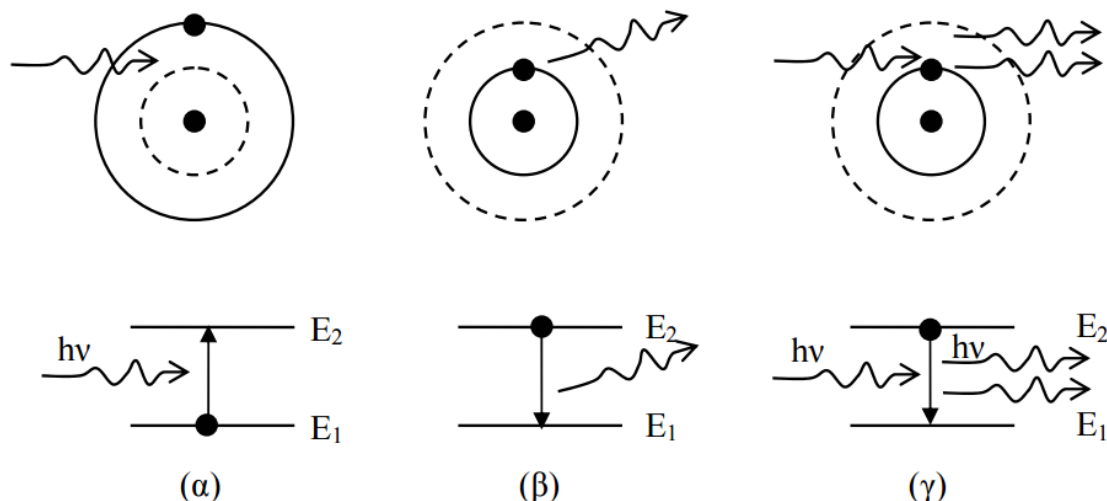
Στις συνήθεις θερμοκρασίες τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου βρίσκονται κατά κύριο λόγο στη χαμηλότερη δυνατή ενεργειακή τους στάθμη E_1 . Τότε το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάστασή του. Στην περίπτωση αυτή, το άτομο μπορεί να διεγερθεί, μεταβαίνοντας κάποιο από τα ηλεκτρόνια του σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη E_2 , απορροφώντας ένα φωτόνιο ενέργειας που ισούται με την διαφορά ενέργειας των στάθμεων μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται η μετάβαση. (Εξίσωση 2.1). Το διεγερμένο άτομο τείνει να επανέλθει στην προηγούμενη ενεργειακή κατάστασή του μέσω της αυθόρμητης εκπομπής ενός φωτονίου προς τυχαία διεύθυνση.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

[2.1]

όπου, h η σταθερά Planck και ν η συχνότητα του φωτονίου.

Από την Εξίσωση 2.1 διαπιστώνεται ότι το φωτόνιο πρέπει να βρίσκεται σε συγκεκριμένες συνθήκες, δηλαδή σε κατάλληλη συχνότητα ή μήκος κύματος, προκειμένου να προσδωθεί στο άτομο η ενέργεια που απαιτείται ώστε να διεγερθεί σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως εξαναγκασμένη απορρόφηση.



Σχήμα 2. 3: (α) απορρόφηση (β) αυθόρμητη εκπομπή (γ) εξαναγκασμένη εκπομπή

Αυθόρμητη εκπομπή

Εάν ένα άτομο βρεθεί σε διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση, τότε υπάρχει πιθανότητα να εκπέμψει ένα φωτόνιο και να μεταβεί σε χαμηλότερη κατάσταση, καθώς τείνει να επανέλθει στην προηγούμενη κατάσταση διέγερσης, έπειτα από το πέρας κάποιου χρονικού διαστήματος. Συνήθως, ένα άτομο παραμένει σε διεγερμένη κατάσταση για 10^{-8} sec. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αποδιέγερση και συνοδεύεται από την αυθόρμητη εκπομπή προς τυχαία διεύθυνση, ενός φωτονίου συχνότητας ν (Εξίσωση 2.2) ή μήκους κύματος λ (Εξίσωση 2.3). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή (spontaneous emission).

$$\nu = \frac{\Delta E}{h}$$

[2.2]

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

[2.3]

Εξαναγκασμένη εκπομπή

Εάν κατά τη διάρκεια που ένα ηλεκτρόνιο παραμένει σε διεγερμένη κατάσταση συγκρουστεί με ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με την ενεργειακή διαφορά διεγερμένης – θεμελιώδους (Εξίσωση 2.1), το φωτόνιο αυτό προκαλεί αποδιέγερση του ατόμου. Από την αποδιέγερση αυτή παράγεται ακόμα ένα φωτόνιο ενέργειας $E_2 - E_1$, με τον τρόπο αυτό τελικά πραγματοποιείται ταυτόχρονη εκπομπή δύο φωτονίων. Η εκπεμπόμενη και η προσπίπτουσα ακτινοβολία παρουσιάζουν την ίδια φάση, ίδια φορά διεύθυνσης καθώς και ίδιο μήκος κύματος. (Σχήμα 2.3.γ). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εξαναγκασμένη εκπομπή (stimulated emission).

Όπως έχει αναφερθεί, προκειμένου να επιτευχθεί η εξαναγκασμένη εκπομπή είναι αναγκαίο το προσπίπτων φωτόνιο να απορροφηθεί από άτομο που είναι ήδη διεγερμένο, δηλαδή που βρίσκεται σε ενεργειακή στάθμη E_2 . Για τον λόγο αυτό, πρέπει να εξασφαλισθεί ότι τα περισσότερα άτομα που παίρνουν μέρος στην ενίσχυση του φωτός βρίσκονται στη διεγερμένη κατάσταση E_2 , διαφορετικά δεν θα πραγματοποιηθεί οπτική ενίσχυση. Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο επιτυγχάνεται τα άτομα ενεργειακής κατάστασης E_2 να είναι σε περίσσεια έναντι αυτών της E_1 ονομάζεται αντιστροφή πληθυσμών.

Διαφορά μεταξύ αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής

Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι μεταξύ αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά. Κατά τη διάρκεια της αυθόρμητης εκπομπής, τα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά (ΗΜ) κύματα δεν έχουν σταθερή σχέση φάσης με το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και εκπέμπονται προς όλες τις διευθύνσεις (μη συμφωνία φάσης). Αντίθετα, κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται, βρίσκονται σε συμφωνία φάσης με το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και εκπέμπονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Στην περίπτωση αυτή, τα εκπεμπόμενα κύματα αθροίζονται συμφώνως με τα προσπίπτοντα προκειμένου στο τέλος το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που προκύπτει να είναι ενισχυμένο.

2.1.3 Ιδιότητες της δέσμης Laser

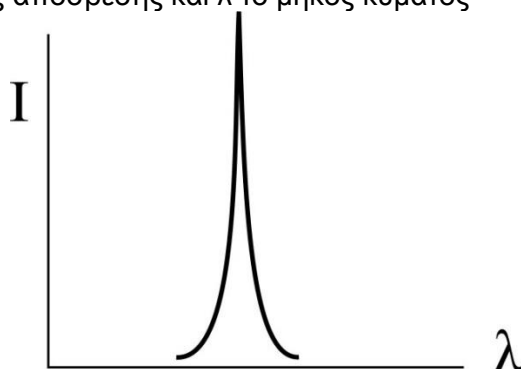
Οι δέσμες laser χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο βασικών ιδιοτήτων, καθιστώντας τις με τον τρόπο αυτό χρήσιμες σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης και της κατεργασίας υλικών. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό μονοχρωματικότητας, συμφωνίας, κατευθυντικότητας και λαμπρότητας. Επιπροσθέτως, μια ακόμη σημαντική ιδιότητα είναι η ικανότητα παραγωγής παλμών χαμηλής χρονικής διάρκειας.

Μονοχρωματικότητα

Η μονοχρωματικότητα είναι η σημαντικότερη ιδιότητα της δέσμης του laser. Η ιδιότητα αυτή προκύπτει από δύο γεγονότα. Πρώτον, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που έχει την κατάλληλη συχνότητα ν_0 μόνο μπορεί να ενισχυθεί. Δεύτερον, η συχνότητα αυτή υποστηρίζεται από το φάσμα συντονισμού της κοιλότητας του laser, καθώς μόνο για ορισμένες συχνότητες μπορεί να πραγματοποιηθεί ταλάντωση στην κοιλότητα. Συνεπώς, εάν θεωρηθεί ότι ένα επίπεδο κύμα παλινδρομεί μεταξύ των κατόπτρων, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με L , τότε παρατηρείται ότι ένας κύκλος συμπληρώνεται όταν το κύμα διατρέξει απόσταση $2L$. Ως εκ τούτου, τα μήκη κύματος που θα συντονίζονται μέσα στο αντηχείο θα πληρούν την Εξίσωση 2.4. Αποτέλεσμα αυτών είναι μια πολύ στενή φασματικά γραμμή laser από αυτήν της μετάβασης κατά την αυθόρμητη εκπομπή.

$$L = q \left(\frac{\lambda}{2} \right) \quad [2.4]$$

όπου, q είναι ο συντελεστής απόσβεσης και λ το μήκος κύματος



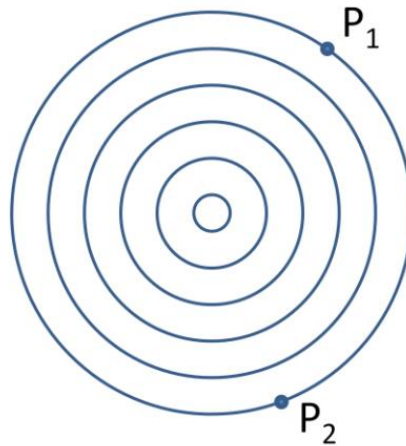
Monochromatic

Σχήμα 2. 4: Μονοχρωματική ακτινοβολία

Συμφωνία

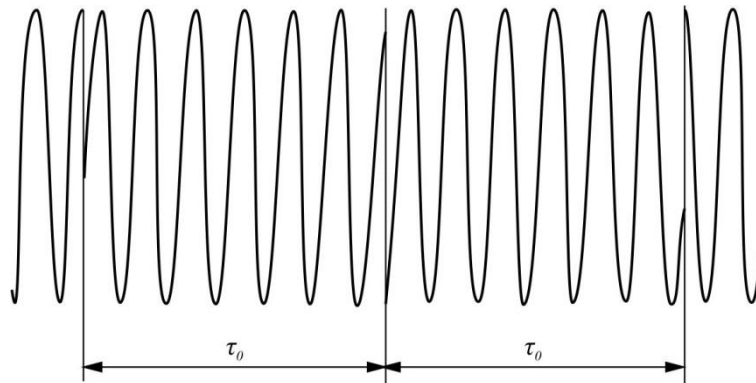
Η συμφωνία είναι το μέτρο της έκτασης κατά την οποία η φάση της ακτινοβολίας διατηρείται σταθερή σε διαφορετικά σημεία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργεί η ακτινοβολία. Για κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα υπάρχει μια χωρική (spatial coherence) και χρονική συμφωνία φάσεων (temporal coherence). Υποθέτοντας ότι έστω δύο σημεία P_1 και P_2 βρίσκονται στο ίδιο μέτωπο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος την χρονική στιγμή $t=0$, και ότι $E_1(t)$ και $E_2(t)$ τα ηλεκτρικά πεδία αντιστοίχως (Σχήμα 2.5) Εάν η διαφορά φάσης των δύο σημείων ισούται με το μηδέν για κάθε χρονική στιγμή ($t>0$), τότε υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ των σημείων. Στην

περίπτωση που τα σημεία αυτά βρίσκονται στο ίδιο μέτωπο κύματος τότε υπάρχει τέλεια χωρική συμφωνία.



Σχήμα 2. 5: Μέτωπα σφαιρικών επίπεδων κυμάτων

Υποθέτοντας ότι έχουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο ηλεκτρομαγνητικού κύματος $E(t)$ σε σταθερό σημείο στο χώρο. Σε περίπτωση που, για μια χρονική καθυστέρηση τ_0 η διαφορά φάσης μεταξύ των $E(t)$ και $E(t+\tau_0)$ παραμένει σταθερή για κάθε t , τότε υπάρχει χρονική συμφωνία για το διάστημα τ_0 . Αντίστοιχα, αν αυτό ισχύει για κάθε τ_0 υπάρχει τέλεια χρονική συμφωνία. Ο χρόνος τ_0 ονομάζεται χρόνος συμφωνίας.

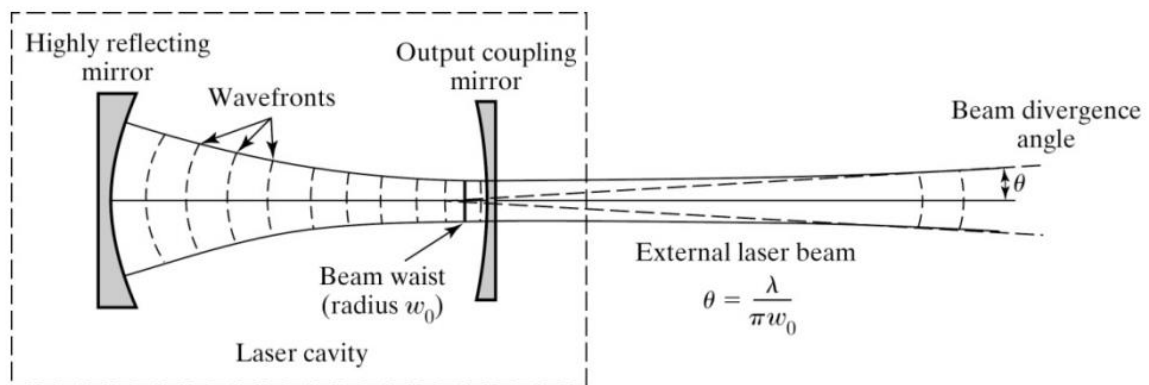


Σχήμα 2. 6: Μερική χρονική συμφωνία με χρόνο συμφωνίας τ_0

Ως αποτέλεσμα της χωροχρονικής συμφωνίας δημιουργείται μια ακόμα ιδιότητα, αυτή της κοκκίωσης (speckle). Η ιδιότητα αυτή εμφανίζεται όταν μια δέσμη laser ανακλάται από μια μη-λεία επιφάνεια και είναι αποτέλεσμα της συμβολής πολλών κυμάτων ίδιας συχνότητας αλλά διαφορετικών φάσεων και πλάτων. Επίσης, το laser υπερτερεί στη συμφωνία χρονική και χωρική, σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη ακτινοβολία παραγόμενη από συμβατική πηγή.

Κατευθυντικότητα

Η κατευθυντικότητα είναι η ικανότητα των δεσμών laser να εστιάζουν σε πολύ μικρές περιοχές ακόμα και από μεγάλες αποστάσεις. Κύριο κριτήριο που την χαρακτηρίζει είναι το άνοιγμα της δέσμης του laser, που ορίζεται ως το διπλάσιο της γωνίας που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης με την κεντρική ακτίνα. Συνήθως εκφράζεται σε mRads. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τις συμβατικές πηγές φωτός, οι οποίες εκπέμπουν ακτινοβολία προς όλες τις διευθύνσεις με ανάλογα χωρική κατανομή φωτοβολίας. Για τον λόγο αυτό, μια συμβατική πηγή δεν μπορεί να εστιάσει σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και ένα συγκεκριμένο σημείο. Αντιθέτως, η ακτινοβολία ενός laser είναι αυστηρά περιορισμένη σε μια λεπτή δέσμη μικρής εγκάρσιας διατομής διαμέτρου D (mm^2).



Σχήμα 2. 7: Διαγραμματική απεικόνιση της κατευθυντικότητας της δέσμης στο εσωτερικό της διάταξης του laser

Λαμπρότητα

Το laser αποτελεί πηγή μεγάλης λαμπρότητας και έντασης ακτινοβολίας. Η λαμπρότητα μιας πηγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εκφράζεται ως η ισχύς που εκπέμπει ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα στερεάς γωνίας. Χαρακτηριστικά, η λαμπρότητα της δέσμης ενός laser He-Ne που έχει ισχύ 1 mWatt είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη λαμπρότητα του ήλιου (τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη). Επίσης, τα αποτελέσματα από την φασματική λαμπρότητα (L_φ) δίνονται από την [εξίσωση 2.5](#).

$$L_\varphi = \frac{L}{b} \quad [2.5]$$

όπου, b είναι το εύρος φάσματος (για παράδειγμα 300 nm για τον ήλιο, 0,2 nm για το laser He-Ne) και L η λαμπρότητα ($L_{\text{laser He-Ne}}$, $L_{\text{Ηλίου}}$)

$$\frac{L_{\text{He-Ne}}^\varphi}{L_{\text{Ηλίου}}^\varphi} \approx 2 * 10^5 \quad [2.6]$$

	Λαμπτήρας Πυρακτώσεως	Laser He-Ne	Λόγος Laser/Λαμπτήρα
Συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς εξόδου (W)	100	10^{-3}	10^{-5}
Ένταση φωτεινής ακτινοβολίας (Watt/m ²)	$1,9 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^3$
Λαμπρότητα (Watt/m ² * sterad)	$6 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^8$	$4,2 \cdot 10^2$

Πίνακας 2. 1: Σύγκριση των laser He-Ne με τις συμβατικές πηγές

Πόλωση

Πολωμένη χαρακτηρίζεται μια ακτίνα φωτός, όταν τα ηλεκτρικά διανύσματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχουν προσανατολισμό προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση στο χώρο. Αποτέλεσμα της ιδιότητας αυτής είναι η επιρροή της απορροφητικότητας του υλικού, δηλαδή το ποσοστό της απορροφώμενης ενέργειας του laser από το υλικό. Το φως των ηλεκτρικών λαμπτήρων, των λαμπτήρων φθορισμού, του ήλιου και πολλών ακόμα φωτεινών πηγών συμπεριφέρεται ως «μη πολωμένο» ή «τυχαία πολωμένο». Αντιθέτως, πολλοί τύποι laser παράγουν πολωμένο φως είτε εξαιτίας της φύσης τους, είτε της γεωμετρίας του ενεργού υλικού τους, είτε ακόμα επειδή έχουν προστεθεί οπτικά πολωτικά στοιχεία στο οπτικό αντηχείο

(παραδείγματος χάριν πρίσματα, πλακίδια Brewster, φράγματα ανάκλασης κ.λ.π.). Η πόλωση της δέσμης επιτυγχάνεται με την χρήση ενός οπτικού πολωτικού στοιχείου, το οποίο τοποθετείται μέσα στο οπτικό αντηχείο (θα παρουσιασθεί ακολούθως). Για τον λόγο αυτό, η πόλωση θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια επιπρόσθετη ιδιότητα της δέσμης του laser.

2.1.4 Οι τύποι των laser και οι βασικές παράμετροι

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και προηγουμένως, υπάρχουν διάφοροι τύποι laser, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Οι διαιρέσεις αυτές προκύπτουν από την κατάσταση του ενεργού υλικού (ενισχυτή), την ζώνη του μήκους κύματος, τη μέθοδο διέγερσης του ενεργού υλικού, τα χαρακτηριστικά της εξερχόμενης HMA laser και τον αριθμό των ενεργειακών επιπέδων που παίρνουν μέρος στη διαδικασία.

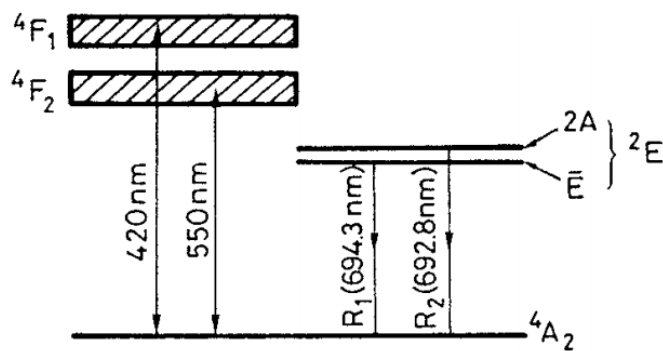
Ανάλογα με την κατάσταση του ενεργού υλικού (ενισχυτής) που χρησιμοποιείται ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Laser στερεάς κατάστασης, με ενεργό υλικό για παράδειγμα Γάλλιο, Ρουβίδιο, Αρσενικό, Νεοδύμιο και Αλουμίνιο
- Laser υγρής κατάστασης, όπου το ενεργό υλικό είναι διάλυμα μεγάλων οργανικών μορίων χρωστικών διαλυμένων σε υγρούς διαλύτες σε συγκεντρώσεις της τάξεως 1:10.000
- Laser αέριας κατάστασης με ενεργό υλικό όπως το Αργό, το Νέο και το Διοξείδιο του Άνθρακα CO₂
- Laser ημιαγωγών, όπου το ενεργό υλικό αποτελούν επεξεργασμένοι κρυσταλλοειδοί όπως παραδείγματος χάριν, το γαλλιούχο αρσενικό (GaAs), ο γαλλιούχος φώσφορος (GaP), το ινδιούχο αντιμόνιο (InSb), το ινδιούχο αρσενικό (InAs) και ο ινδιούχος φώσφορος (InP).

Στερεάς κατάσταση

Στην κατηγορία των laser στερεάς κατάστασης το ενεργό υλικό είναι τοποθετημένο μέσα σε ένα μονωτικό διηλεκτρικό κρύσταλλο ή σε άμορφο γυαλί και βρίσκεται σε στερεά μορφή. Η δέση προέρχεται από ενέργεια που μεταβάλλεται μεταξύ των διακριτών ενεργειακών στάθμεων των υλικών προσμίξεων, όπως για παράδειγμα είναι το neodymium και το chromium. Προκειμένου να παραχθεί η δέση χρησιμοποιείται μια λυχνία ανάφλεξης. Τα περισσότερα laser στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούν ως ενεργά συστατικά ιόντα πρόσμιξης, τα οποία εισέρχονται σε έναν ιοντικό κρύσταλλο. Τα ιόντα αυτά ανήκουν σε μια από τις σειρές των μεταπτωσητικών στοιχείων του περιοδικού πίνακα (όπως για παράδειγμα μεταπτωσητικά μεταλλικά ιόντα, με σπουδαιότερο το Cr³⁺, ή ιόντα σπανίων γαιών με σημαντικότερα τα Nd³⁺ ή Ho³⁺). Τα συνηθέστερα στερεά μέσα αποτελούν οι ράβδοι ροδοκόκκινων κρυστάλλων και των εμπλουτισμένων με neodymium γυαλιών και κρυστάλλων. Τα άκρα της ράβδου διαμορφώνονται σε δύο παράλληλες επιφάνειες, οι οποίες καταλαμβάνονται από μια μη μεταλλική ταινία απεικόνισης. Τα laser αυτής της κατηγορίας παράγουν υψηλή ισχύ για το φάσμα των υπέρυθρων ακτινοβολιών μήκους κύματος 1.064 nm. Χρησιμοποιούνται συνήθως για να παράγουν μια έκρηξη φωτός παλμικά κατά τη διάρκεια σύντομου χρονικού διαστήματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, ο πρώτος τύπος laser που τέθηκε σε λειτουργία ανήκει σε αυτή την κατηγορία και είναι το laser ρουβιδίου, το οποίο συνεχίζει να χρησιμοποιείται ακόμη. Επιπρόσθετα, στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα fiber lasers, τα οποία χρησιμοποιούν ενεργό υλικό που αποτελείται από οπτικές ίνες. Το υλικό αυτό ενισχύεται με σπάνια γήινα στοιχεία όπως είναι για παράδειγμα τα erbium, ytterbium, thulium, dysprosium, holmium και dysprosium.



Σχήμα 2. 8: Ενεργειακές καταστάσεις ενός laser ρουβιδίου

Υγρής κατάστασης

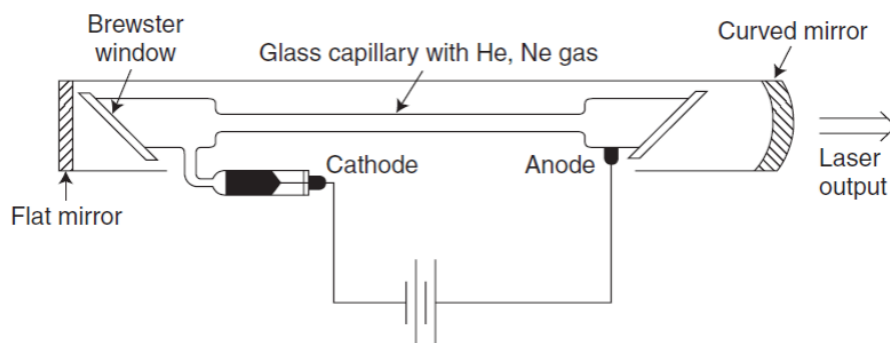
Τα laser της κατηγορίας αυτής θεωρούνται ως ειδικές συσκευές μετατροπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ενός μήκους κύματος σε ένα άλλο. Χρησιμοποιούν ως ενεργό υλικό διαλύματα ορισμένων οργανικών χρωστικών σε υγρούς διαλύτες, όπως για παράδειγμα είναι η αιθυλική αλκοόλη, η μεθυλική αλκοόλη ή ακόμα και το νερό. Αντλούνται από έντονους λαμπτήρες λάμψης με τρόπο σφυγμού ή από ένα laser αέριας κατάστασης με τον τρόπο συνεχών κυμάτων. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και τα laser χρωστικών (dye), τα οποία λόγω της επιλεκτικότητας του μήκους κύματος, της κάλυψης ευρείας φασματικής περιοχής και της απλότητάς τους, διαδραματίζουν σημαντικό και όλο αυξανόμενο ρόλο σε πεδίο εφαρμογών μεγάλου εύρους, από τη φασματοσκοπία έως τη φωτοχημεία. Επίσης, το μεγάλο εύρος των χρωστικών που χρησιμοποιούνται ως ενεργό υλικό, δίνουν την δυνατότητα παραγωγής παλμών πολύ μικρής διάρκειας της τάξεως μόλις μερικών femoseconds, καθώς και την επίτευξη ευρείου φάσματος μηκών κύματος.

Παρ'όλα αυτά, τα laser χρωστικών έχουν αρκετά πολύπλοκη διάταξη με αποτέλεσμα να καθιστάται δύσκολη η συντήρηση της συσκευής. Επιπρόσθετα μειονεκτήματα των διατάξεων αυτών είναι η χρήση δευτέρου laser ως πηγή ενέργειας, ο μικρός χρόνος ζωής της χρωστικής καθώς και συχνά η χρήση τοξικών χημικών και εξατμιζόμενων διαλυτών.

Αέριας κατάστασης

Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα, μεγάλου εύρους ισχύος, σε ένα σώμα αερίου το οποίο είναι τοποθετημένο εντός μιας κοιλότητας, έτσι ώστε να παραχθεί η δέσμη φωτός. Συνεπώς, τα laser αερίων κατά κύριο λόγο διεγείρονται με ηλεκτρική εκκένωση που προκαλείται με εφαρμογή υψηλού δυναμικού στα ηλεκτρόδια στα άκρα του σωλήνα. Οι διατάξεις αυτές ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν σε λειτουργία συνεχούς φωτός καθώς επίσης και τα πρώτα όπου εφαρμόστηκε μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε φωτεινή ακτινοβολία.

Το μέσο που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι καθαρό αέριο, μείγμα αερίων ή ακόμα και ατμός μετάλλων που συνήθως βρίσκεται σε έναν κυλινδρικό σωλήνα γυαλιού ή χαλαζία. Εξωτερικά στα άκρα του σωλήνα βρίσκονται δύο κάτοπτρα, τα οποία διαμορφώνουν την κοιλότητα του laser.



Σχήμα 2. 9: Διάγραμμα δομής ενός αερίου laser He-Ne

Τα υλικά αέριας κατάστασης είναι πιο εύχρηστα έναντι των στερεών καθώς λειτουργούν ως ομογενή ενεργά υλικά, μπορούν εύκολα να μεταφερθούν για ψύξη και ανατροφοδότηση και τέλος έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος.

Κύριοι τύποι των αερίων lasers αποτελούν τα laser He-Ne, τα εμπορικά laser διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), τα laser αζώτου (N_2) και τα laser διεγερμένων διμερών (excimer). Στην τελευταία περίπτωση η ακτινοβολία εκπέμπεται από ένα μόριο, το οποίο αποτελείται από ένα άτομο ευγενούς αερίου (όπως Ar, Kr, Xe) και από ένα άτομο αλογόνου (όπως F, Cl, Br, I). Το μόριο αυτό βρίσκεται μόνο σε διεγερμένη κατάσταση, καθώς σε περίπτωση που αποδιεγερθεί τα άτομα διασπώνται. Η κατάσταση διέγερσης διαρκεί περίπου για 10 ns. Στον Πίνακα 2.2 που ακολουθεί παραθέτονται ορισμένοι τύποι και χαρακτηριστικά της κατηγορίας αυτής.

Ιδιότητες	Τύποι των διμερών laser (excimer)			
	ArF	KrCl	KrF	XeCl
Μήκος κύματος (nm)	193	222	248	308
Ισχύς (W)	0,3 – 100	2 – 4	2 – 100	0,02 – 150
Ενέργεια ανά παλμό (MJ/παλμό)	0,2 – 500	0,1 – 250	20 – 15.000	1,2 – 5.000
Ρυθμός επανάληψης (παλμοί/sec)	1 – 250	10 – 500	1/60 – 1.000	1 – 1.000
Πλάτος παλμού (ns)	1,2 – 65	1,2 – 6	1,5 – 1.200	1,2 - 80

Πίνακας 2. 2: Τύποι των excimer laser

Laser ημιαγωγών

Ο συγκεκριμένος τύπος laser χαρακτηρίζεται από πολλούς ως το laser του μέλλοντος εξαιτίας της δυνατότητάς του για μαζική παραγωγή καθώς επίσης και λόγω της ταχείας αύξησης των ιδιοτήτων τους. Τα laser ημιαγωγών περιλαμβάνουν την πιο συμπαγή ακτινοβολία και αποτελούνται από μια σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων των ημιαγωγών με τις διαφορετικές ιδιότητές τους. Χρησιμοποιούν ως ενεργό υλικό ημιαγωγούς με συνηθέστερο το γαλλιούχο αρσενικό (GaAs). Η παραγωγή της δέσμης επιτυγχάνεται με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και το μήκος κύματος είναι του εύρους 375 έως 1.800 nm.

Τα laser αυτά χρησιμοποιούνται ακόμα ως laser συνεχών κυμάτων με αποδοτικότητα έως και 50 %.

Αντίστοιχα, ανάλογα με το μήκος κύματος κατηγοριοποιούνται σε:

- Laser υπέρυθρης ακτινοβολίας
- Laser ορατής ακτινοβολίας
- Laser υπεριώδους ακτινοβολίας
- Laser ακτίνων X

Με βάση τον τρόπο λειτουργίας χωρίζονται σε:

- Laser συνεχούς λειτουργίας (CW laser), τα οποία παράγουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σταθερού πλάτους και συχνότητας και από μαθηματική πλευρά έχουν άπειρη διάρκεια. Η διαδικασία της αντιστροφής πληθυσμού πραγματοποιείται με συνεχή λειτουργία.
- Παλμικά laser (Pulsed), τα οποία παράγουν δέσμη φωτός με ανεξάρτητους παλμούς που έχουν πεπερασμένη διάρκεια. Μεταξύ των παλμών πραγματοποιείται μια παύση λειτουργίας διάρκειας 0,1 – 1 sec. Τα συγκεκριμένα laser διακρίνονται σε μακρού, μέσου και μικρού παλμού
- Laser ψευδοσυνεχούς ροής, τα οποία είναι παλμικά υψηλών ταχυτήτων laser όπως παραδείγματος χάριν το laser χαλκού
- Υπερπαλμικά laser, τα οποία αποτελούν συστήματα εξάχνωσης του υλικού με χρόνο έκθεσής του στην δέσμη μικρότερο από τον αντίστοιχο χρόνο θερμικής χαλάρωσής του. Τέτοιες διατάξεις είναι τα laser CO₂ και Er: YAG
- Q – Switched laser, κατά τα οποία μέσω ενός εξειδικευμένου διακόπτη που είναι τοποθετημένος μέσα στην κοιλότητα του laser, επιτρέπεται η απελευθέρωση όλης της συσσωρευμένης ενέργειας με έναν σύντομο και υψηλής έντασης παλμό

Τέλος, πραγματοποιείται διαχωρισμός με βάση την ισχύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε:

- Τάξη I: Ισχύς < 0,4 mW. Η δέσμη του laser αυτής της τάξεως είναι ακίνδυνη καθώς δεν προκαλεί βλάβη στα μάτια ακόμη και στην περίπτωση που πέσει μέσα στο μάτι έπειτα από ατύχημα. Συνήθως, η δέσμη βρίσκεται απομονωμένη εντός της συσκευής.
- Τάξη II: 0,4 < Ισχύς < 1 mW, CW. Η ακτινοβολία στην περίπτωση αυτή είναι ορατή με μήκη κύματος 400 – 700 nm, αλλά ακίνδυνη για στιγμιαία άμεση έκθεση των 0,25 sec. Ωστόσο, μπορεί να προκαλέσει βλάβη εφόσον ο χρόνος αυτός παραταθεί. Τέτοιες δέσμες χρησιμοποιούνται στους laser pointers.
- Τάξη IIIa: 1 < Ισχύς < 5 mW, CW. Και σε αυτή την περίπτωση όμοια με την προηγούμενη, η δέσμη του laser δεν προκαλεί καταστροφή στα μάτια κατά τη διάρκεια ενός ανοιγοκλεισίματος (blink) δηλαδή για 0,25 sec. Παρ'όλα αυτά, υπάρχει πιθανότητα βλάβης του αμφιβληστροειδούς χιτώνα του ματιού, σε περίπτωση επαφής του ματιού με την δέσμη μέσω φακού ή απευθείας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.
- Τάξη IIIb: 5 < Ισχύς < 500 mW, CW. Δεν επιτρέπεται καμιά άμεση έκθεση στην δέσμη του laser, καθώς προκαλεί βλάβες στα μάτια, εφόσον έρθουν σε απευθείας επαφή με την δέσμη ή ακόμη και μέσω κάποιου ανακλώμενου κομματιού της.
- Τάξη IV: CW με Ισχύ > 500 mW, παλμικά. Η κατηγορία αυτή είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και προκαλεί βλάβες σε μάτια και δέρμα η έκθεση στη δέσμη των laser αυτών ή ακόμη και μετά από ανάκλαση ή διάχυσή της σε άλλες επιφάνειες. Επίσης, υπάρχει πιθανότητα να προκληθεί ανάφλεξη εύφλεκτων υλικών, η εκπομπή επικίνδυνων αερίων όπως όζον (O₃) κ.α. Στην κατηγορία αυτή, συμπεριλαμβάνονται όλα τα παλμικά laser που λειτουργούν μεταξύ μηκών κύματος 400 – 1.400 nm.

Όνομα	Σύμβολο	Σχέση	Μονάδα Μέτρησης
Μήκος κύματος	λ		Nm
Συχνότητα	f, ν		10^{14} Hz
Διάρκεια παλμού*	Δt		ns, ps, fs
Ρυθμός επανάληψης*	R		Hz, kHz
Ενέργεια	E		μJoule , mJoule
Ενέργεια ανά παλμό*	E_p	E/R	$(\mu\text{Joule}, \text{mJoule})/\text{pulse}$
Ισχύς	P	$E_p/\Delta t$	mWatt, Watt
Ένταση	I	P/A	Watt/cm^2
Ροή	F	I/hf	# φωτονίων/ (cm^2s)

Πίνακας 2. 3: Βασικές παράμετροι τυπικών συστημάτων laser

* Οι παράμετροι της διάρκειας παλμού, του ρυθμού επανάληψης και της ενέργειας ανά παλμού ισχύουν για την κατηγορία των παλμικών laser.

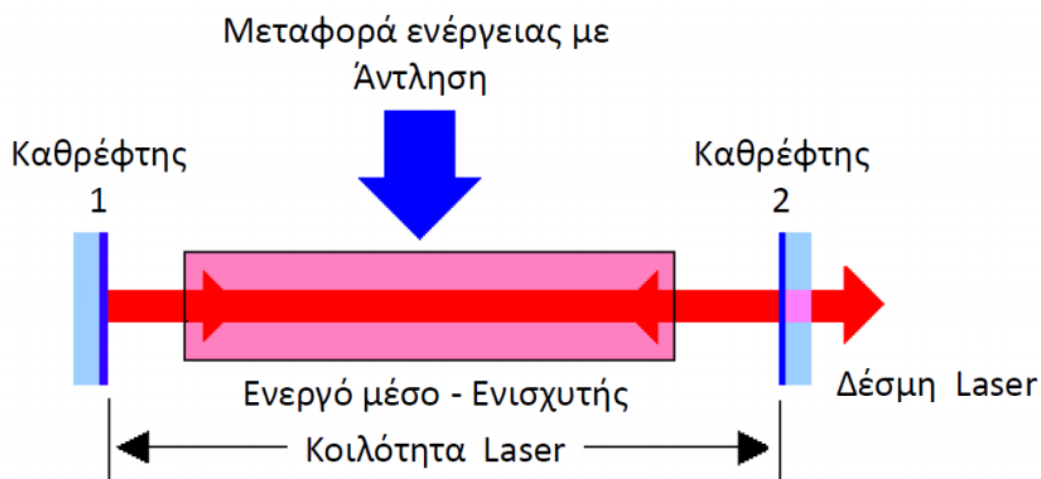
2.2 Διάταξη ταλαντωτή Laser

Από την ανακάλυψη του laser μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλοί διαφορετικοί τύποι laser, καθένας από τους οποίους διαθέτει ξεχωριστά χαρακτηριστικά και κατασκευαστικές λεπτομέρειες, εν τούτοις υποδεικνύονται ορισμένες βασικές αρχές λειτουργίας που είναι κοινές για όλους τους τύπους. Μελετώντας μια διάταξη του συστήματος παραγωγής ακτινοβολίας παρουσιάζεται ομοιότητα με έναν ηλεκτρονικό ταλαντωτή (oscillator) όσον αφορά τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται. Κάθε ταλαντωτής διακρίνεται από τέσσερα κύρια μέρη:

- την πηγή ενέργειας
- τον ενισχυτή
- την ανάδραση θετικού συντονισμού
- την σύζευξη εξόδου

Αντίστοιχα, μια διάταξη laser αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα (Σχήμα 2.10):

- τον μηχανισμό διέγερσης
- το ενεργό υλικό (οπτικός ενισχυτής – οπτικό αντηχείο)
- την οπτική ανάδραση
- την σύζευξη εξόδου



Σχήμα 2. 10: Απλοποιημένο διάγραμμα των τμημάτων της δέσμης του laser

Το ενεργό υλικό του laser είναι το υλικό που βρίσκεται σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών και δρα ενισχύοντας την οπτική ακτινοβολία που διέρχεται δια μέσω αυτού. Τοποθετείται σε μια συντονιστική κοιλότητα ή αλλιώς στο οπτικό αντηχείο (optical resonator). Στην οπτική κοιλότητα πέρα από τον θάλαμο που περιέχει το ενεργό υλικό, βρίσκονται και δύο κάτοπτρα υψηλής ανακλαστικότητας, όπου το ένα είναι πλήρως ανακλαστικό με $R=100\%$ και το άλλο βρίσκεται στην έξοδο του laser και είναι μερικώς διαπερατό με $R<100\%$. Σε ένα τέτοιο σύστημα κατόπτρων το ενεργό φαινομενικό μήκος του ενισχυτικού μέσου πολλαπλασιάζεται. Το ενεργό υλικό παρέχει τις στάθμες ενέργειάς του για μεταπτώσεις ηλεκτρονίων που οδηγούν σε δράση του laser και μπορεί να βρίσκεται κατάσταση της ύλης δηλαδή αέριο, στερεό, υγρό καθώς και ημιαγωγός με συγκεκριμένο μέγεθος, σύσταση, καθαριότητα, μορφή και θα παρέχει τις ενεργειακές στάθμες για τις μεταπτώσεις των ατόμων. Καθώς το ηλεκτρομαγνητικό κύμα κατευθύνεται από το ένα κάτοπτρο προς το άλλο, ανακλάται πάνω σε αυτά και ενισχύεται κάθε φορά που διαπερνά το ενεργό μέσο. Συνεπώς, το τμήμα αυτό δρα σαν ένας ενισχυτής στην οπτική ακτινοβολία που περνάει δια μέσω αυτού. Η ακτινοβολία εγκλωβίζεται στο οπτικό αντηχείο. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται το φαινόμενο της ανάδρασης (feedback) στην παραγόμενη οπτική ακτινοβολία, έτσι ώστε το laser να λειτουργεί σε μια αυτοσυντηρούμενη ταλάντωση.

Για την διατήρηση της λειτουργίας του laser απαιτείται η συγκέντρωση φωτονίων στο ενεργό μέσο του και η διατήρηση των συνθηκών συμφωνίας. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται να επιτευχθεί η συνθήκη κατωφλίου (threshold condition), κατά την οποία η ενίσχυση του μέσου πρέπει να αντισταθμίζει τις απώλειες στην κοιλότητα. Συγκεκριμένα, η συνθήκη αυτή πληρείται όταν υπάρχει επαρκής εσωτερική απολαβή ανά μονάδα μήκους έτσι ώστε να αντισταθμίζονται οι εσωτερικές απώλειες ανά μονάδα μήκους καθώς και οι διαφυγές του ωφέλιμου φωτός από τα κάτοπτρα ανακλαστικότητας R

Εν συνεχεία, περιγράφεται αναλυτικά η μεταφορά του ενεργού υλικού μέσα στο οπτικό αντηχείο του laser. Απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία ενός συστήματος laser κρίνεται ότι οι συνολικές απώλειες της δέσμης πρέπει να είναι μικρότερες από την ενίσχυση του σήματος. Έστω ότι η δέσμη του laser καλύπτει όλο το ενεργό υλικό, δηλαδή γίνεται εκμετάλλευση 100% του ενεργού μέσου. Η δέσμη του laser μετακινείται μέσα στο οπτικό αντηχείο, ξεκινώντας από το πρώτο κάτοπτρο M_1 , ανακλαστικότητας R_1 και προχωρά προς το δεύτερο κάτοπτρο M_2 με ανακλαστικότητα R_2 . Διαπιστώνεται ότι η ένταση της δέσμης αυξάνεται από I_0 σε I_1 σύμφωνα με την Εξίσωση 2.7.

$$I_1 = I_0 e^{(\beta - \alpha)L}, \beta - \alpha > 0 \quad [2.7]$$

όπου, L είναι η απόσταση μεταξύ των δύο κατόπτρων, β ο συντελεστής ενίσχυσης ασθενούς σήματος και α οι απώλειες ανά μονάδα μήκους.

Έπειτα από την ανάκλαση στο κάτοπτρο M_2 η ένταση της δέσμης γίνεται:

$$I_1 = R_2 I_0 e^{(\beta - \alpha)L}, \beta - \alpha > 0 \quad [2.8]$$

Μετά από ένα πλήρη κύκλο, έχει πραγματοποιηθεί ανάκλαση στο κάτοπτρο M_1 και η σχετική αύξηση της έντασης της δέσμης είναι:

$$\frac{I_{\text{πλήρους κύκλου}}}{I_{\text{αρχική}}} = G = R_1 R_2 I_0 e^{2(\beta - \alpha)L} \quad [2.9]$$

όπου, G είναι η ενίσχυση ενός πλήρους κύκλου. Εάν $G \geq 1$ τότε παράγεται ακτινοβολία laser, ενώ αν $G < 1$ τότε το laser δεν παράγει ακτινοβολία. Για την σωστή λειτουργία του laser πρέπει να ισχύει η συνθήκη ισορροπίας $G=1$.

Τέλος, η διαδικασία άντλησης δίνει την δυνατότητα να μεταφέρεται ενέργεια μέσα στα άτομα του ενεργού υλικού. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται προκειμένου να διατηρείται μια συντηρούμενη ταλάντωση μέσα στο οπτικό αντηχείο παρά την ύπαρξη απωλειών της οπτικής ενέργειας είτε εξαιτίας της χρήσιμης απώλειας εξόδου, είτε λόγω των παρασιτικών απωλειών

που οφείλονται στην κατασκευή του laser. Η διαδικασία της άντλησης για το ενεργό υλικό πραγματοποιείται με ποικίλους τρόπους, προσφέροντας ενέργεια στο υλικό μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης, για παράδειγμα, μέσω φωτεινής πηγής ή διόδου, χημικής αντίδρασης, ακτίνων Χ και διέγερση μέσω δέσμης ηλεκτρονίων.

2.3 Εγχάραξη με Laser

Οι μηχανουργικές κατεργασίες που υλοποιούνται με τη χρήση εργαλειομηχανής laser κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο της αλληλεπίδρασης της δέσμης με το υλικό σε:

- Κατεργασίες συνένωσης ή πρόσθεσης υλικού
- Κατεργασίες τροποποίησης των ιδιοτήτων του υλικού
- Κατεργασίες αφαίρεσης ή αποβολής υλικού

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας δίνεται έμφαση στη μελέτη των κατεργασιών αποβολής υλικού μέσω της εγχάραξης με τη χρήση εργαλειομηχανής laser engraver.

2.3.1 Αρχή Λειτουργίας

Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους, η εγχάραξη με laser είναι η πιο αποτελεσματική τεχνική στη μηχανική κατεργασία σκληρών υλικών που έχουν πολύπλοκη γεωμετρία, χωρίς την δημιουργία προβλημάτων όπως είναι η φθορά και η θραύση των κοπτικών εργαλείων, οι παραμορφώσεις και οι δονήσεις των εργαλειομηχανών, προβλήματα τα οποία πιθανόν να επιφέρουν αρνητικά αποτελέσματα κατά την κατεργασία. Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της διεργασίας αυτής είναι ότι εξασφαλίζεται η βέλτιστη ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας και υψηλή ακρίβεια στα επιθυμητά χαρακτηριστικά που προσδίδονται στο υλικό. Λοιπά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυνατότητα πρόσβασης και επεξεργασίας ακόμα και σε ανώμαλες επιφάνειες με την ακριβή τοποθέτηση της δέσμης και τη μεταφορά της ενέργειας στο υπό κατεργασία δοκίμιο, η υψηλή αποδοτικότητα και το χαμηλό κόστος λειτουργίας.

Με την τεχνολογία αυτή η χάραξη πραγματοποιείται με το λιώσιμο – κάψιμο του υλικού από την δέσμη του laser, η οποία κινείται πάνω από την επιφάνεια του επεξεργαζόμενου δοκιμίου σύμφωνα με την επιθυμητή γεωμετρία. Κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης της δέσμης του laser με το δοκίμιο, μια ποσότητα ενέργειας απορροφάται από το υλικό με τη μορφή φωτονίων, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού, στο σημείο όπου χτυπάει η δέσμη. Το σημείο αυτό χαρακτηρίζεται ως ζώνη επηρεασμένη από τη δέσμη laser (Laser – Affected Zone), στο οποίο υφίσταται εξασθένιση των μηχανικών του ιδιοτήτων. Η ενέργεια αυτή καθορίζει το ρυθμό και την ποσότητα του αφαιρούμενου υλικού. Κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την απορροφόμενη ενέργεια είναι η ταχύτητα σάρωσης, η ισχύς του laser και το ποσοστό της επικάλυψης του δοκιμίου.

Η ταχύτητα σάρωσης καθορίζει το χρόνο που απαιτείται για την αλληλεπίδραση της δέσμης του laser με το υλικό. Οποιαδήποτε αύξηση του χρόνου αλληλεπίδρασης προκαλεί τοπικά αύξηση της θερμοκρασίας. Με την σταδιακή αύξησή της, η θερμοκρασία της επιφάνειας φτάνει το σημείο τήξης ή ακόμη και εξάχνωσης, έχοντας ως αποτέλεσμα μια ποσότητα του υλικού του δοκιμίου να εξαυλώνεται από την περιοχή της αλληλεπίδρασης. Συνεπώς, δημιουργείται ένας κρατήρας η μορφή και το βάθος του οποίου καθορίζονται από τον χρόνο που απαιτείται για την αλληλεπίδραση του laser με το υλικό. Η μορφή του κρατήρα επηρεάζει την τραχύτητα της επιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι σημαντικό πλεονέκτημα των διατάξεων laser έναντι των λοιπών εργαλειομηχανών είναι η απουσία της φθοράς των κοπτικών εργαλείων ή εργαλείων χάραξης, έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους συντήρησης της διάταξης αυτής.

Τα αποτελέσματα της κατεργασίας αφαίρεσης υλικού ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες με βάση το κατεργαζόμενο υλικό, την ισχύ και το μέγεθος της δέσμης του laser καθώς και την ταχύτητα ανίχνευσης, ως εξής:

- Μηχανικά αποτελέσματα, όταν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας η ένταση της δέσμης είναι μικρής ή μεσαίας κλίμακας, η ταχύτητα ανίχνευσης είναι υψηλή και η θερμοκρασία στην επιφάνεια του υλικού δεν ξεπερνά την τιμή του σημείου τήξεώς του. Έτσι, πραγματοποιείται μια τοπική θέρμανση του σημείου όπου εφαρμόζει η δέσμη του laser δημιουργώντας εξασθένηση των δεσμών των μορίων του υλικού
- Αποτελέσματα αλλαγής φάσης, όταν η ένταση της δέσμης του laser λαμβάνει υψηλές τιμές και η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού αυξάνεται σταδιακά έως ότου ξεπεράσει το σημείο τήξης του υλικού ή ακόμα και το σημείο εξάχνωσής του.
- Φυσικές και χημικές αλληλεπιδράσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα μεταξύ του επεξεργαζόμενου τμήματος της επιφάνειας και του βοηθητικού υλικού. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι πιθανό να δημιουργήσουν φαινόμενα όπως είναι η πυράκτωση, η πυροσυσσωμάτωση, η συγκόλληση και η ανάμειξη.

2.3.2 Βασικές μέθοδοι εγχάραξης

Η τεχνολογία χάραξης με laser είναι εξαιρετικά ευέλικτη και έχει χρησιμότητα για ευρύ φάσμα επιφανειών. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δύο βασικές διαφορετικές μέθοδοι για την χάραξη αντικειμένων γνωστές ως vector (διανυσματική) και raster (ψηφιδωτού). Επίσης, υπάρχουν δύο τύποι απεικόνισης αντίστοιχα.

Vector engraving

Χρησιμοποιώντας την επιλογή αυτή, η δέσμη του laser χρησιμοποιείται για να εντοπίσει τις γραμμές των φορέων του σχεδίου που πρόκειται να χαραχθεί στο υλικό. Αρχικά, το laser ξεκινά από ένα προκαθορισμένο σημείο και συνεχίζει κατά μήκος της διαδρομής της γραμμής μέχρι το σχήμα να έχει υλοποιηθεί. Για να χαραχθεί το σχέδιο σε μορφή vector πρέπει το κάθε επίπεδο χάραξης (layer) να έχει πολύ μικρό πάχος (μικρότερο των 0,0254 mm). Το ίδιο θα πρέπει να είναι και το πάχος γραμμών των σχεδίων που θα χαραχθούν. Επιπλέον, στην μέθοδο αυτή, οι πληροφορίες των σχεδίων αποθηκεύονται στο σύστημα ως μια σειρά γραμμών και καμπυλών, συνεπώς κάθε λεπτομέρεια του σχεδίου διαθέτει μια αρχή και ένα τέλος.

Raster engraving

Στην μέθοδο αυτή το laser κινείται από τα δεξιά προς τα αριστερά, με την δοκό του laser να μετακινείται από την πάνω πλευρά του δοκιμίου προς την κάτω. Δηλαδή, κινείται μεταξύ γειτονικών σημείων σαρώνοντας όλο το αντικείμενο έτσι ώστε να σχηματιστεί το επιθυμητό σχέδιο. Καθώς κινείται κατά μήκος του υλικού το laser εκτελεί την χαρακτηριστική λειτουργία του αλλάζοντας την επιφάνεια του υλικού κάτω από το εστιακό σημείο. Αυτό επιτυγχάνεται εξαιτίας της θέρμανσης του υλικού στην επιφάνεια του δοκιμίου, με αποτέλεσμα την εξάχνωσή του. Τα αρχεία που δημιουργούνται από τη μέθοδο αυτή, είναι γνωστά ως εικόνες bitmap και αποτελούνται από μικρά τετράγωνα-κουκίδες που ονομάζονται pixels. Η ποιότητα των αρχείων μετράται σε κουκκίδες ανά ίντσα DPI (dots per inch) ή σε pixels ανά ίντσα PPI (pixels per inch). Στο Σχήμα 2.10 πραγματοποιείται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων χαράξεων των δύο αυτών μεθόδων.



Σχήμα 2. 11: Σύγκριση των δύο μεθόδων χάραξης

2.3.3 Τύποι των laser εγχάραξης

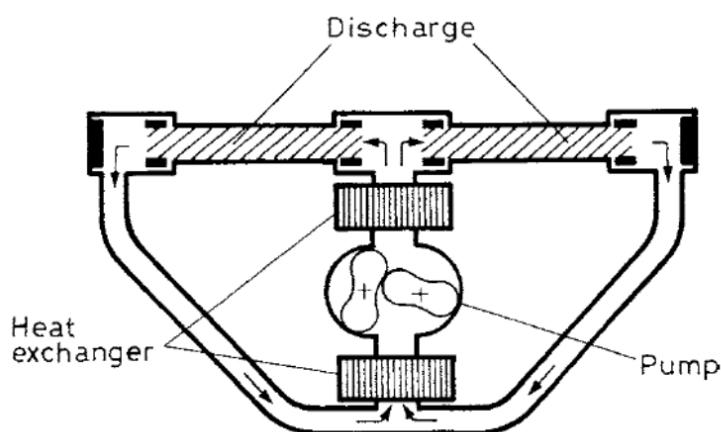
Οι τύποι των laser που χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες εγχάραξης είναι οι ακόλουθοι:

- Laser CO₂
- Nd: YAG laser
- Fiber laser

Laser CO₂

Τα laser της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούν ως ενεργό υλικό διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) με την προσθήκη άλλων αερίων όπως για παράδειγμα αζώτου (N₂) και ηλίου (He), τα οποία αυξάνουν την αποδοτικότητα της συσκευής. Συγκεκριμένα, το N₂ συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση του πληθυσμού του άνω ενεργειακού επιπέδου του laser σε αντίθεση με το He το οποίο επιδρά στην μείωση του πληθυσμού του κάτω ενεργειακού επιπέδου του laser. Οι συγκεκριμένες συσκευές χρησιμοποιούνται για την χάραξη υλικών είτε επιφανειακά είτε εις βάθος. Τα υλικά κατεργασίας κατά κύριο λόγο είναι μη μεταλλικά όπως είναι το πλαστικό, το δέρμα, το καουτσούκ και άλλα, καθώς το μήκος κύματός τους δεν είναι αρκετό για την διεργασία των μετάλλων.

Το laser CO₂ λειτουργεί είτε ως διάταξη συνεχούς ροής (cw) είτε ως παλμικό (Q switched). Αποτελεί ένα από τα ισχυρότερα laser καθώς η ισχύς του ξεπερνά τα 100 kW. Συνεπώς, βρίθκει εφαρμογών και κυρίως στον βιομηχανικό τομέα, όπως είναι για παράδειγμα η κοπή των μετάλλων, οι κολλήσεις, το γυάλισμα επιφανειών και άλλα. Τα laser αυτά έχουν αρκετά χαμηλό κόστος παραγωγής και έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 2. 12: Διαγραμματική διάταξη ενός laser CO₂

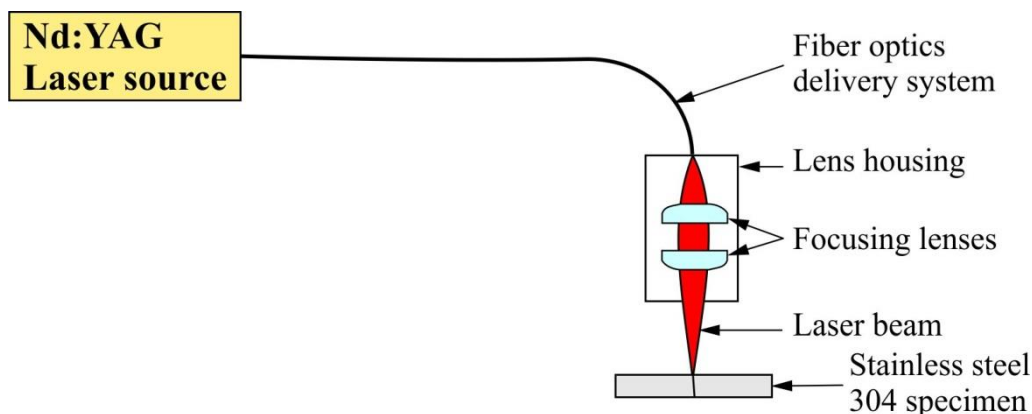
Επίσης, υπάρχουν διάφοροι τύποι των laser διοξειδίου του άνθρακα:

- α. Συνεχούς τροφοδοσίας, τα οποία επιλέγονται στην περίπτωση που η απαίτηση για ισχύ είναι μερικές εκατοντάδες Watts.
- β. Σφραγισμένου αερίου. Στην υποκατηγορία αυτή απαιτείται η ύπαρξη ενός καταλύτη, δηλαδή πραγματοποιείται διάσπαση του διοξειδίου CO_2 σε μονοξείδιο και οξυγόνο ($\text{CO} + \text{O}_2$). Χρησιμοποιείται για ισχύ εξόδου μικρότερη των 200 W. Τα laser τελευταίας γενιάς της κατηγορίας αυτής διεγείρονται με ραδιοκύματα και είναι φθηνότερα και αξιόπιστα.
- γ. Laser CO_2 με σωλήνα διαμέτρου 1 mm, προκειμένου να μην υφίστανται σημαντικές απώλειες στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Nd: YAG laser

Αποτελούν τα δημοφιλέστερα laser στερεάς κατάστασης και χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατεργασίες χάραξης, καθώς είναι κατάλληλα για την κατεργασία επιφανειών διαφόρων υλικών. Διαθέτουν ως ενεργό υλικό έναν κρύσταλλο $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Yttrium Aluminum Garnet), στον οποίο ορισμένα από τα ιόντα Y^{3+} αντικαθιστώνται από ιόντα Nd^{3+} (περίπου το 1%). Τα laser Nd: YAG λειτουργούν είτε με συνεχή είτε με παλμική ακτινοβολία. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται γραμμικές λυχνίες σε απλή ελλειπτική, κλειστής σύζευξης ή πολλαπλή ελλειπτική διάταξη. Επίσης, χρησιμοποιούνται λυχνίες ξένου (Xe) μέσης πίεσης με τιμές που κυμαίνονται από 500 – 1.500 torr και λυχνίες κρυπτού (Kr) υψηλής πίεσης των 4 – 6 atm. Το μήκος κύματος που καλύπτουν τα YAG laser φτάνει τα 1,064 μm , συνεπώς έχουν την ιδιότητα να κατεργάζονται με μεγάλη αποτελεσματικότητα μέταλλα. Τα μη μεταλλικά υλικά, όπως είναι για παράδειγμα το ξύλο και το πλαστικό, δεν κατεργάζονται εξίσου ιδανικά.

Βασικό χαρακτηριστικό του τύπου αυτού είναι ότι η αναστροφή των πληθυσμών πραγματοποιείται με τη διαδικασία της οπτικής άντλησης, δηλαδή με έντονο φωτισμό του ενεργού μέσου. Άλλες ιδιαιτερότητές του αποτελούν η υψηλή ισχύς εξόδου (είναι της τάξης των MWatt για παλμική λειτουργία) καθώς και η δυνατότητα παραγωγής παλμών μικρής χρονικής διάρκειας (της τάξης των nsec).



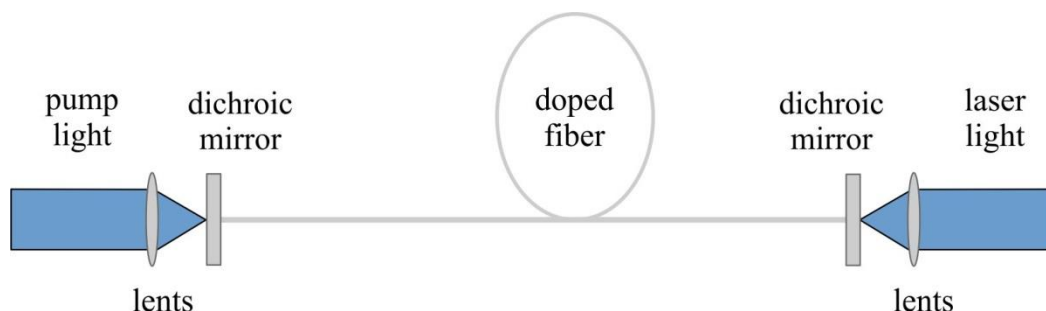
Σχήμα 2. 13: Διαγραμματική απεικόνιση ενός Nd: YAG laser

Τα συγκεκριμένα laser χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών ποικίλων τομέων. Διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία όσον αφορά την επεξεργασία υλικών με τις μεθόδους της συγκόλλησης, της διάνοιξης οπών κ.α., όπου χρησιμοποιείται ισχύς μερικών kW, υπερέχοντας μάλιστα των αντίστοιχων laser CO_2 , καθώς η δέσμη μπορεί να μεταφερθεί εύκολα στο χώρο με την χρήση οπτικής ίνας, λόγω του μήκους κύματός της. Ένας ακόμα τομέας όπου βρίσκουν εφαρμογή είναι η χειρουργική, όπου χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για καυτηριάσεις μολυσμένων περιοχών, τομές ακριβείας αλλά ακόμα και εντός του ανθρωπίνου σώματος με την χρήση οπτικής ίνας. Τέλος, βρίσκουν εφαρμογή και στον στρατιωτικό τομέα, καθώς χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις ακριβείας μεγάλων αποστάσεων.

Fiber laser

Τα fiber ανήκουν και αυτά στην κατηγορία των στερεών laser. Χρησιμοποιούν ως ενεργό υλικό μια οπτική ίνα με την πρόσμιξη στοιχείων σπανίων γαιών όπως είναι το υπερβόριο (Yb), το νεοδύμιο (Nd), το όλμιο (Ho) κ.α. Στις διατάξεις με ενεργό υλικό το Yb το μήκος κύματος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.020 – 1.070 nm, σε αντίθεση με το υλικό Ho το οποίο φτάνει έως τα 2.097 nm. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι τα fiber laser έχουν συμπαγή και στιβαρή εγκατάσταση, καθώς οι ίνες συσπειρώνονται και διαδίδουν ακτινοβολία προστατευμένη από το περιβάλλον. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η υψηλής ποιότητας και σταθερότητας ακτίνα μπορεί να εστιάζει σε πολύ μικρά σημεία καθώς και να μεταφέρεται εύκολα. Λόγω του υψηλού κέρδους αποδοτικότητας των ινών, οι συσκευές αυτές έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με πολύ μικρή ισχύ άντλησης, ενώ μπορούν να αποκτήσουν αποδόσεις πολύ μεγάλης ισχύος που φθάνουν μέχρι τα 2.000 Watt. Επιπρόσθετα, τα fiber laser είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά, καθώς μετατρέπουν μέχρι και το 80% της ισχύος που εισάγεται από την πηγή καθώς επίσης πραγματοποιείται διάχυση θερμότητας κατά μήκος ολόκληρης της ίνας με αποτέλεσμα να ψύχεται με γρήγορο ρυθμό και να προστατεύεται το laser από την υπερθέρμανση. Επίσης, έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές του περιβάλλοντος με αποτέλεσμα να αποκτούν μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται για την χάραξη αποκλειστικά μετάλλων. Μη μεταλλικά υλικά δεν μπορούν να κατεργαστούν με επιτυχία.

Παρ'όλα αυτά, οι συσκευές αυτές εμφανίζουν αρκετά μειονεκτήματα με κυριότερο ότι σε υψηλή ισχύ, υπάρχει περίπτωση βλάβης των ινών ακόμα και για τα πραγματικά όρια αντοχής του υλικού. Επίσης, τα στοιχεία με τα οποία πραγματοποιείται η ενίσχυση του ενεργού υλικού, καθιστούν την διαδικασία επικίνδυνη για πρόκληση βλαβών στα μάτια και για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η χρήση ειδικών γυαλιών. Ακόμα, σε περίπτωση βλάβης είναι δύσκολο και χρονοβόρο να επιδιορθωθούν χωρίς να επιστραφούν στον κατασκευαστή καθώς και δεν αποτελούν την πλέον ενδεδειγμένη αποτελεσματικότητα για τις περισσότερες εφαρμογές.



Σχήμα 2. 14: Διαγραμματική διάταξη ενός fiber laser

2.3.4 Κατεργαζόμενα υλικά

Οι διατάξεις των laser έχουν την δυνατότητα να κατεργαστούν πολύ μεγάλο εύρος υλικών, ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπουν, καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η κατάλληλη απορρόφηση του από το υλικό και διασφαλίζεται η βέλτιστη απόδοση της εκτέλεσης της κατεργασίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, τα υλικά αυτά ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν μπορούν να επεξεργαστούν από διαφορετικές διατάξεις των laser. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται διαχωρισμός των υλικών σε κατηγορίες.

Φυσικά υλικά

Το ξύλο αποτελεί το πιο ενδιαφέρον και προσιτό υλικό για χάραξη ή κοπή με την χρήση laser. Η χάραξη παραστάσεων στο υλικό αυτό, αποτέλεσε μια από τις πρώτες χρήσεις των διατάξεων laser. Ανάλογα με το είδος και την σκληρότητα του ξύλου προσδιορίζεται και η απαίτηση για ισχύ, παρ'όλα αυτά συνήθως δεν ξεπερνά το ποσό των 10 W. Παρ'ότι τα σκληρά ξύλα (όπως είναι για παράδειγμα η καρυδιά και η βελανιδιά) επεξεργάζονται αρκετά εύκολα και αποτελεσματικά, αντίθετα τα μαλακά παρουσιάζουν ορισμένες ιδιομορφίες. Οι συνθήκες κατεργασίας στην περίπτωση αυτή διαφέρουν καθώς η ταχύτητα κοπής – χάραξης πρέπει να είναι μεγάλη και η ισχύς ελαττωμένη. Επιπρόσθετα, για την αποφυγή δημιουργίας

σπινθηρισμών και αναφλέξεων χρειάζεται προσοχή και επαρκής παροχή καθαρού αέρα. Επίσης, το δέρμα είτε γνήσιο είτε συνθετικό, μπορεί να χαραχθεί και να κοπεί με μεγάλη ακρίβεια από μηχανήματα του τύπου CO₂ laser. Ένα επιπλέον υλικό που ανήκει στην κατηγορία των φυσικών υλικών και μπορεί να χαραχθεί είναι το χαρτί εμποτισμένο με μελάνι. Το στρώμα του μελανιού είναι αρκετά λεπτό έτσι ώστε η ακτινοβολία να το διαπερνά και μέρος αυτής να απορροφάται από το υλικό, έχοντας ως αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και ως κατά συνέπεια την αφαίρεση τμήματος μελανιού από την επιφάνεια του χαρτιού. Τέλος, στην κατηγορία των φυσικών υλικών που κατεργάζονται με επιτυχία από μηχανές laser εμπεριέχονται τα συνθετικά καουτσούκ, σκληρά χαρτόνια κ.α.

Πολυμερή

Τα πολυμερή μπορούν να χαραχθούν αποτελεσματικά με την χρήση laser. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα πλαστικά, τα ελαστομερή (ή ελαστικά), οι ίνες, τα επιχρίσματα, αφρώδη υλικά κ.α. Το στυρένιο ή αλλιώς στυρόλιο και ένας αριθμός άλλων πλαστικών υλικών, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην επιφάνειά τους, τείνουν να λιώνουν στις άκρες του σημείου χάραξης, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται παραμόρφωση στα όρια των γραμμών του σχεδίου χάραξης. Επίσης, στα συνθετικά πολυμερή ανήκει και το πολυβινυλοχλωρίδιο (ή όπως είναι γνωστό PVC), το οποίο έχει ευρεία χρήση στο βιομηχανικό και κατασκευαστικό κλάδο.

Μέταλλα

Τα μέταλλα επικαλυμμένα ή μη θεωρούνται πολύ ανθεκτικά υλικά και διαθέτουν μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών. Η κατεργασία της χάραξης του μετάλλου όλων των ειδών (όπως ατσάλι, αλουμίνιο, χυτοσίδηρος, ανθρακόνημα, χαλκός, χρυσός κ.α.) με την χρήση διάταξης laser είναι η πλέον κατάλληλη επιλογή χωρίς να υφίσταται βλάβες το υλικό. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι κατά κύριο λόγο laser Yb: Fiber, Nd: YVO₄ και Nd: YAG εξαιτίας του μικρού μήκους κύματος που διαθέτουν. Η κατεργασία της χάραξης των μετάλλων είναι ιδιαίτερα ακριβής και λεπτομερής διεργασία και αποτελεί τον αποδοτικότερο τρόπο επεξεργασίας των υλικών αυτών. Επίσης, χάραξη μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε επικαλυμμένα με σμάλτο μέταλλα, τα οποία όταν κατεργάζονται δίνουν λεπτομερές αποτέλεσμα.

Οι γυαλιστερές μεταλλικές επιφάνειες, όπως είναι τα φύλλα αλουμινίου, έχουν υψηλό συντελεστή ανακλαστικότητας της δέσμης του laser, ως κατά συνέπεια το αποτέλεσμα της κατεργασίας να είναι χαμηλής ποιότητας. Κατά την διάρκεια της χάραξης του δοκιμίου, σημάδια και λοιπές ατέλειες στην επιφάνεια του υλικού πρέπει να αποφεύγονται καθώς αντανακλούν τις ακτίνες προς τυχαίες κατευθύνσεις και κατά κύριο λόγο σε δοκίμια μεγάλου πάχους καθώς πέραν των υπολειμμάτων που απομένουν στην επιφάνεια της κοπής πραγματοποιείται μείωση της ταχύτητας και της απόδοσης της εργαλειομηχανής.

Γυαλί

Οι συσκευές laser CO₂ είναι ιδανικές για τη χάραξη ή το μαρκάρισμα γυάλινων επιφανειών. Η κατεργασία αυτή προσφέρει τη δυνατότητα ακριβούς και μόνιμης σήμανσης στο υλικό, χωρίς να επηρεάζεται η δομή του γυαλιού. Επίσης, για τη χάραξη του συγκεκριμένου υλικού μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υπεριώδη excimer laser φθωριούχου αργού (ArF) και φθοριούχου κρυπτού (KrF). Στο παρελθόν, για την επίτευξη χάραξης χρησιμοποιούταν συχνά η διαδικασία της αμμοβολής. Παρ'όλα αυτά, η ύπαρξη αρκετών μειονεκτημάτων όπως είναι η δημιουργία μεγάλης ποσότητας αποβλήτων – σκόνης, η προετοιμασία των σχεδίων και ο κίνδυνος ζημιών στο κατεργαζόμενο υλικό, οδήγησαν στην ανάπτυξη της χάραξης με laser. Το κύριο πλεονέκτημα της χάραξης με laser είναι η άμεση και ανέπαφη κατεργασία, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό τη μείωση του κόστους εργασίας. Επιπροσθέτως, καθίσταται ικανή η χάραξη πολύπλοκων και περίτεχνων λεπτομερειών ακόμα και εικόνες πολύ υψηλής ευκρίνειας. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χάραξης, η επιφάνεια του φύλλου του γυαλιού ξύνεται δημιουργώντας εσωτερικά μικρούς πόρους, καθώς το υλικό αποκολλάται ανεπαίσθητα σε ορισμένα σημεία, εξαιτίας της διαστολής των σημείων αυτών σε σχέση με το υπόλοιπο υλικό.

Κεραμικά

Το υλικό αυτό υφίσταται κατά κόρον κατεργασίες καθώς σπανίως χρησιμοποιείται στην καθαρή μορφή του. Στον τομέα της ηλεκτρονικής, τα κεραμικά λειτουργούν ως πυκνωτές και επαγωγείς καθώς δυναμώνονται με την προσθήκη ηλεκτρονικά ενεργών προσμίξεων. Επίσης, το μεγαλύτερο πλήθος των κεραμικών μπορούν να κατεργαστούν, παρ'όλα αυτά είναι δύσκολος ο καθορισμός εκ των προτέρων του είδους του laser, το οποίο θα παρέχει το καλύτερο μήκος κύματος για κάθε δείγμα.

2.3.5 Εφαρμογές των laser

Τα τελευταία χρόνια οι διατάξεις των laser έχουν εξελιχθεί σε υψηλό βαθμό και βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, συμπεριλαμβανομένων της φυσικής, της χημείας, της ιατρικής και της ηλεκτρονικής, ενώ εξακολουθεί να πραγματοποιείται ενδελεχής έρευνα για την ανάπτυξη μελλοντικών εφαρμογών με χρήση νέων ακτίνων laser ή με την εξέλιξη των ήδη υπαρχόντων.

Τον πρώτο τομέα στον οποίο το laser βρήκε μεγάλη εφαρμογή αποτέλεσε ο βιομηχανικός και κατασκευαστικός κλάδος. Οι τεχνολογίες laser στόχευαν στην αντικατάσταση των συμβατικών τρόπων κατεργασίας, με την χρήση νέων διατάξεων για την κοπή (laser cutting), τη διάτρηση (laser drilling) και την διαμόρφωση (laser etching) μεταλλικών και μη υλικών. Οι βιομηχανικές εφαρμογές πέραν των συνηθισμένων κατεργασιών όπως είναι η κοπή – χάραξη υλικών, η συγκόλληση, η διάτρηση και η λείανση, περιλαμβάνουν και πολύπλοκότερες λειτουργίες όπως την δημιουργία «μασκών» στην παραγωγή μικροκυκλωμάτων, την κατασκευή σωληνώσεων μικρής διαμέτρου μηχανικά ανθεκτικών εξωτερικά και χημικώς εσωτερικά κ.α. Επίσης, σημαντική εφαρμογή των laser αποτελεί η τοπική επιλεκτική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων μεταλλικών εξαρτημάτων με την εναπόθεση κάποιου ενισχυτικού υλικού (laser cladding). Μια σχετικά πρόσφατη εφαρμογή στον κατασκευαστικό τομέα είναι η δυνατότητα παραγωγής τελικών προϊόντων με χρήση laser (3D printing). Την τελευταία δεκαετία η τεχνολογία αυτή έχει επεκταθεί και στον ενεργειακό τομέα. Συγκεκριμένα, οι διατάξεις των laser επιτρέπουν την ανάπτυξη ενός λεπτού υμενίου στην επιφάνεια του πυριτίου, ο οποίος χρησιμοποιείται στις φωτοβολταϊκές κυψελίδες για την αύξηση της απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας.

Η ανακάλυψη του laser βασίστηκε σε θεμελιώδεις γνώσεις φυσικής και χημείας, συνεπώς ακόλουθα αναπτύχθηκαν αρκετές εφαρμογές στους δύο αυτούς κλάδους, με σκοπό την εξέλιξη θεωριών και εφευρέσεων που προϋπήρχαν καθώς και την ανακάλυψη νέων πεδίων έρευνας. Παράδειγμα ενός νέου πεδίου έρευνας αποτελεί ο τομέας της μη γραμμικής οπτικής, καθώς καθίσταται δυνατή η παρατήρηση νέων φαινομένων που προκύπτουν από τη μη γραμμική απόκριση της ύλης λόγω της υψηλής ισχύος της ακτινοβολίας του laser. Άλλο πεδίο που πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις αποτελούν οι μετρήσεις της χρονικής ανάλυσης της συμπεριφοράς διαφόρων υλικών έπειτα από διέγερση μέσω φωτεινής ακτινοβολίας μικρής χρονικής διάρκειας. Λοιπές έρευνες που εξελίχθηκαν από την τεχνολογία του laser είναι η φασματοσκοπία και η φωτοχημεία, καθώς αποτελεί το ιδανικότερο εργαλείο για τη μελέτη της δομής των μορίων και των χημικών αντιδράσεων.

Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές του laser πραγματοποιήθηκε στον τομέα της ιατρικής. Το laser τα τελευταία χρόνια έχει εισχωρήσει στις περισσότερες ιατρικές ειδικότητες όπως είναι η οφθαλμολογία, η νευροχειρουργική, η δερματολογία, η καρδιολογία κ.α. Η ιδιότητα του laser να συγκεντρώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε πολύ μικρή επιφάνεια, το κατέστησε χρήσιμο εργαλείο και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της αναίμακτης χειρουργικής όγκων, με την χρήση laser ιόντων αργού, καθώς και πολλών άλλων ειδών επεμβάσεων. Συνεπώς, η δέσμη του laser χρησιμοποιείται είτε ως διαγνωστικό εργαλείο είτε για τη δημιουργία μη αναστρεπτών μεταβολών του βιομορίου του κυττάρου ή του ιστού, με σκοπό να καυτηριάζει μολυσμένες περιοχές και μέσω οπτικών ινών επιτρέπει την εξέταση του εσωτερικού του ανθρωπίνου σώματος. Μια από τις γνωστότερες εφαρμογές του στην ιατρική είναι η χρήση του στην περίπτωση αποκόλλησης του αμφιβληστροειδούς από τον χοριοειδή χιτώνα. Η θεραπεία οφείλεται στη σύντηξη των δύο χιτώνων που έχουν αποκολληθεί, με μικρές τοπικές συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται με την χρήση της δέσμης του laser.

Ο τέταρτος τομέας στον οποίο βρήκε χρησιμότητα η τεχνολογία του laser είναι οι οπτικές επικοινωνίες. Τα πλεονεκτήματα που προέκυψαν είναι σε πρώτη φάση η δημιουργία ταλαντώσεων μεγάλου εύρους ζώνης με αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας των πληροφοριών που δύναται να μεταδοθούν μέσω ενός δεδομένου κυματικού φορέα. Με την μετάβαση από την περιοχή των μικροκυμάτων στην οπτική περιοχή, η συχνότητα αυξάνεται κατά 10^4 , επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό ταλαντώσεις μεγαλύτερου εύρους συχνοτήτων. Δεύτερον, καθώς το τυπικό μήκος κύματος του laser είναι 10^4 φορές μικρότερο του τυπικού μήκους κύματος των μικροκυμάτων, τότε το άνοιγμα της δέσμης του laser είναι 10^4 φορές μικρότερο για τα οπτικά κύματα έναντι των μικροκυμάτων.

Η χρήση των laser στις τηλεπικοινωνίες έχει εξελίξει τις διαστημικές τηλεπικοινωνίες μεταξύ των δορυφόρων ή μεταξύ δορυφόρων και επίγειων σταθμών. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση είναι του τύπου Nd: YAG ή CO₂. Επίσης, ευνοήθηκαν οι επικοινωνίες μεταξύ σημείων με οπτική επαφή, για μικρές αποστάσεις, παραδείγματος χάριν για την μεταφορά δεδομένων σε κτίριο. Οι χρησιμοποιούμενες διατάξεις στην περίπτωση αυτή είναι τα laser ημιαγωγών.

Τέλος, ένας ακόμη τομέας στον οποίο έπαιξε καταλυτικό ρόλο η ανάπτυξη της τεχνολογίας laser είναι η επεξεργασία και η καταγραφή των πληροφοριών με κωδικοποιημένη ή αναλογική γραφή. Ορισμένες από τις πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας του laser στον τομέα αυτό απαντώνται σε καθημερινές δραστηριότητες. Μια από τις πρώτες εφαρμογές του laser ήταν η δημιουργία των σαρωτών πωλήσεων στα ταμεία των καταστημάτων, οι οποίοι διαβάζουν τις κωδικοποιημένες πληροφορίες που αναγράφονται σε κάθε προϊόν. Η «ταυτότητα» του προϊόντος προσδιορίζεται σύνηθως από έναν κωδικό 10 δυαδικών ψηφίων με τη μορφή κάθετων γραμμών διαφορετικού πάχους και απόστασης μεταξύ τους, το γνωστό barcode. Μια άλλη εφαρμογή στην οποία συναντάται η ύπαρξη δέσμης laser είναι στις συσκευές ανάγνωσης και εγγραφής οπτικών δίσκων (συμπεριλαμβανομένων των MD, DVD κ.α.), που πραγματοποιείται με την χρήση συσκευών laser He-Ne για τους οικιακούς αναγνώστες δίσκων βίντεο. Η αρχή λειτουργίας σε όλες αυτές τις συσκευές είναι η ίδια.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

3.1 Εισαγωγή

Πριν την ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων κρίνεται αναγκαία η ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου στην οποία θα στηριχθεί η επίλυση του προβλήματος. Για τον λόγο αυτό, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μια αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύσσεται για την υπολογιστική διερεύνηση της ηλεκτρομαγνητικής - θερμικής μεθόδου, η οποία είναι η απαρχή της λειτουργίας του laser. Στόχος του μοντέλου αυτού είναι ο υπολογισμός του θερμικού πεδίου που αναπτύσσεται επαγωγικά περιμετρικά του δοκιμίου κατά την επαγωγική θέρμανση.

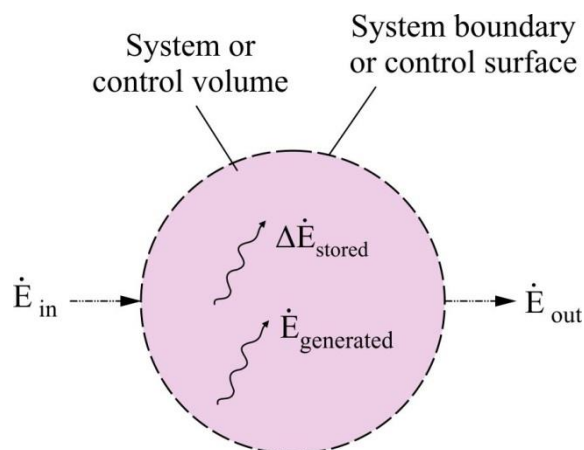
3.2 Θεωρητική ανάλυση του μοντέλου θερμικού πεδίου

Η μεταφορά της θερμότητας εμπλέκεται σχεδόν σε κάθε είδους φυσική διαδικασία, καθώς επίσης μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα για πολλές άλλες. Ως εκ τούτου, η μελέτη της κρίνεται ζωτικής σημασίας. Βασικός πυλώνας που διέπει το ισοζύγιο θερμότητας, αποτελεί ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής, ή αλλιώς όπως συνήθως αναφέρεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Χρησιμοποιώντας λοιπόν, τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο για τον όγκο ελέγχου, ο οποίος αναφέρει ότι η ενέργεια του όγκου αυτού διατηρείται ισχύει η Εξίσωση 3.1:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{generated} = \frac{dE_{stored}}{dt} \dot{E}_{stored} \quad [3.1]$$

όπου,

- \dot{E}_{in} το στιγμιαίο ποσοστό ενέργειας που υπερβαίνει τα όρια και εισέρχεται στο σύστημα ή στον όγκο ελέγχου
- \dot{E}_{out} το στιγμιαίο ποσοστό ενέργειας που υπερβαίνει τα όρια και εξέρχεται από το σύστημα ή τον όγκο ελέγχου
- $\dot{E}_{generated}$ το στιγμιαίο ποσοστό ενέργειας που παράγεται στο σύστημα ή τον όγκο ελέγχου
- \dot{E}_{stored} το στιγμιαίο ποσοστό ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα ή τον όγκο ελέγχου



Σχήμα 3. 1: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής διατήρησης της ενέργειας για μια στιγμή

Σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, μια ποσότητα ενέργειας \dot{E}_{in} διασχίζει την επιφάνεια ελέγχου εντός του όγκου ελέγχου. Παράλληλα, μια άλλη ποσότητα ενέργειας \dot{E}_{out} εξέρχεται από αυτόν. Τα δύο αυτά μεγέθη αναπαρίστανται στο Σχήμα 3.1 ως ευθύγραμμα βέλη. Επίσης, με την χρήση πυρηνικών μετατροπών, ορισμένο ποσό ενέργειας μπορεί να παραχθεί ή και να καταστραφεί. Η ενέργεια αυτή συμβολίζεται ως παραμορφωμένο βέλος μέσα στον όγκο ελέγχου ($\dot{E}_{generated}$). Στην περίπτωση που το άθροιστα των ποσοτήτων αυτών ($\dot{E}_{in} + \dot{E}_{generated}$) είναι μεγαλύτερο από την ποσότητα ενέργειας που εξέρχεται από αυτό (\dot{E}_{out}), τότε το σύστημα παρουσιάζει πλεόνασμα ενέργειας ΔE_{stored} . Σε περίπτωση μόνιμων καταστάσεων η

αποθηκευμένη ενέργεια παραμένει σταθερή, συνεπώς το δεύτερο σκέλος της Εξίσωσης 3.1 ισούται με το μηδέν. Η χρήση του όρου της ενέργειας έμμεσα αναφέρεται μόνο στη θερμική μορφή ενέργειας. Για τον υπολογισμό της εξίσωσης της μεταφοράς θερμότητας, χάριν ευκολίας, η ροή θερμότητας εξετάζεται μόνο προς την κατεύθυνση του x. Οι ποσότητες των ενεργειών στην Εξίσωση 3.1 προκύπτουν από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Energy in during time } \Delta t = (q''_x \Delta y \Delta z + [u \Delta y \Delta z \rho c_p (T - T_R)]_x) \Delta t \quad [3.2]$$

$$\text{Energy out during time } \Delta t = (q''_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z + [u \Delta y \Delta z \rho c_p (T - T_R)]_{x+\Delta x}) \Delta t \quad [3.3]$$

$$\text{Energy generated during time } \Delta t = Q \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad [3.4]$$

$$\text{Energy stored during time } \Delta t = \Delta x \Delta y \Delta z \rho c_p \Delta T \quad [3.5]$$

Έπειτα από αντικατάσταση των ποσοτήτων στην Εξίσωση 3.1 και θεωρώντας ότι Δx και Δt τείνουν στο μηδέν, χρησιμοποιώντας τον ορισμό των παραγώγων προκύπτει η Εξίσωση 3.6. Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Fourier για την αγωγή θερμότητας προκύπτει μια γενικευμένη μορφή της μεταφοράς ενέργειας για μια διάσταση του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων με σταθερές τις θερμικές ιδιότητες. Η εξίσωση αυτή (Εξίσωση 3.7) καλείται εξίσωση ενέργειας ή εξίσωση θερμότητας.

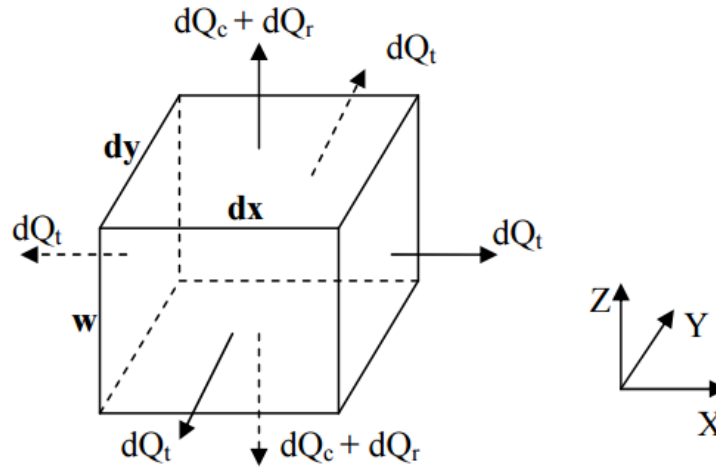
$$-\frac{\partial q''_x}{\partial x} - \rho c_p \frac{\partial}{\partial x}(uT) + Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad [3.6]$$

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{storage}} + \underbrace{\frac{\partial(uT)}{\partial x}}_{\text{flow}} = \underbrace{\frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}}_{\text{conduction}} + \underbrace{\frac{Q}{\rho c_p}}_{\text{generation}} \quad [3.7]$$

3.2.1 Υπολογισμός του θερμικού πεδίου

Στην ανάλυση που ακολουθεί υπολογίζεται ότι η πλάκα του δοκιμίου βρίσκεται στο επίπεδο xy, σε αντίθεση με τον άξονα της δέσμης του laser ο οποίος είναι παράλληλος με τον άξονα z. Θεωρώντας ότι η πλάκα είναι θερμικά λεπτή, έτσι ώστε η θερμοκρασία να κατανέμεται ομοιόμορφα στο πάχος της πλάκας w, το φαινόμενο της θερμικής αγωγής περιορίζεται στο δισδιάστατο επίπεδο xy. Συνεπώς, από την αρχή διατήρησης της ενέργειας σε ένα στοιχειώδη όγκο $dV = w dA$ ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} & [Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με αγωγή στο επίπεδο XY (dQ_t)] \\ & + [Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή στον άξονα Z (dQ_c)] \\ & + [Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία στον άξονα Z (dQ_r)] \\ & + [Ρυθμός παραγόμενης θερμικής ισχύος στον όγκο dV] \\ & = [Ρυθμός μεταβολής αποθηκευμένης ενέργειας στον όγκο dV] \end{aligned}$$



Σχήμα 3. 2: Διατήρηση ενέργειας στον στοιχειώδη όγκο dV

Αναλύοντας μαθηματικά τους όρους της παραπάνω εξίσωσης δημιουργείται η σχέση:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{h_1 + h_2}{w} (T - T_o) - \frac{(E_1 + E_2) \sigma_{SB}}{w} (T^4 - T_o^4) + p(x, y, t) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad [3.8]$$

βάση της οποίας υπολογίζεται η θερμοκρασιακή κατανομή στην πλάκα $T(x, y, t)$ σε καρτεσιανές συντεταγμένες στο επίπεδο xy . Στην Εξίσωση 3.8, k και c είναι οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας και ειδικής θερμοχωρητικότητας αντίστοιχα του υλικού του δοκιμίου, ρ η πυκνότητα του υλικού, h_1 και h_2 οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σε συναγωγή για τις δύο πλευρές του δοκιμίου, ε_1 και ε_2 οι συντελεστές εκπομπής με ακτινοβολία για τις δύο πλευρές του δοκιμίου και σ_{SB} η σταθερά Stefan-Boltzmann ή η σταθερά αναλογικότητας. Η τιμή της σταθεράς σ είναι ανεξάρτητη από το υλικό και το σχήμα των τοιχωμάτων της κοιλότητας. Η μέση τιμή των συντελεστών h_1 και h_2 υπολογίζονται από την προσεγγιστική Εξίσωση 3.9, η οποία ισχύει για μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης.

$$h_1 + h_2 = 1,91 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4} \quad [3.9]$$

όπου, $\Delta T = T - T_o$ και L το μήκος του δοκιμίου. Έστω ότι ισχύει η Εξίσωση 3.10 όπου ως T_m θεωρείται η μέση θερμοκρασία του δοκιμίου στη χρονική στιγμή t και T_a η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επίσης, ισχύει η Εξίσωση 3.11 όπου με S συμβολίζεται η επιφάνεια του δοκιμίου και P η περίμετρός του. Για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης θεωρείται ότι η αρχική θερμοκρασία του δοκιμίου ισούται με την θερμοκρασία περιβάλλοντος, δηλαδή ισχύει $T(x, y, 0) = T_a$.

$$\Delta T = \left(\frac{T_m - T_a}{2} \right) \quad [3.10]$$

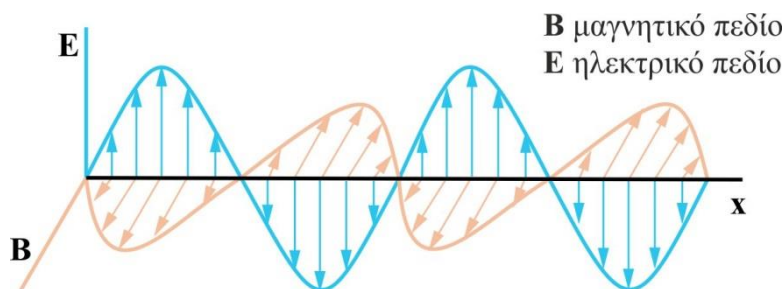
$$L = \frac{S}{P} \quad [3.11]$$

Τέλος, καθορίζονται οι οριακές συνθήκες στο δοκίμιο από την Εξίσωση 3.12 για τις πλευρές των επιπέδων xz και yz αντίστοιχα, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας από την περίμετρο του δοκιμίου.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad [3.12]$$

3.2.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ΗΜΑ)

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ορίζεται ως η εκπομπή ενέργειας στο χώρο με τη μορφή κυμάτων. Εκπέμπεται όταν διεγερμένα σωματίδια επανέρχονται σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες αποδίδοντας την περίσσεια της ενέργειάς τους με την μορφή φωτονίων. Αποτελεί ένα ημιτονοειδές κύμα, στο οποίο πραγματοποιείται συμφασική ταλάντωση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου σε κάθετα μεταξύ τους επίπεδα. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία είναι πολωμένη σε επίπεδο, δηλαδή όλες οι ταλαντώσεις, τόσο του ηλεκτρικού όσο και του μαγνητικού πεδίου, πραγματοποιούνται σε ένα μόνο επίπεδο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η μαγνητική συνιστώσα ευθύνεται για την απορρόφηση των κυμάτων ραδιοσυχνοτήτων στον πυρηνικό μαγνητικό συντονισμό (NMR).

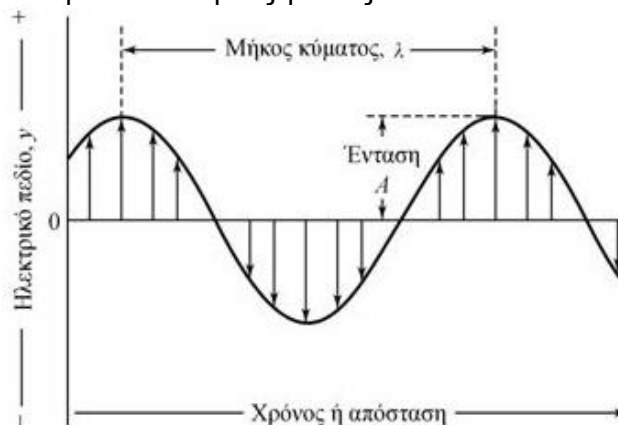


Σχήμα 3. 3: Κυματικό μοντέλο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Στο Σχήμα 3.4 το πλάτος του κύματος A προσδιορίζεται ως το μήκος του ηλεκτρικού διανύσματος από την κορυφή του κύματος. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται μεταξύ των δύο κορυφών του κύματος (μέγιστων ή ελάχιστων) καλείται περίοδος της ακτινοβολίας, το αντίστροφο της οποίας καθορίζει τη συχνότητα της δέσμης (f), δηλαδή τον αριθμό των ταλαντώσεων του πεδίου ανά δευτερόλεπτο. Η παράμετρος αυτή καθορίζεται από την πηγή και παραμένει αμετάβλητη. Το μήκος κύματος (λ) προσδιορίζει τη γραμμική απόσταση μεταξύ δύο ισοδύναμων σημείων σε συνεχόμενα κύματα. Καθώς η ακτινοβολία μεταβαίνει από το κενό σε ένα άλλο μέσο, με σταθερή συχνότητα τότε το μήκος κύματος ελαττώνεται. Το αντίστροφο του μήκους κύματος προσδιορίζει τον κυματαριθμό (k), δηλαδή το ρυθμό των επαναλήψεων στη μονάδα του μήκους. Το μέγεθος αυτό είναι ευθέως ανάλογο της συχνότητας και της ενέργειας της ακτινοβολίας. Το γινόμενο των παραμέτρων της συχνότητας και του μήκους κύματος ισούται με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο, η οποία εξαρτάται από τη σύσταση του υλικού του μέσου διάδοσης (Εξίσωση 3.13). Για το κενό η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ισούται με $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

$$c = \lambda * f \quad [3.13]$$

Η ισχύς P του ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο διέρχεται από μια μοναδιαία επιφάνεια, περιγράφει την ενέργεια της δέσμης που προσεγγίζει μια επίπεδη επιφάνεια ανά δευτερόλεπτο, ενώ η ένταση I την ισχύ ανά μονάδα στερεάς γωνίας.



Σχήμα 3. 4: Διδιάσταση διαγραμματική απεικόνιση του ηλεκτρικού διανύσματος

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα φωτός, ενώ στα υπόλοιπα υλικά η διάδοση επιβραδύνεται εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και των δεσμικών ηλεκτρονίων της ύλης. Το μέγεθος της επιβράδυνσης αυτής επηρεάζεται από τη συχνότητα των διαδιδόμενων κυμάτων. Με κριτήριο την συχνότητα αυτή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξινομούνται σε κατηγορίες, που αναφέρονται στον Πίνακα 3.1. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάδοσή τους τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αποκτούν ορισμένες ιδιότητες:

- Η συχνότητά τους διατηρείται σταθερή και ανεξάρτητη του μέσου διάδοσης
- Η ταχύτητα εξαρτάται από το υλικό – μέσο στο οποίο διαδίδονται, ενώ για ομοιογενές μέσο παραμένει σταθερή
- Το μήκος κύματος εξαρτάται από το μέσο διάδοσης και ομοίως παραμένει σταθερό όταν το μέσο αυτό είναι ομοιογενές
- Όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στην ατμόσφαιρα, τότε η έντασή τους ελαττώνεται με την διάνυση απόστασης

Συχνότητα (f)	Ζώνη	Μήκος κύματος (λ)	Περιγραφή
10 kHz – 30 kHz	VLF	30000 m – 10000 m	Πολύ χαμηλές συχνότητες– Πολύ μακρά κύματα
30 kHz – 300 kHz	LF	10000 m – 1000 m	Χαμηλές συχνότητες–Μακρά κύματα
300 kHz – 3 MHz	MF	1000 m – 100 m	Μεσαίες συχνότητες-Μεσαία κύματα
3 MHz – 30 MHz	HF	100 m – 10 m	Υψηλές συχνότητες-Βραχεία κύματα
30 MHz – 300 MHz	VHF	10 m – 1 m	Πολύ υψηλές συχνότητες-Υπερβραχεία κύματα
300 MHz – 3 GHz	UHF	1 m – 0,1 m	Υπερύψηλες συχνότητες-Δεκατομετρικά κύματα
3 GHz – 30 GHz	SHF	10 cm – 1 cm	Εξαιρετικά υψηλές συχνότητες–Εκατομεστρικά κύματα
30 GHz – 300 GHz	EMF	1 cm – 1 mm	Ακρότατα υψηλές συχνότητες-Χιλιοστομετρικά κύματα

Πίνακας 3. 1: Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Το παραπάνω κυματικό μοντέλο όμως δεν είναι σε θέση να ερμηνεύσει φαινόμενα τα οποία συνδέονται με την απορρόφηση και την εκπομπή της ενέργειας που ακτινοβολείται. Για την κατανόηση των φαινομένων αυτών εισάγεται ένα σωματιδιακό μοντέλο, κατά το οποίο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υπολογίζεται ως ένα ρεύμα διακριτών σωματιδίων, δηλαδή των φωτονίων, με ενέργεια η οποία είναι ανάλογη της συχνότητας της ακτινοβολίας. Η δισυπόσταση αυτή θεώρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι συμπληρωματική.

Το πεδίο της φυσικής το οποίο μελετά την αλληλεπίδραση των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας με την ύλη ονομάζεται φασματοσκοπία. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι πιθανό να προκαλέσει ανακατεύθυνση της ακτινοβολίας καθώς και μετάβαση μεταξύ των ενεργειακών στάθμεων των ατόμων ή των μορίων. Στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται εν συντομία διάφορες φασματοσκοπικές τεχνικές που βασίζονται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Επίσης, προσδιορίζονται τα μήκη κύματος καθώς και οι περιοχές συχνοτήτων των συγκεκριμένων περιοχών του φάσματος. Στην τελευταία στήλη καταγράφεται ο τύπος των μεταπτώσεων που πραγματοποιούνται.

Φασματοσκοπική τεχνική	Συνήθης περιοχή μήκους κύματος	Συνήθης περιοχή κυματαριθμού	Τύπος κβαντικής μετατροπής
Εκπομπή ακτίνων γ	0,005 – 1,4 Å		Πυρηνικός
Απορρόφηση, εκπομπή, φθορισμός και διάθλαση ακτίνων Χ	0,1 – 100 Å		Εσωτερικά ηλεκτρόνια
Απορρόφηση υπεριώδους κενού	10 – 180 nm	$1 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^4$	Δεσμικά ηλεκτρόνια
Απορρόφηση εκπομπής και φθορισμός UV	180 – 780 nm	$5 \cdot 10^4 - 1,3 \cdot 10^4$	Δεσμικά ηλεκτρόνια
Απορρόφηση υπέρυθρου και σκέδαση Raman	0,78 – 300 μm	$1,3 \cdot 10^4 - 3,3 \cdot 10^1$	Περιστροφή δόνηση μορίων
Απορρόφηση μικροκυμάτων	0,75 – 3,75 mm	13 - 27	Περιστροφή μορίων
Συντονισμός ηλεκτρονικού spin (ESR)	3 cm	0,33	Στροφορμή ηλεκτρονίων σε μαγνητικό πεδίο
Πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός (NMR)	0,6 – 10 m	$1,7 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-3}$	Στροφορμή πυρήνων σε μαγνητικό πεδίο

Πίνακας 3. 2: Φασματοσκοπικές τεχνικές βασιζόμενες στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

3.2.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Σε θερμοκρασίες πάνω από το απόλυτο μηδέν το σύνολο των υλικών εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή οφείλεται στις αλλαγές που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό των ατόμων καθώς τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν σε διαφορετικές ενεργειακές στάθμες, με αποτέλεσμα να εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις. Σε αντίθεση με τις δύο άλλες μεθόδους μετάδοσης με αγωγή και συναγωγή, στην ακτινοβολία δεν απαιτείται η ύπαρξη υλικού μέσου για την πραγματοποίηση της μετάδοσης., η οποία αντιθέτως ενισχύεται στο κενό. Η ακτινοβολία η οποία εξέρχεται από την επιφάνεια ενός σώματος παράγεται στο εσωτερικό του με ρυθμό ενέργειας που καλείται πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας E_b . Η μέγιστη ροή ακτινοβολίας E_b που μπορεί να εκπέμπεται από ένα σώμα κατά απόλυτη θερμοκρασία T_s υπολογίζεται από τον νόμο του Stefan – Boltzmann (Εξίσωση 3.14), κατά την οποία η ολική ένταση της εκπεμπόμενης από ένα μέλαν σώμα ακτινοβολίας εξαρτάται από την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad [3.14]$$

όπου, T_s η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας (K) και σ η σταθερά του Stefan – Boltzmann, η οποία ισούται με $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$.

$$\sigma = 5,676 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}^4} = 0,1714 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Btu}}{\text{hr ft}^2 \text{ R}^4} \quad [3.15]$$

Τα σώματα που απορροφούν όλα τα μήκη κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας χαρακτηρίζονται μελανά. Τα σώματα αυτά επομένως έχουν συντελεστή απορρόφησης ίσο με τη μονάδα. Παρόλα αυτά στην πραγματικότητα τέτοιες επιφάνειες δεν υπάρχουν. Συνεπώς, για μια κανονική επιφάνεια η ακτινοβολούσα ισχύς είναι προφανώς μικρότερη κατά απόλυτη θερμοκρασία T_s και υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.16:

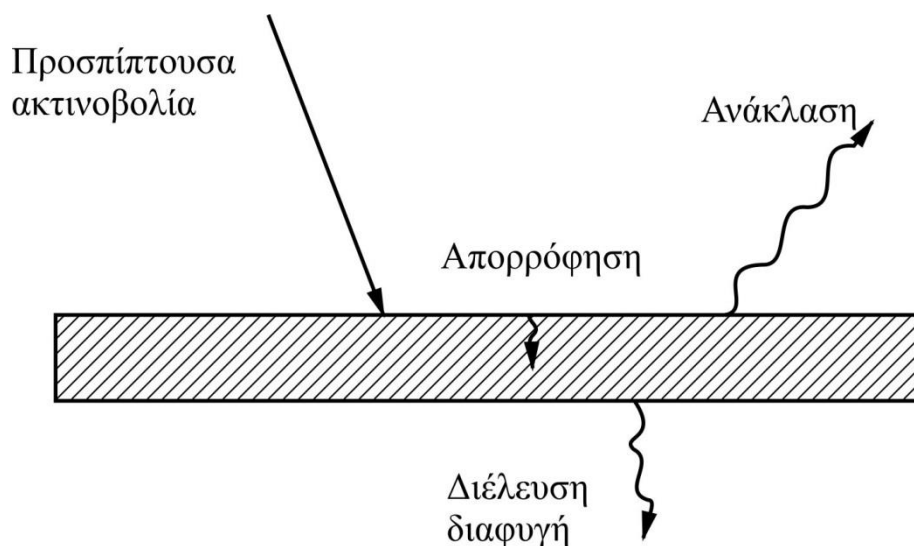
$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad [3.16]$$

όπου, ε είναι η χαρακτηριστική ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας (emissivity) και λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από την φύση του υλικού καθώς και από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

Πέραν της εκπομπής της ακτινοβολίας από την επιφάνεια του όγκου ελέγχου, πραγματοποιείται και πρόσπτωση ακτινοβολίας, η οποία παράγεται εκτός της επιφάνειας. Με την πρόσπτωση ακτινοβολίας με πυκνότητα G , ένα ποσοστό της απορροφάται από το σώμα, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την εσωτερική του ενέργεια, ένα άλλο ποσοστό ανακλάται, ενώ η υπόλοιπη ακτινοβολία μπορεί να διαπεράσει το σώμα στην περίπτωση που αυτό είναι ημιδιαφανές. Το ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφάται από το σώμα, χαρακτηρίζεται ως απορροφητικότητα α . Συνεπώς, ισχύει η Εξίσωση 3.17:

$$G_{\text{απορ}} = \alpha G \quad [3.17]$$

Η ιδιότητα της απορροφητικότητας του σώματος, όμοια με την εκπομπή, λαμβάνει τιμές μεταξύ του διαστήματος 0 και 1. Η τιμή της εξαρτάται από την επιφάνεια του σώματος όπου προσπίπτει η ακτινοβολία καθώς και από το είδος της ακτινοβολίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η ίδια επιφάνεια μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές απορροφητικότητας για ακτινοβολίες με διαφορετικό μήκος κύματος. Το μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,1 μέχρι 100 μm .



Σχήμα 3. 5: Διαγραμματική απεικόνιση των ιδιοτήτων εκπομπής και απορροφητικότητας ενός σώματος

Όσον αφορά μικρές επιφάνειες η προσπίπτουσα ακτινοβολία θεωρείται ότι προσεγγίζει αυτήν του μέλανος σώματος σε θερμοκρασία $T_{\varepsilon\xi}$. Η καθαρή ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που εξέρχεται από τέτοιες επιφάνειες, υπολογίζεται με την Εξίσωση 3.18:

$$q''_{rad} = \frac{q_{rad}}{A} = \varepsilon E_b - \alpha G = \varepsilon E_b - \varepsilon G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\varepsilon\xi}^4) \quad [3.18]$$

3.2.4 Οπτική

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πραγματοποιείται μέσω των συζευγμένων διανυσματικών πεδίων, του ηλεκτρικού και του μαγνητικού. Παρόλα αυτά η περιγραφή του συνόλου των φαινομένων που διέπουν την λειτουργία αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση μιας απλουστευμένης θεωρίας βαθμωτών πεδίων, κατά την οποία το φως αποτελεί μια βαθμωτή κυματομορφή. Αυτή η περιγραφή του φωτός καλείται κυματική οπτική.

Από τις εξισώσεις του Maxwell προκύπτει η κυματική Εξίσωση 3.19.

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad [3.19]$$

Πραγματοποιώντας διαχωρισμό των χωρικών από τις χρονικές μεταβλητές της λύσης θέτοντας την Εξίσωση 3.20 προκύπτει η Εξίσωση 3.22, στην οποία όπου k είναι σταθερά.

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{u}(x, y, z)A(t) \quad [3.20]$$

$$(\nabla^2 + k^2)\vec{u}(x, y, z) = 0 \quad [3.21]$$

$$\frac{d^2 A(t)}{dt^2} + (ck)^2 A(t) = 0 \quad [3.22]$$

Συνεπώς, στα πλαίσια της κυματικής οπτικής το μονοχρωματικό κύμα, δηλαδή η ακτινοβολία ενός laser, περιγράφεται από την βαθμωτή συνάρτηση, κατά την οποία το πλάτος \vec{E} απαιτείται να πληρεί την κυματική εξίσωση (helmholz equation).

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y, z) \exp(i\omega t) \quad [3.23]$$

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται εν συντομία η περιγραφή της εργαλειομηχανής χάραξης LASERTEC 40 της εταιρείας DMG, με την οποία είναι εξοπλισμένο το Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3), βάση της οποίας δημιουργήθηκε το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.1 Κέντρο κατεργασίας LASERTEC 40

4.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής

Η εργαλειομηχανή LASERTEC 40 (Σχήμα 4.1) αποτελεί μια διάταξη υψηλής τεχνολογίας για την χάραξη υλικών με την χρήση υψηλής ακρίβειας ακτίνας laser, η περιοχή εργασίας της οποίας έχει διαστάσεις (X/Y/Z) 400x300x500 mm, παρέχοντας νέες δυνατότητες στον βιομηχανικό τομέα. Η LASERTEC 40 αποτελεί ένα πενταξονικό κέντρο κατεργασίας με τρεις γραμμικούς και δύο οπτικούς άξονες. Μέσω αυτών, καθιστάται δυνατό να επιτευχθούν μέγιστες τιμές επιτάχυνσης καθώς επίσης και υψηλή ακρίβεια περιγράμματος ακόμα και για εύθραυστες γεωμετρίες. Διαθέτει ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου ψηφιακής καθοδήγησης CNC που παρέχουν μεγάλες δυνατότητες αποθήκευσης, γρήγορους επεξεργαστές, TFT οθόνες 15" και υποστηρικτικό λογισμικό προγραμματισμού. Το πρόγραμμα αυτό είναι το λογισμικό LaserSoft 3D, το οποίο δημιουργεί το σύνολο του κώδικα της κατεργασίας αυτόματα, έπειτα από ανάλυση των δεδομένων του αρχείου σχεδίασης που έχει εισαχθεί σε αυτό. Επίσης, η LASERTEC 40 παρέχει πλήρη προστασία της καμπίνας επεξεργασίας, στην πόρτα της οποίας υπάρχει παράθυρο ασφαλείας laser safety glass 1, καθώς και αυτοματοποιημένη καθοδήγηση CNC με δυνατότητα εισαγωγής αρχείων στο σύστημα τύπου stl και dxf.



Σχήμα 4. 1: Εργαλειομηχανή χάραξης LASERTEC 40

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής είναι:

- Μήκος : 2.850 mm
- Πλάτος : 2.476 mm
- Ύψος : 2.370 mm
- Βάρος : 2.200 kg

Η εργαλειομηχανή χάραξης παρουσιάζει μεγάλη χρησιμότητα στην επεξεργασία σχημάτων που απαιτούν μεγάλη λεπτομέρεια, καθώς διαθέτει την ικανότητα να κατεργάζεται κοιλότητες και πολύπλοκες γεωμετρίες με απότομα τοιχώματα, με πολύ υψηλή ακρίβεια. Επίσης, διαθέτει ευρεία ποικιλία κατεργαζόμενων υλικών όπως είναι οι σκληροί χάλυβες, τα καρβίδια, τα κεραμικά, ο γραφίτης, το πολυκρυσταλλικό διαμάντι (PCD) και το κυβικό νιτρίδιο του βορίου

(CBN). Ένα κύριο πλεονέκτημα της εργαλειομηχανής laser έναντι των υπολοίπων είναι ότι δεν έχει κόστος φθοράς εργαλείων, λόγω της απουσίας ανάπτυξης τριβών.

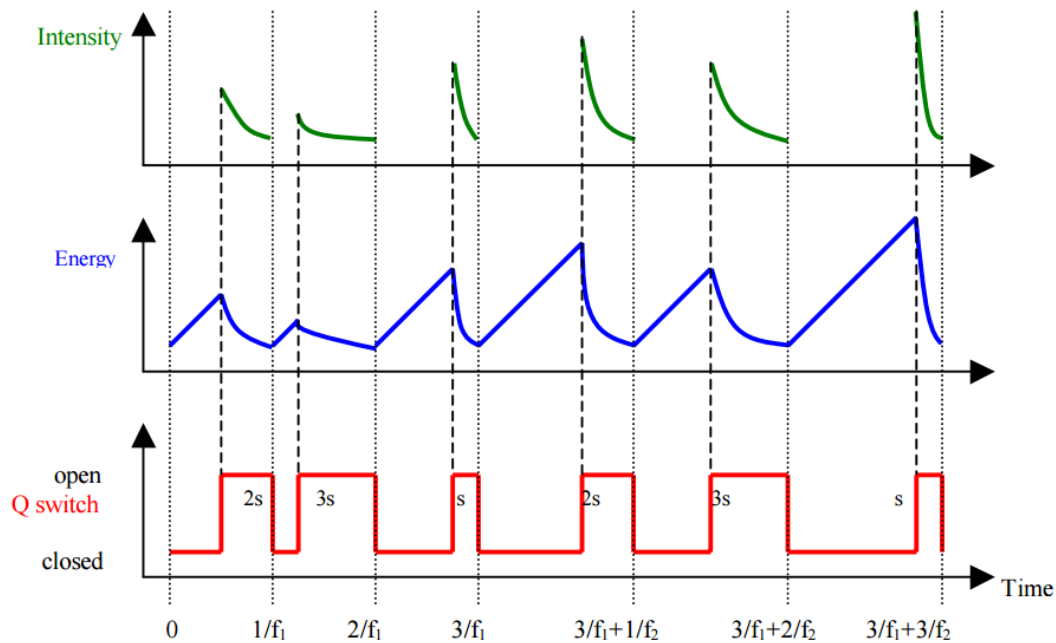
Εν συνεχεία, πραγματοποιείται μια αναφορά των στοιχείων που αποτελούν τον θάλαμο στον οποίο λαμβάνει χώρα η κατεργασία (Σχήμα 4.2). Ο θάλαμος κατεργασίας στελεχώνεται από την τράπεζα, στην οποία τοποθετείται το κατεργαζόμενο δοκίμιο, από τον φακό του laser, το φακό του φωτός, την βελόνα ανίχνευσης (probe), την κάμερα καθοδήγησης και το ακροφύσιο της σκούπας. Η δέσμη του laser κατευθύνεται με έναν σαρωτή ακριβείας με δυναμικά κάτοπτρα. Στη συνέχεια, ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης του φακού του laser πάνω από το δοκίμιο πραγματοποιείται με την χρήση του ανιχνευτή (probe), με αποδεκτή απόκλιση 1 μm . Ο ανιχνευτής της χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση κατά τον άξονα Z, δηλαδή για τον μηδενισμό της συντεταγμένης Z πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Δίπλα από την CCD κάμερα υψηλής ανάλυσης είναι τοποθετημένος ο φακός φωτός, με σκοπό τη διευκόλυνση του εντοπισμού του επιθυμητού προς χάραξη σημείου.



Σχήμα 4. 2: Τα βασικά μέρη του θαλάμου κατεργασίας

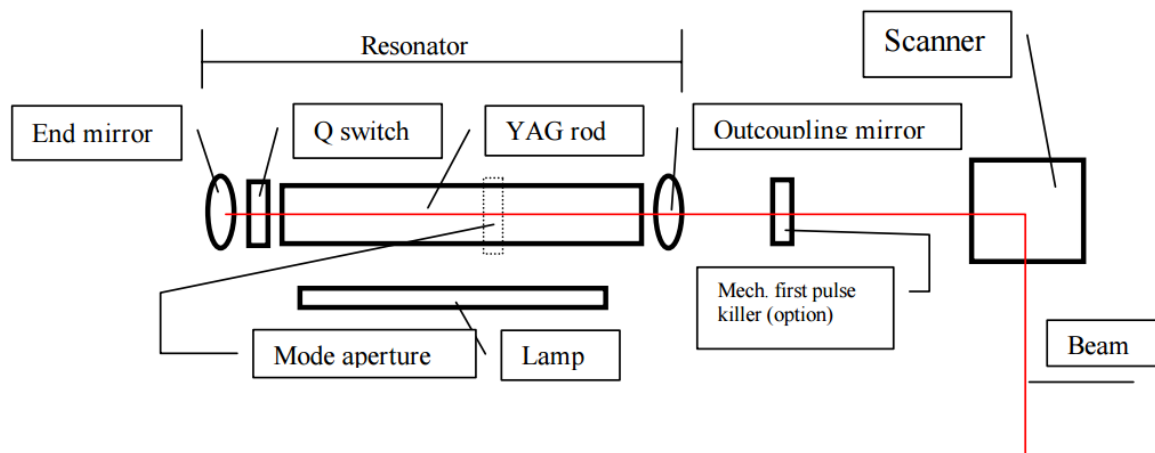
4.1.2 Χαρακτηριστικά της δέσμης του laser χάραξης

Η εργαλειομηχανή ανήκει στην κατηγορία των στερεών Fiber Laser Ytterbium (Yb: YAG) ισχύος 20 Watt με Q-switched παλμική λειτουργία. Ο διακόπτης Q-switched χρησιμοποιείται για την μεταβολή της χρονικής διάρκειας του παλμού και της ισχύος του. Για όσο χρονικό διάστημα παραμένει κλειστός η δημιουργία της δέσμης καθίσταται αδύνατη και συνεπώς η ενέργεια που προσδίδεται από την πηγή συσσωρεύεται. Με τον τρόπο αυτό, ο παλμός αποκτά μεγαλύτερη ισχύ καθώς όμως και μικρότερη διάρκεια. Ο διακόπτης Q ουσιαστικά καθορίζει την ταχύτητα σάρωσης της επιφάνειας του δοκιμίου, καθώς αυτή ορίζεται ως το δεκαπλάσιο της μετρούμενης συχνότητας σε kHz. Με το περιοδικό άνοιγμα και το κλείσιμο του διακόπτη Q, η ένταση των παραγόμενων παλμών εξαρτάται από τη συχνότητα που κλείνει ο διακόπτης και το χρονικό διάστημα που παραμένει ανοιχτός. Στην περίπτωση όπου η συχνότητα κλεισίματος παραμένει σταθερή και ο χρόνος ανοίγματος (s) μειώνεται, τότε το laser παράγει παλμούς υψηλότερης έντασης (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4. 3: Διαγραμματική απεικόνιση της λειτουργίας διακόπτη Q

Η δέσμη του laser κινείται μέσα στο αντηχείο με τη χρήση δύο κατόπτρων γαλβανομέτρων πάνω από το δοκίμιο της κατεργασίας με θεμελιώδες μήκος κύματος $\lambda=1.064 \text{ nm}$ και διάμετρο δέσμης εστίασης $30 \text{ }\mu\text{m}$. Το εύρος της συχνότητας που χρησιμοποιείται από το laser κυμαίνεται από $4 - 50 \text{ kHz}$, με αντίστοιχη ταχύτητα σάρωσης εύρους $50 - 1.000 \text{ mm/s}$ και το πάχος του υλικού που αφαιρείται ανά στρώση (layer) μπορεί να ισούται με 1 μέχρι και $15 \text{ }\mu\text{m}$, ανάλογα με το κατεργαζόμενο υλικό.



Σχήμα 4. 4: Διαγραμματική απεικόνιση του μηχανισμού λειτουργίας της εργαλειομηχανής

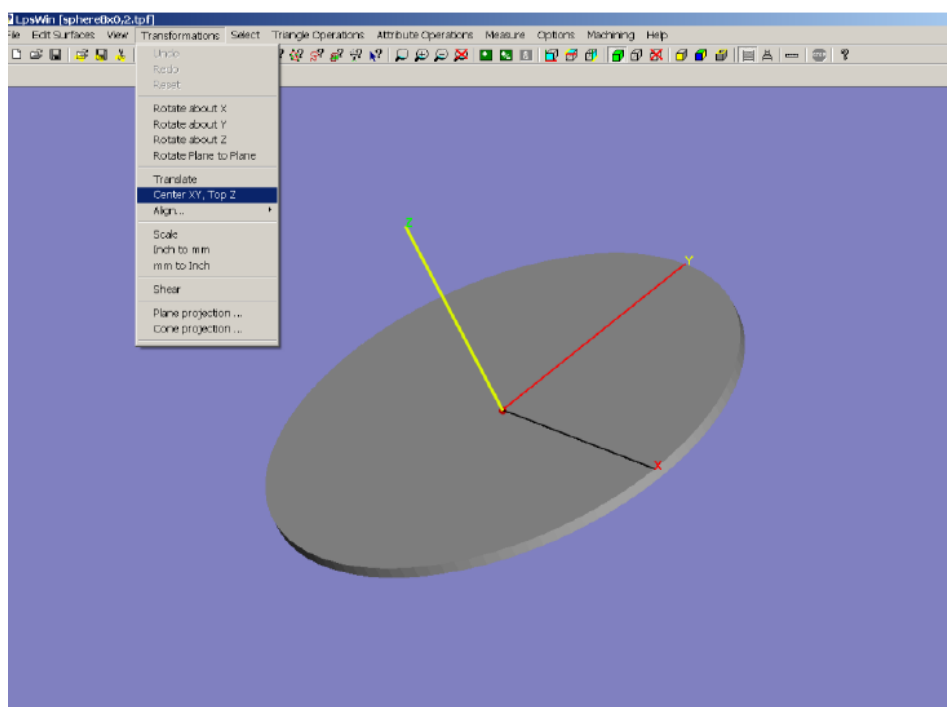
Επίσης, το σύστημα του laser ελέγχεται μέσω μιας μονάδας κεντρικού υπολογιστή ενσωματωμένης στην εργαλειομηχανή LASERTEC 40. Στη μονάδα αυτή είναι εγκατεστημένα δύο προγράμματα το LpsWin και το LaserSoft 3D που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των γεωμετρικών σχεδίων καθώς και τη ρύθμιση των παραμέτρων της κατεργασίας. Τα λογισμικά αυτά θα παρουσιαστούν εν συντομία στην επόμενη ενότητα.

4.1.3 Λογισμικά εργαλειομηχανής LASERTEC 40

Στο πρώτο στάδιο της κατεργασίας πραγματοποιείται η δημιουργία της γεωμετρίας που επιθυμείται να χαραχθεί πάνω στο δοκίμιο, με την χρήση ενός λογισμικού σχεδίασης (CAD). Τα περιγράμματα του σχεδίου πρέπει να δημιουργούν έναν κλειστό όγκο ελέγχου προκειμένου να μπορούν να επεξεργαστούν. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία του επιθυμητού αρχείου stl ή dxι που θα εισαχθεί στον κεντρικό υπολογιστή της μηχανής.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται χρήση του λογισμικού LpsWin σε σκοπό το διαχωρισμό του αντικειμένου σε στρώματα (layers), με πάχος (thickness) που ορίζεται από τον χειριστή της εργαλειομηχανής. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται εξαιτίας του γεγονότος ότι το laser επεξεργάζεται το μοντέλο αναγνωρίζοντας το στρώμα – στρώμα και αναδημιουργώντας το. Επίσης, πραγματοποιείται ο καθορισμός ορισμένων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα η κλίμακα σχεδίασης, ο ορισμός του σημείου της αρχής των αξόνων ως προς το αντικείμενο κ.α. Το LpsWin μπορεί να διαβάσει μόνο τα αρχεία τύπου stl και dxf, τα οποία αναπαριστούν το σχέδιο με τη μορφή πλέγματος συνδεδεμένων τριγώνων, αποδίδοντας με αυτόν τον τρόπο τη γεωμετρία της επιφάνειας του αντικειμένου χωρίς την ύπαρξη επιπρόσθετων χαρακτηριστικών. Με την εισαγωγή του αρχείου στο λογισμικό, αυτομάτως δημιουργείται ένα αρχείο trf, στο οποίο θα αποθηκεύεται το σύνολο των ρυθμίσεων που θα πραγματοποιηθούν. Το αρχείο αυτό, πέρα από την πλεγματική μορφή του σχεδίου αποθηκεύει πληροφορίες σχετικές με τον τρόπο εκτέλεσης της κατεργασίας.

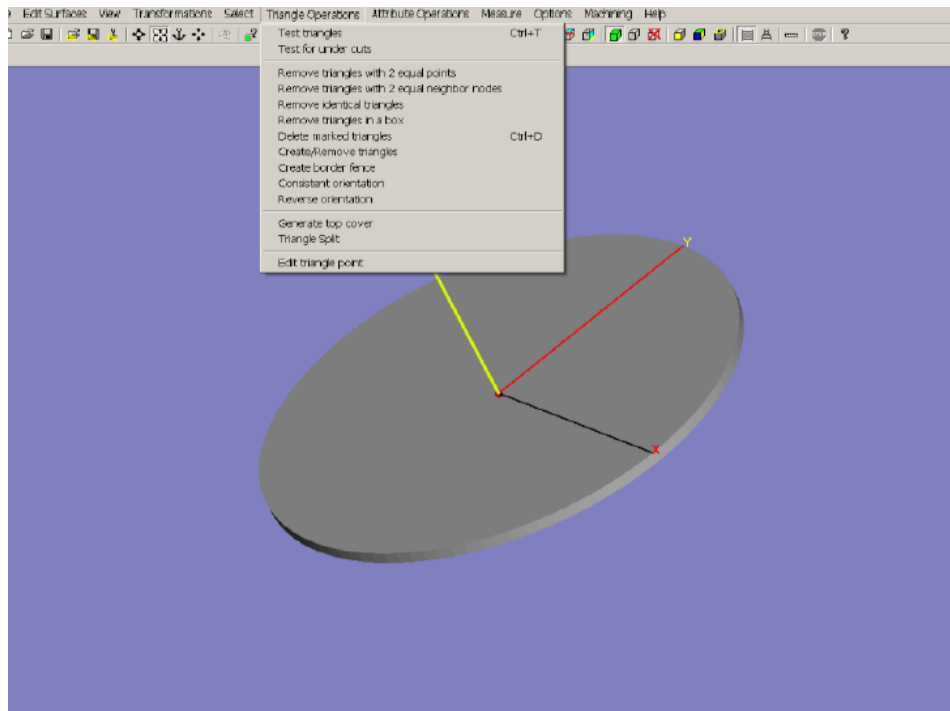
Πολύ σημαντική λειτουργία του προγράμματος LpsWin είναι ο προσδιορισμός του σημείου μηδέν πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Συνήθως, ως σημείο μηδέν επιλέγεται το κέντρο του αντικειμένου, ως προς τους άξονες X και Y και το υψηλότερο σημείο του σχεδίου ως προς τον άξονα Z. Η διαδικασία αυτή ορίζεται μέσα από την γραμμή εργαλείων του προγράμματος μέσω της εντολής “Transformations” και στην συνέχεια “Center X,Y, Top Z”. (Σχήμα 4.5). Παρ’όλα αυτά ο προσδιορισμός της αρχής των αξόνων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιοδήποτε σημείο του αντικειμένου κρίνει απαραίτητο ο χειριστής για τη διευκόλυνση της κατεργασίας.



Σχήμα 4. 5: Προσδιορισμός της αρχής των αξόνων πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου

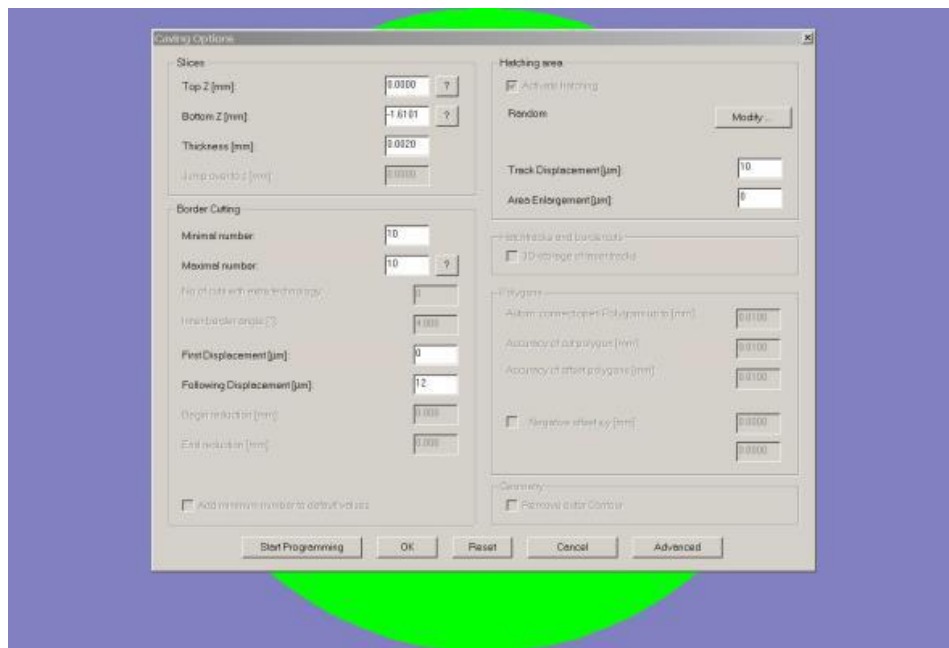
Έπειτα, πραγματοποιείται έλεγχος των τριγωνικών πλεγμάτων της επιφάνειας του σχεδίου, με σκοπό την αφαίρεση αυτών που φέρουν δύο ίδια σημεία, δύο ίδιους γειτονικούς κόμβους ή ακόμη αυτά που είναι όμοια (Σχήμα 4.6). Οι εντολές που ακολουθούνται είναι “Triangle Operations” και ακόλουθα οι επιλογές “Test triangles”, “Remove triangles with 2 equal points”, “Remove triangle with 2 equal neighbor nodes”, “Remove identical triangles”. Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι ο ορισμός των χαρακτηριστικών των τριγώνων που απαρτίζουν τα πλέγματα. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν στο πρόγραμμα να διακρίνει τις επιφάνειες που πρέπει να αφαιρεθούν πριν την έναρξη της χάραξης. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των γνωρισμάτων των τριγώνων. Το πρώτο γνώρισμα είναι το RAW, όπου τα τρίγωνα που συνορεύουν μεταξύ κοιλότητας και αέρα απεικονίζονται με

κίτρινο χρώμα. Οι επιφάνειες αυτές δεν ελέγχονται για συγκρούσεις και δε δημιουργείται “border cut”. Δεύτερο είναι το FINISH, στο οποίο με γκρι χρώμα απεικονίζονται τα τρίγωνα που συνορεύουν μεταξύ της κοιλότητας και του εναπομείναντος υλικού. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται ο προσδιορισμός του υλικού που θα αφαιρεθεί κατά τη διάρκεια της κατεργασίας χάραξης.

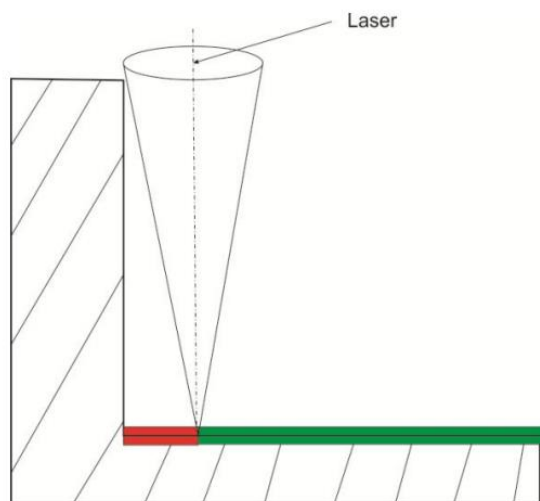


Σχήμα 4. 6: Έλεγχος και αφαίρεση τριγώνων

Ακολουθεί ο προσδιορισμός της διεργασίας της κοπής. Από την επιλογή “Caving Options” ρυθμίζονται το βάθος κάθε στρώματος χάραξης (layer) και ο μέγιστος και ελάχιστος αριθμός των κοπών περιμετρικά του σχεδίου (border cuts). Επίσης, ορίζεται η θέση του πρώτου καθώς και του τελευταίου επιπέδου που προκύπτουν από τη στρωματοποίηση. Λόγω του ότι η δέσμη του laser έχει κωνική μορφή και συνεπώς για την αποφυγή σύγκρουσής της με τα κάθετα τοιχώματα του υλικού, ο απαιτούμενος αριθμός των border cuts προσδιορίζεται αυτόματα από το σύστημα. Στο Σχήμα 4.8 με το κόκκινο ευθύγραμμο τμήμα προσδιορίζεται η περιοχή χάραξης που καλύπτεται με χρήση border cuts. Τέλος, πριν την έναρξη του προγραμματισμού της μηχανής, πραγματοποιείται η αποθήκευση του project σε αρχείο τύπου ini και της επιφάνειας σε trf αρχείο.

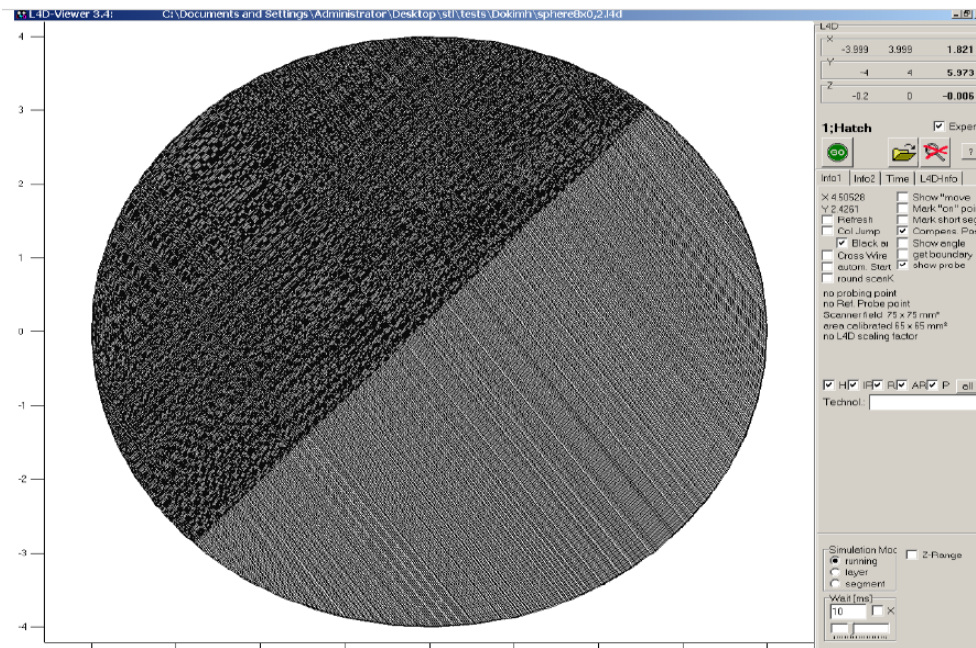


Σχήμα 4. 7: Παράθυρο παραμέτρων Carving Options



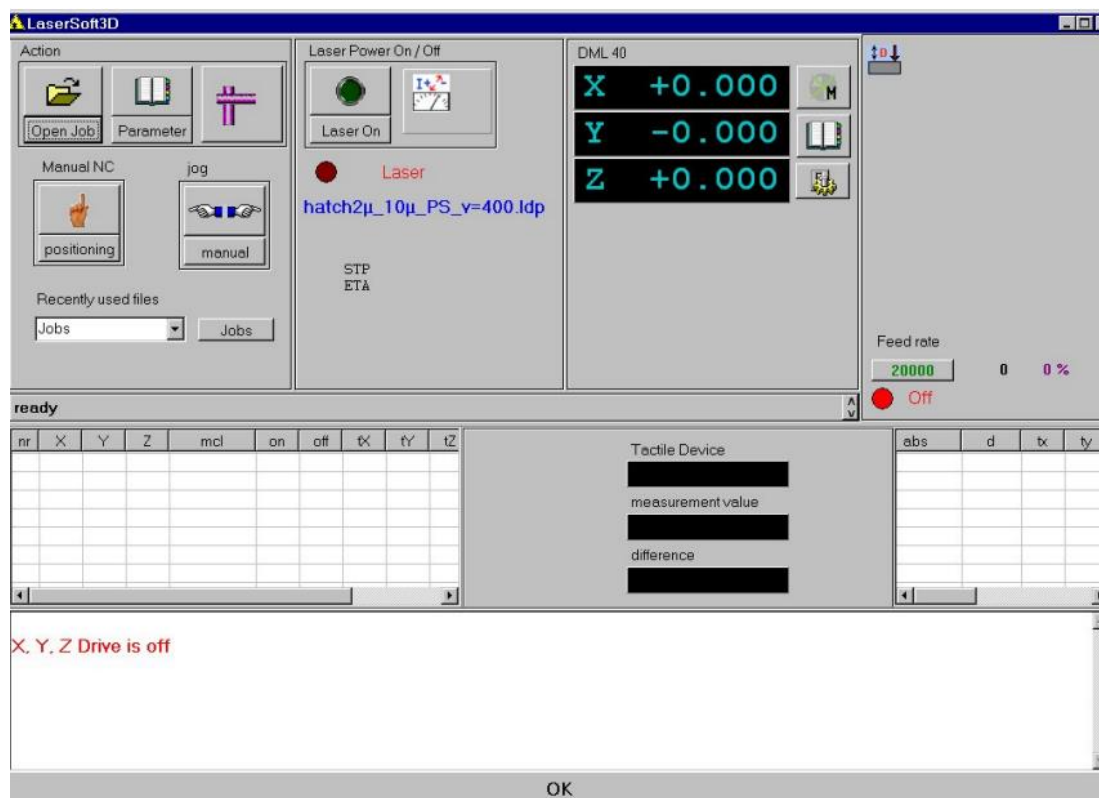
Σχήμα 4. 8: Διαγραμματική απεικόνιση της περιοχής εισαγωγής των border cuts

Πριν την έναρξη της κατεργασίας του δοκιμίου, πραγματοποιείται μια προσομοιωτική χάραξη με τη χρήση του λογισμικού L4D Viewer, κατά την οποία ελέγχεται η ορθότητα της διεργασίας και παράλληλα υπολογίζεται ο θεωρητικός χρόνος χάραξης του δοκιμίου.



Σχήμα 4. 9: Προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης μέσω του λογισμικού L4D Viewer

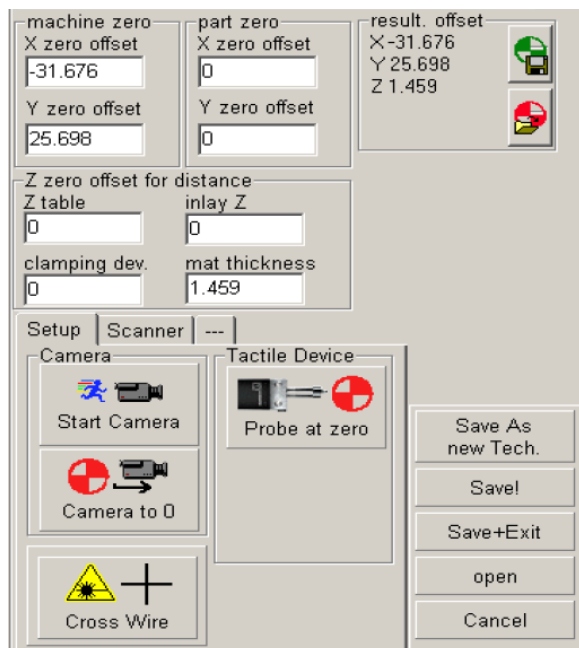
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η προετοιμασία της διαδικασίας χάραξης μέσω του λογισμικού LaserSoft 3D, το οποίο αποτελεί και το βασικό πρόγραμμα για τον χειρισμό της μηχανής. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το περιβάλλον του προγράμματος.



Σχήμα 4. 10: Περιβάλλον λογισμικού LaserSoft 3D

Αρχικά, πραγματοποιείται ο ορισμός του σημείου μηδέν πάνω στο δοκίμιο. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μετακινώντας την τράπεζα ως προς τους άξονες x, y, z και ενεργοποιώντας την κάμερα καθοδήγησης της μηχανής. Συνήθως, ο μηδενισμός του δοκιμίου γίνεται σε μια από τις γωνίες του. Μέσω της επιλογής "Measure" εμφανίζονται οι συντεταγμένες του σημείου πάνω από το οποίο βρίσκεται η κάμερα και με τη χρήση της ακίδας Probe μετράται με μέγιστη

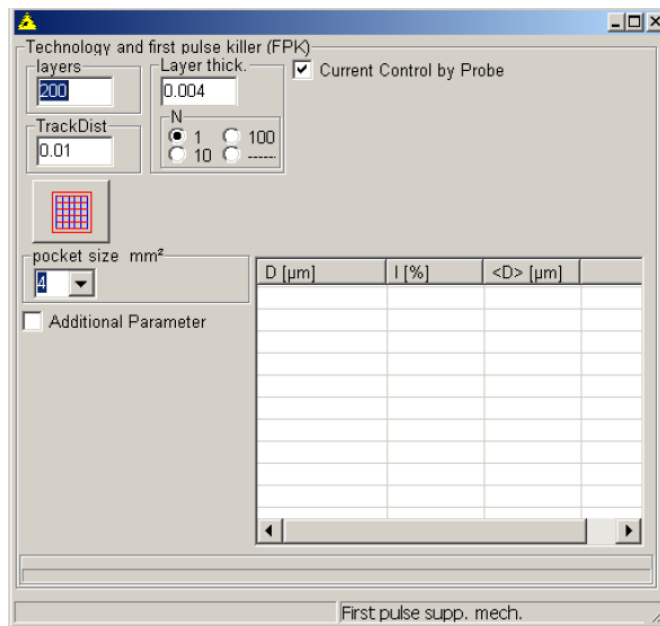
ακρίβεια η απόσταση από το σημείο μηδέν, έως ότου το περιθώριο σφάλματος της μέτρησης να μην υπερβαίνει την τιμή 0,001. Αφού ολοκληρωθεί ο μηδενισμός του δοκιμίου, ο χειριστής μπορεί να επανέλθει και να μετατοπίσει το σημείο αυτό καθορίζοντας τις επιθυμητές τιμές μέσω των επιλογών “X zero offset” και «Y zero offset”.



Σχήμα 4. 11: Επιλογή του σημείου μηδέν στο δοκίμιο

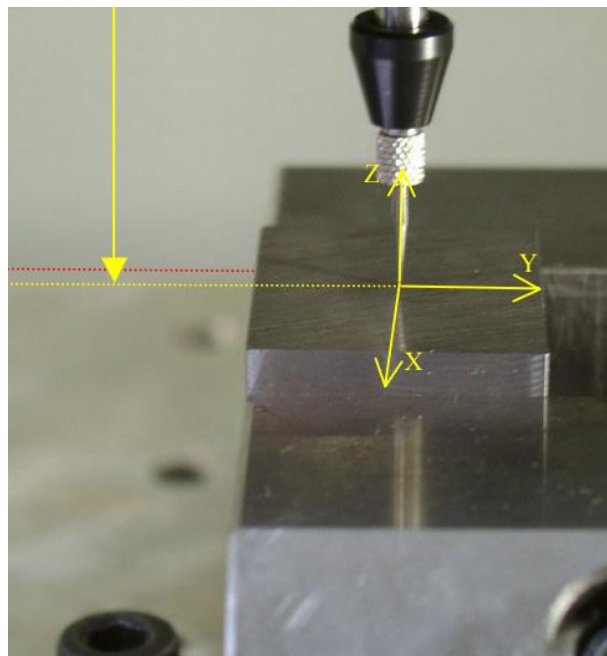
Οι βασικότερες λειτουργίες του προγράμματος είναι ο προσδιορισμός της θέσης στην οποία θα πραγματοποιηθεί η χάραξη πάνω στο δοκίμιο με την βοήθεια της κάμερας καθοδήγησης, καθώς και η ρύθμιση της κατάλληλης ισχύος που θα χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση του επιθυμητού πάχους του υλικού. Η παράμετρος της ισχύος εξαρτάται από τη σκληρότητα του υλικού που χρησιμοποιείται στην κατεργασία και προσδιορίζεται από την μηχανή, έπειτα από την υλοποίηση μιας πειραματικής χάραξης ενός τετραγώνου (technology). Με τη δημιουργία του technology ρυθμίζονται οι λεπτομέρειες της κατεργασίας χάραξης, όπως παραδείγματος χάριν είναι η ταχύτητα σάρωσης της δέσμης του laser, η ισχύς, η συχνότητα κ.α. Σε πρώτο στάδιο, ορίζεται ο μέγιστος αριθμός κοπών για τον υπολογισμό της κατάλληλης τιμής της ισχύος, καθώς επίσης και το πάχος κοπής του κάθε στρώματος (Σχήμα 4.12). Μέσω της επιλογής “rocket size” ρυθμίζεται το μήκος του δοκιμαστικού τετραγώνου. Το μέγεθος αυτό προσαρμόζεται ανάλογα με τη γεωμετρία του αντικειμένου που πρόκειται να χαραχθεί. Παραδείγματος χάριν, για την κατεργασία μεγάλων αντικειμένων χωρίς ιδιαίτερα περίπλοκη γεωμετρία το technology που επιλέγεται έχει μήκος 5 mm, αντίθετα για μικρότερες και πολυπλοκότερες επιφάνειες το μήκος του ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες των 5 mm.

Μόλις χαραχθεί το πρώτο στρώμα (layer), υπολογίζεται αν το πάχος του (layer thick) είναι ίσο με αυτό που έχει οριστεί στις παραμέτρους του λογισμικού. Σε περίπτωση που δεν επαληθευτεί η τιμή, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με διαφορετική τιμή ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που το πάχος είναι μικρότερο το ποσοστό της χρησιμοποιούμενης ισχύος αυξάνεται, ενώ σε αντίθετη περίπτωση μειώνεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειαστεί έως ότου βρεθεί η ακριβής τιμή της ισχύος που αφαιρεί το απαιτούμενο πάχος υλικού. Με το τέλος της χάραξης του technology αποθηκεύονται οι τιμές των παραμέτρων όπως έχουν ορισθεί.



Σχήμα 4. 12: Παράμετροι του technology

Έπειτα, αφού εισαχθεί το αρχείο τύπου .l4d στο λογισμικό LaserSoft3D ακολουθεί ξανά ο προσδιορισμός του σημείου πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου όπου να χαραχθεί το αντικείμενο καθώς και ο μηδενισμός του επιπέδου κατά τον άξονα Z, ο οποίος επιτυγχάνεται με την κατάλληλη μετακίνηση της τράπεζας και τη χρήση της ακίδας ανίχνευσης (probe). Το σημείο αυτό αποθηκεύεται στην παράμετρο “measure”. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις επιλογές “Probe at zero” και “Probing to Z” γίνεται επιβεβαίωση του σημείου μηδέν που έχει ορισθεί με μεγάλη ακρίβεια της τάξεως του 1 μm .



Σχήμα 4. 13: Μηδενισμός του επιπέδου στον άξονα Z με την χρήση του probe

Ακόλουθα, ενεργοποιείται η δέσμη του laser με την επιλογή “Laser on” και ξεκινάει η κατεργασία της χάραξης του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια της χάραξης, το βάθος της κοιλότητας υπολογίζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με τη χρήση της ακίδας του Probe, έπειτα από την ολοκλήρωση της χάραξης ενός προκαθορισμένου αριθμού στρωμάτων. Ανάλογα με την απόκλιση του πραγματικού βάθους από το ονομαστικό, το πρώτο αυξομειώνεται για την υλοποίηση των

επόμενων στρωμάτων. Με το πέρας της κατεργασίας στην οθόνη της εργαλειομηχανής εμφανίζεται ένα πλαίσιο διαλόγου στο οποίο αναγράφονται τα αποτελέσματα και ο συνολικός χρόνος της χάραξης του δοκιμίου.

4.2 Πρόγραμμα προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (COMSOL Multiphysics)

Το COMSOL Multiphysics παρέχει ένα ισχυρό διαδραστικό περιβάλλον για την μοντελοποίηση και την επίλυση πολλών ειδών επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων που μπορούν να περιγραφούν από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDEs). Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις περιγράφουν ποικίλους νόμους της επιστήμης και της φυσικής και αποτελούν τη βάση για την προσομοίωση μεγάλου φάσματος φαινομένων. Το λογισμικό αυτό προσφέρει στο χρήστη την δυνατότητα επίλυσης σύνθετων φαινομένων και αλληλεπιδράσεων με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, σε συνδυασμό με προσαρμοσμένη διακριτοποίηση και έλεγχο σφαλμάτων, με τη χρήση ποικίλων αριθμητικών λυτών. Αποτελεί ιδανική πλατφόρμα μοντελοποίησης και σχεδιασμού για πληθώρα εφαρμογών όπως είναι οι αισθητήρες και οι μικροηλεκτρομηχανολογικές συσκευές (MEMS), για την επίλυση προβλημάτων ανάλυσης κατασκευών, για το σχεδιασμό RF συστημάτων, σε συστήματα μετάδοσης θερμότητας, και γενικότερα σε οποιοδήποτε πρόβλημα σχεδιασμού και μοντελοποίησης συζευγμένων φυσικών φαινομένων.

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος που επιθυμείται να μοντελοποιηθεί, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι περιγραφής των μερικών διαφορικών εξισώσεων που προέρχονται μέσω των ακόλουθων μαθηματικών τρόπων εφαρμογής:

- Μορφή των συντελεστών (coefficient form), η οποία χρησιμοποιείται κατά κόρον για την επίλυση γραμμικών ή σχεδόν γραμμικών μοντέλων
- Γενική μορφή (general form), που είναι κατάλληλη για την επίλυση μη – γραμμικών μοντέλων
- Ασθενής μορφή (weak form), η οποία περιλαμβάνει τα μοντέλα με μερικές διαφορικές εξισώσεις στα όρια, στις ακμές ή σε σημεία, καθώς και για μοντέλα μικτών παραγώγων των μεταβλητών του χώρου και του χρόνου.

Συνεπώς, με τη χρήση αυτών των λειτουργιών δίνεται η δυνατότητα εκτέλεσης διαφόρων τύπων ανάλυσης, συμπεριλαμβανομένων:

- Τη στατική και τη δυναμική επίλυση
- Τη γραμμική και τη μη-γραμμική
- Την ανάλυση ιδιοτιμών (ιδιοσυχνοτήτων)

Για την υλοποίηση ενός μοντέλου με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια:

- a. Αρχικά δημιουργείται η γεωμετρία της κατασκευής ειδάλλως εισάγεται από ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το διδιάστατο ή τρισδιάστατο μοντέλο που έχει επιλεγεί
- b. Γίνεται επιλογή των υλικών του μοντέλου και ο προσδιορισμός των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους
- c. Πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της φυσικής του προβλήματος και εισάγονται προσεκτικά οι εξισώσεις των οριακών συνθηκών που περιγράφουν το πρόβλημα
- d. Προσδιορίζονται η διάρκεια και οι παράμετροι του χρονικού βήματος καθώς και τα δεδομένα της εξόδου
- e. Δημιουργείται η διακριτοποίηση - πλεγματοποίηση του μοντέλου, με καθορισμό του κατάλληλου μεγέθους του πλέγματος για τη μέγιστη ακρίβεια και εν συνεχεία επιλέγεται το είδος της επίλυσης
- f. Τα δεδομένα εισάγονται σε ένα πρόγραμμα solver που χρησιμοποιείται για την επίλυση αριθμητικών μεθόδων

- g. Μετά το πέρας της επίλυσης ολοκληρώνεται η μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων μέσω ενός προγράμματος post processor και τα δεδομένα επιστρέφονται για οπτικές αναπαραστάσεις που βοηθούν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του προβλήματος

Οι βιβλιοθήκες του COMSOL συνεχώς εμπλουτίζονται με νέα εργαλεία, με αποτέλεσμα την αύξηση των εφαρμογών και προβλημάτων που μπορεί αυτό να επιλύσει. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι παρέχεται σημαντικό πλεονέκτημα καθώς έχει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης και με άλλες ευρέως χρησιμοποιούμενες εφαρμογές όπως το MATLAB, το PROEngineer και το AutoCAD. Η παρούσα εργασία διενεργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics 5.0.

5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΓΧΑΡΑΞΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και ο τρόπος με τον οποίο αυτή εμπλέκεται στην προσομοίωση ποικίλων μηχανουργικών κατεργασιών. Εν συνεχεία μελετάται η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με την χρήση δέσμης laser.

5.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η λειτουργία της βασίζεται σε τρεις κύριες επιστημονικές περιοχές, στις ενεργειακές μεθόδους της μηχανικής (energy methods), στη θεωρία των μαθηματικών προσεγγίσεων (approximation theory) καθώς και στα συστήματα σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design). Αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλου εύρους προβλημάτων όπως για παράδειγμα για τον υπολογισμό παραμορφώσεων σε κατασκευές, ανάλυσης τάσεων, ανάλυσης πεδίων ροής κ.α. Η αναλυτική υπολογιστική λύση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τα διάφορα αυτά προβλήματα, δύναται να πραγματοποιηθεί μόνο σε ελάχιστες των περιπτώσεων όπου η επίλυσή τους είναι απλής μορφής. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η αναγκαιότητα της ανάπτυξης εργαλείων για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων με απλό και εύκολο τρόπο. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται μέσω της χρήσης των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης:

- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM)
- Μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM)
- Μέθοδος πεπερασμένων όγκων (FVM)
- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FDM)

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι βασίζονται στην προσέγγιση Galerkin, με μια διαφοροποίηση μόνο στον τρόπο προσέγγισης της λύσης. Αρχικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτέλεσε μια ενεργειακή μέθοδο για την επίλυση διδιάστατων φορέων σύμφωνα με τις μεθόδους Rayleigh-Ritz και Galerkin, τις οποίες μετέφερε ουσιαστικά από το χώρο των συνεχών συστημάτων στα διακριτά. Έπειτα, επικράτησαν οι αρχές των ισοπαραμετρικών στοιχείων, οι οποίες εξασφαλίζουν ακρίβεια στους υπολογισμούς και βελτιώνουν τον ενιαίο προγραμματισμό της μεθόδου. Η μέθοδος αυτή παρ'ότι προσεγγιστική προσδίδει αξιοπιστία αποτελεσμάτων και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλων των ειδών τα προβλήματα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στην ευρεία γενίκευσή της, καθώς όπως αναφέρθηκε ήδη βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος διαφορετικών μεταξύ τους προβλημάτων. Κύριο μειονέκτημά της αποτελούν οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Θεμελιώδης αρχή της αποτελεί η αντικατάσταση του σύνθετου αρχικού γεωμετρικού προβλήματος από ένα σύνολο απλούστερων δομικών στοιχείων, τα ονομαζόμενα πεπερασμένα στοιχεία. Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη καθώς:

- a. Δύναται να περιγράψει οποιεσδήποτε οριακές συνθήκες
- b. Επίλυει προβλήματα ασυνεχειών
- c. Εφαρμόζεται για ισότροπα καθώς και για ανισότροπα υλικά
- d. Μοντελοποιεί ελαστική, πλαστική και βισκοελαστική συμπεριφορά
- e. Εφαρμόζεται για περιπτώσεις στατικής αλλά και δυναμικής φόρτισης

Για την ανάπτυξη της μεθόδου αρχικά παρουσιάζονται τα στοιχεία του λογισμού των μεταβολών (calculus of variations), προκειμένου να καταστούν κατανοητές οι σχέσεις των παραλλακτικών αρχών (variational principles). Ακόλουθα, παρουσιάζονται οι ενεργειακές αρχές και οι μαθηματικές μέθοδοι που κρίνονται αναγκαίες για τη διατύπωση των εξισώσεων και των συνοριακών συνθηκών που περιγράφουν το κάθε πρόβλημα. Σύμφωνα με τις ενεργειακές αρχές δημιουργούνται οι εξισώσεις ισορροπίας της δοκού, της θεωρίας των πλακών της επίπεδης ελαστικότητας κ.α.

5.1.1 Μέθοδοι Rayleigh - Ritz και Galerkin

Για την επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής μηχανικής, τις πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους αποτελούν οι Rayleigh – Ritz και Galerkin. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται ως μια ειδική διατύπωση των μεθόδων αυτών, υπερτερώντας ως προς τις αρχικές διατυπώσεις, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που την διέπουν σε περιπτώσεις σύνθετων γεωμετριών καθώς και λόγω της απλούστερης διατύπωσής της σε μορφή κώδικα για τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Μέθοδος Rayleigh - Ritz

Πρώτος ο Rayleigh το 1870 προσδιόρισε τις μετατοπίσεις ενός ταλαντευόμενου σώματος, κάνοντας χρήση ενός προσεγγιστικού πεδίου ενός βαθμού ελευθερίας, ενώ σχεδόν σαράντα χρόνια μετά ο Ritz εξέλιξε ένα λεπτομερέστερο και ακριβέστερο πεδίο χρησιμοποιώντας περισσότερες συναρτήσεις, προκειμένου να ικανοποιούνται οι αναγκαίες οριακές συνθήκες. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή εφαρμογής της μεθόδου για σώμα υπό στατική φόρτιση. Για την επίλυση των προβλημάτων της μηχανικής του παραμορφώσιμου σώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αρχή ελάχιστης ολικής δυναμικής ενέργειας. Σύμφωνα με τη μέθοδο κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός ενός πεδίου μετατοπίσεων με τη μορφή σειρών απείρων όρων, που συγκλίνουν με ικανοποιητική ακρίβεια για έναν αριθμό πεπερασμένων στοιχείων. Η μετατόπιση κάθε σημείου του σώματος περιγράφεται από τις συνιστώσες u , v , w στις κατευθύνσεις του συστήματος αναφοράς Ox , Oy και Oz .

[5.1]

$$u = \sum_{i=1}^1 \alpha_i f_i$$

[5.2]

$$v = \sum_{i=l+1}^m a_i f_i$$

[5.3]

$$w = \sum_{i=m+1}^n a_i f_i$$

Η επιλογή των συναρτήσεων f_i γίνεται έτσι ώστε το πεδίο των μετατοπίσεων να είναι κινηματικά αποδεκτό, δηλαδή να ικανοποιεί τις αναγκαίες οριακές συνθήκες του προβλήματος και να είναι «αρκούντως» συνεχές. Οι συναρτήσεις αυτές εκφράζονται με πολυωνυμική μορφή και για τη διατύπωση μιας συγκεκριμένης λύσης χρησιμοποιείται ένας πεπερασμένος αριθμός όρων κάθε σειράς. Χρησιμοποιώντας το πεδίο μετατοπίσεων για την έκφραση της ολικής δυναμικής ενέργειας ενός συγκεκριμένου συστήματος, η ολική δυναμική ενέργεια μπορεί να εκφραστεί από την Εξίσωση 5.4, δηλαδή συναρτήσει των αγνώστων συντελεστών α_i , οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως γενικευμένες συντεταγμένες του προβλήματος καθώς ελέγχουν την προσαρμογή των μετατοπίσεων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του. Θέτοντας τη μεταβολή της ολικής δυναμικής ενέργειας ίση με το μηδέν προκύπτει το παρακάτω σύστημα (Εξίσωση 5.5).

$$\pi = \pi(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_r) \quad [5.4]$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial \alpha_i} = 0 \quad \text{όπου} \quad i = 1, 2, \dots, r \quad [5.5]$$

Επιλύοντας τα σύστημα των Εξισώσεων 5.5 για συγκεκριμένες τιμές των α_i υπολογίζονται τα πεδία των μετατοπίσεων u, v και w . Με την παραγωγή των πεδίων αυτών εκτιμώνται οι σχέσεις των παραμορφώσεων και μέσω αυτών υπολογίζονται οι τάσεις σε κάθε σημείο του σώματος. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής κρίνεται από την επιλογή των συναρτήσεων f_i . Για το λόγο αυτό, συνήθως επιλέγονται πλήρη πολυώνυμα κάποιας τάξης, με ορισμένους συντελεστές να απαλείφονται με τη χρήση των οριακών συνθηκών, ενώ οι υπόλοιποι προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων.

Μέθοδος Galerkin

Η μέθοδος αυτή στοχεύει στην εύρεση προσεγγιστικών λύσεων των διαφορικών εξισώσεων ή των συστημάτων διαφορικών εξισώσεων σε κάποιο πεδίο. Επιδρά επί της διαφορικής εξίσωσης και όχι κάποιου συναρτησιακού όπως για παράδειγμα η ολική δυναμική ενέργεια του συστήματος, με αποτέλεσμα να προσφέρεται για την επίλυση προβλημάτων που δε διατυπώνονται συναρτησιακές – ενεργειακές αρχές.

Έστω ότι μια γραμμική διαφορική εξίσωση (Εξίσωση 5.6) η οποία διαθέτει ομογενείς οριακές συνθήκες, όπου η παράμετρος L αντιπροσωπεύει οποιονδήποτε γραμμικό διαφορικό τελεστή. Εκφράζοντας την προσέγγιση της λύσης με τη μορφή μιας σειράς όρων βασιζόμενων στην επιλογή ορισμένης βάσης συναρτήσεων (Εξίσωση 5.7) και αντικαθιστώντας στη διαφορική εξίσωση τότε προκύπτει κάποιο υπόλοιπο Εξίσωση 5.8.

$$Lu = f \quad [5.6]$$

$$\tilde{u} = \sum_{i=1}^n a_i f_i \quad [5.7]$$

$$L\tilde{u} - f = \varepsilon \quad [5.8]$$

Σύμφωνα με τη συνθήκη ορθογωνικότητας για τον μηδενισμό του υπολοίπου στο χώρο των n διαστάσεων, από την Εξίσωση 5.9 εξέρχονται n αλγεβρικές εξισώσεις ως προς n άγνωστες γενικευμένες συντεταγμένες a_i , για την εξασφάλιση της καλύτερης προσέγγισης στο χώρο των συναρτήσεων f_i . Όσο ο αριθμός των συναρτήσεων αυξάνεται τότε βελτιώνεται η προσέγγιση.

$$\iiint_V \varepsilon \varphi_i dv = \iiint_V (L\tilde{u} - f) f_i dv = 0 \quad \text{όπου } i = 1, 2, \dots, n \quad [5.9]$$

5.1.2 Μέθοδοι Lagrange Euler και ALE

Τη σημαντικότερη λειτουργία κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας χάραξης με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί η επίτευξη του διαχωρισμού του ακατέργαστου υλικού του δοκιμίου και η μετατροπή του σε κατεργασμένο υλικό και σε απόβλιττο. Για την μοντελοποίηση υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις με βάση την κίνηση του πλέγματος του μοντέλου συγκριτικά με την κίνηση του υλικού.

Μέθοδος Lagrange

Η περίπτωση αυτή επιφέρει την ακριβέστερη επίλυση του προβλήματος, καθώς το πλέγμα αφομοιώνεται με το υλικό και την κινηματική του στο χώρο, καθώς η μελέτη πραγματοποιείται για συγκεκριμένα στοιχεία του υλικού, συνεπώς μελετάται η τροχιά που διαγράφουν στο χώρο. Τα πεπερασμένα στοιχεία μεταβάλλονται ως προς το σχήμα και τον προσανατολισμό τους καθώς το υλικό εισέρχεται σε ζώνες παραμόρφωσης. Για τον λόγο αυτό, το διάνυσμα θέσης κάθε στοιχείου εξαρτάται από την αρχική του θέση στο χώρο και ορίζεται συναρτήσει του χρόνου. Κατά τη μελέτη των προβλημάτων και σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το υλικό μοντελοποιείται και παραμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχει ροή υλικού μεταξύ των στοιχείων. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς στα πλέγματα κατά Lagrange, οι κόμβοι, τα σημεία και τα στοιχεία κινούνται συγχρόνως με το υλικό. Λόγω της σύνδεσης του πλέγματος με το υλικό του δοκιμίου, το πλέγμα καταστρέφεται εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή κατεργασίας.

Κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου Lagrange αποτελεί το γεγονός ότι η ελεύθερη επιφάνεια του υλικού, δηλαδή το υλικό στα όρια της γεωμετρίας, καλύπτεται αυτόματα από το πλέγμα, εξυπηρετώντας στην ευκολότερη διατύπωση των οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες του μηχανικού προβλήματος που εκφράζονται για τα στοιχεία των εξωτερικών γεωμετριών ορίων του υλικού, παραμένουν σταθερές παρά τις παραμορφώσεις που υφίσταται το πλέγμα, απλοποιώντας κατ'αυτόν τον τρόπο σε σημαντικό βαθμό την επίτευξη της αριθμητικής λύσης του. Αντίθετα, η μέθοδος αυτή μειονεκτεί σε περίπτωση ύπαρξης υψηλών παραμορφώσεων, καθώς η ακρίβεια της λύσης μειώνεται σε σημαντικό βαθμό καθιστώντας την ανεπαρκή. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού πραγματοποιείται ένας συνεχής επανασχηματισμός του πλέγματος (remeshing). Με την μέθοδο Lagrange πέρα από την επίτευξη μέγιστης δυνατής

ακρίβειας, πραγματοποιείται και αύξηση στον απαιτούμενο χρόνο επίλυσης. Λοιπά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι κάθε στοιχείο αντιστοιχείται σε ένα μόνο υλικό, καθώς επίσης δεν δύναται ικανή η παροχή πληροφοριών για κομμάτια του υλικού που αφαιρούνται (φθορά υλικού).

Μέθοδος Euler

Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται για μοντελοποίηση κατεργασιών όπου οι συνθήκες διατηρούνται σταθερές, καθώς τα πεπερασμένα στοιχεία παραμένουν σταθερά στο χρόνο χωρίς να υφίστανται παραμορφώσεις. Αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση κατασκευαστικών κατεργασιών κατά τις οποίες πραγματοποιούνται υψηλές παραμορφώσεις, καθώς και για τον κλάδο της ρευστομηχανικής όπου και βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλο βαθμό. Η μέθοδος Euler, σε αντίθεση με την Lagrange, μελετά την κίνηση συγκεκριμένων σημείων στο χώρο, χωρίς να εξετάζει τον αριθμό των στοιχείων του υλικού που περνούν από κάθε σημείο του χώρου. Συνεπώς, για το χώρο αυτό ορίζεται ένα διανυσματικό πεδίο ταχύτητας, το οποίο μπορεί παραμένει σταθερό στο χρόνο ή να μεταβάλλεται (μόνιμο και μη – μόνιμο πεδίο ροής). Τα πεδία της ταχύτητας, πυκνότητας και πίεσης προσδιορίζονται από τις Εξισώσεις 5.10, 5.11 και 5.12 αντίστοιχα.

$$\vec{c} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} = \vec{c}(x, y, z, t) = \vec{c}(\vec{r}, t) \quad [5.10]$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t) = \rho(\vec{r}, t) \quad [5.11]$$

$$P = P(x, y, z, t) = P(\vec{r}, t) \quad [5.12]$$

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η ποσότητα των στοιχείων της μοντελοποίησης του κατεργαζόμενου δοκιμίου και του αποβλήτου είναι μικρή και το γεγονός ότι δεν υφίσταται στρέβλωση εφόσον το πλέγμα είναι γνωστό εκ των προτέρων. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η δυσκολία στον προγραμματισμό του μοντέλου καθώς τα πειραματικά δεδομένα πρέπει να είναι γνωστά εκ των προτέρων για την κατασκευή του. Λοιπά μειονεκτήματα είναι η ανάγκη πυκνού πλέγματος για την ακριβή αναπαράσταση της συμπεριφοράς του υλικού, έχοντας ως αποτέλεσμα υψηλό υπολογιστικό κόστος και δυσκολία στην διατύπωση και διαχείριση των κινούμενων οριακών συνθηκών.

Μέθοδος ALE

Η μέθοδος ALE αποτελεί ένα συνδυασμό των δύο μεθόδων κατά Lagrange και κατά Euler. Στη μέθοδο αυτή το υπολογιστικό πλέγμα ακολουθεί την φυσική διεπαφή. Ως εκ τούτου, το πλέγμα στο εσωτερικό του υλικού κινείται αυθαίρετα προκειμένου να βελτιστοποιεί το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ αντίθετα στα όρια του δοκιμίου κινείται μαζί με το υλικό. Συνεπώς, κατά τη μέθοδο αυτή επιτρέπεται η δημιουργία τριών ειδών πλεγμάτων. Από ένα ευέλικτο πλέγμα για κάθε πλέγμα Lagrange και Euler καθώς και ένα πλέγμα ALE το οποίο επιτρέπει την κίνηση του υλικού μέσα σε αυτό. Παρ' ότι οι δύο άλλες μέθοδοι προσδίδουν υψηλότερη απόδοση κατά την προσομοίωση κινούμενων διεπαφών (level set method, VOF method, front-tracking method), η μέθοδος ALE υπερέχει σε δύο σημεία. Πρώτο και κυριότερο πλεονέκτημα είναι ότι κατά τη διάρκεια της επίλυσης δεν παρουσιάζονται τοπολογικές αλλαγές στο υλικό, καθώς επιδέχεται εξομάλυνση στο παραμορφωμένο πλέγμα χωρίς την συνολική αναδιακριτοποίησή του. Δηλαδή, με τη μέθοδο ALE δε δημιουργούνται ούτε διαγράφονται στοιχεία. Δεύτερον, για την επίτευξη υψηλής απόδοσης κατά την προσομοίωση τρισδιάστατων μοντέλων, ιδιαίτερη σημασία κατέχει ο προσδιορισμός της θέσης διεπαφής με την προσθήκη επιπλέον ορισμένων φυσικών εξισώσεων στην επιφάνεια διεπαφής. Το σύστημα των εξισώσεων αυτών προκύπτουν από την θεωρία Shikhmurzaev ή από μοντελοποίηση επιφανειοδραστικών πολυμερών. Συνήθως, στις κατεργασίες διαμόρφωσης ή αφαίρεσης υλικού κατά τις οποίες δημιουργούνται υψηλές μηχανικές καταπονήσεις, έχοντας ως αποτέλεσμα η τελική μορφή του δοκιμίου μετά το πέρας της διεργασίας να διαφέρει σημαντικά από την αρχική, το κοπτικό εργαλείο μοντελοποιείται με τη μέθοδο Lagrange και το κατεργαζόμενο δοκίμιο με τη μέθοδο ALE.

Η μέθοδος ALE εφαρμόζεται ως ένας νέος τομέας φυσικής κατά τη μοντελοποίηση συνδυαζόμενη με το αρχικό πρόβλημα μηχανικής, δεδομένου ότι οι εξισώσεις Navier – Stokes οι οποίες καθορίζονται για κάθε τμήμα του προσομοιωτικού μοντέλου (domain) συμπληρώνονται από τις οριακές συνθήκες της κινηματικής. Η ταχύτητα διακριτοποίησης εξ ορισμού καθορίζεται από την εξίσωση Laplace (εξίσωση 5.13), η οποία συμπληρώνεται από τις κατάλληλες οριακές συνθήκες (εξίσωση 5.14).

$$\nabla^2 \vec{v} = 0 \quad [5.13]$$

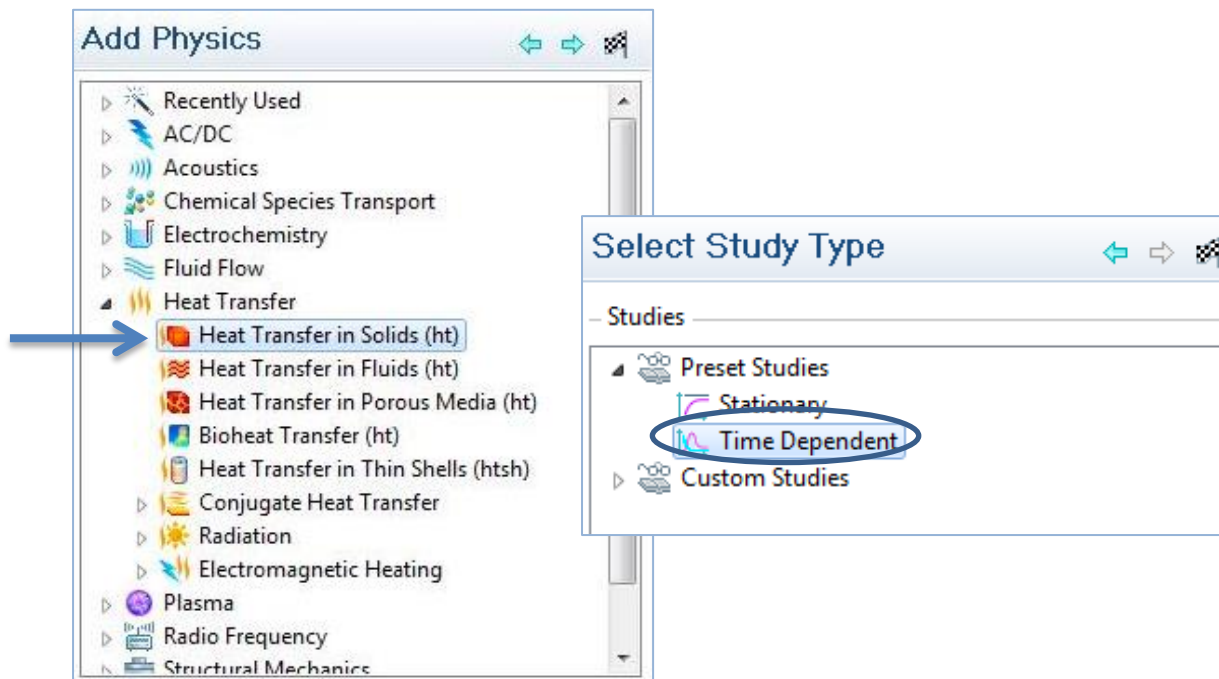
$$\vec{v}|_{interface} = (\vec{u} * \vec{n})\vec{n}|_{interface} \quad [5.14]$$

5.2 Μοντέλο Προσομοίωσης

Η χάραξη με laser αποτελεί μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού σε στρώματα (layers) από το κατεργαζόμενο δοκίμιο μέσω εξάχνωσης. Το δοκίμιο αυτό είναι ένα δίσκιο αλουμινίου το οποίο θερμαίνεται από τη δέσμη του laser δηλαδή από τη θερμική πηγή που κινείται ακτινικά πάνω από το δοκίμιο με την πάροδο του χρόνου. Μέσω της διαδικασίας της μοντελοποίησης πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μέγιστων, των μέσων και των ελάχιστων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο σύστημα καθώς και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας κατά μήκος του δοκιμίου. Επίσης, σημαντικός παράμετρος της διαδικασίας είναι ο καθορισμός του πάχους των layers. Την συνηθέστερη τεχνική για την απόκτηση των επιθυμητών παραμέτρων αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία κατά τη διάρκεια της οποίας οι παράμετροι διαμορφώνονται μεμονωμένα και η κάθε χάραξη που προκύπτει εξετάζεται για τον προσδιορισμό του ακριβούς βάθους και πλάτους του στρώματος. Κατά τη μοντελοποίηση της χάραξης, οι παράμετροι εισόδου που ορίζονται στο σύστημα χωρίζονται σε σταθερές και μεταβλητές. Ορισμένες από τις σταθερές είναι τα χαρακτηριστικά της δέσμης του laser και η πορεία της, το μήκος κύματος, το υλικό του δοκιμίου και οι διαστάσεις του κ.α. Το επιθυμητό αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι μια ποιοτική μοντελοποίηση της χάραξης με δημιουργία σαφών λεπτομερειών. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό COMSOL Multiphysics 5.0, το οποίο ενδείκνυται για την μοντελοποίηση προβλημάτων μετάδοσης θερμότητας.

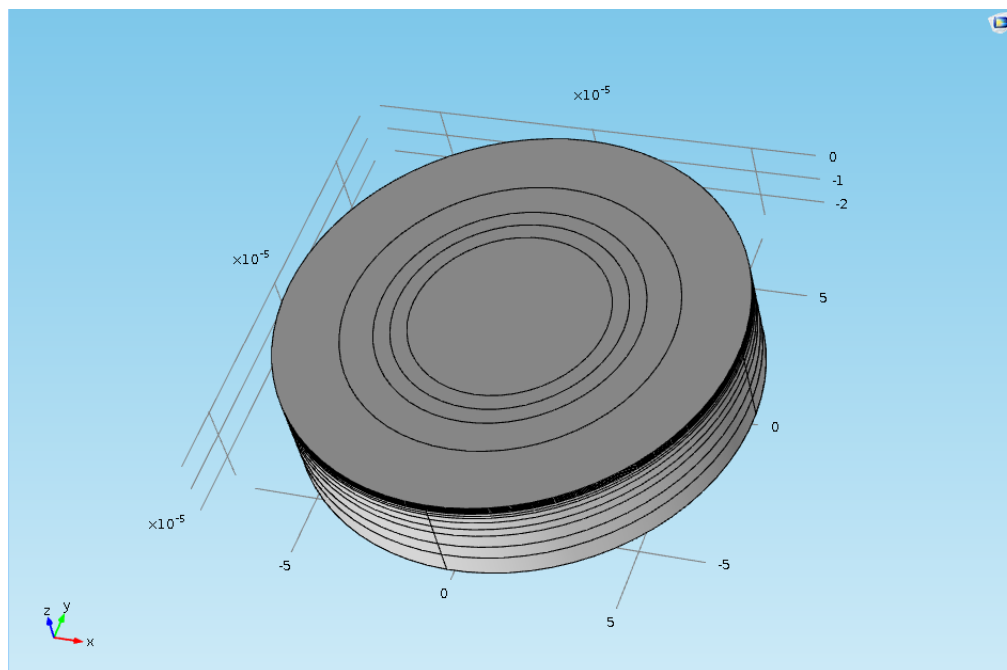
5.2.1 Δημιουργία μοντέλου

Πρώτο βήμα για την έναρξη της μοντελοποίησης αποτελεί η επιλογή των παραμέτρων του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί. Αρχικά, γίνεται ορισμός των διαστάσεων δημιουργώντας το τρισδιάστατο μοντέλο και στη συνέχεια καθορίζονται προσεκτικά οι οριακές συνθήκες, καθώς και οι τομείς της φυσικής στους οποίους υπεισέρχεται η επίλυση του προβλήματος. Στην προκειμένη περίπτωση το πρόβλημα υπεισέρχεται στον τομέα της μετάδοσης θερμότητας σε στερεά σώματα (Heat transfer in Solids) (Σχήμα 5.1). Με την επιλογή αυτή μοντελοποιείται η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής ή ακτινοβολίας και αναλύεται η εξίσωση της θερμότητας, η οποία αντιστοιχεί στη διαφορική μορφή του νόμου Fourier. Όσον αφορά τις μεθόδους που ακολουθούνται, η δέσμη του laser μοντελοποιείται κατά μέθοδο Lagrange, ενώ το κατεργαζόμενο δοκίμιο κατά ALE. Συνεπώς, ως φυσικό πεδίο εισάγεται και ο τομέας της κινούμενης διακριτοποίησης (Moving Mesh) για την εξομάλυνση του πλέγματος κατά τη διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος. Στη συνέχεια, ορίζεται ο τύπος της ανάλυσης ως δυναμική καθώς οι μεταβλητές του πεδίου μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 5. 1: Επιλογή πεδίου φυσικής του μοντέλου και ρύθμιση του τύπου επίλυσης

Από τη στιγμή που δημιουργείται το μοντέλο, ακολουθεί ο προσδιορισμός της γεωμετρίας του κατεργαζόμενου δοκιμίου. (Σχήμα 5.2). Το δοκίμιο είναι ένα δισκίο διαμέτρου 0,08 mm και πάχους 0,0295 mm, το οποίο θερμαίνεται για ένα δευτερόλεπτο με τη δέσμη laser ισχύος 20 Watt.



Σχήμα 5. 2: Δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου

Στο στάδιο αυτό εισάγονται στο λογισμικό οι παράμετροι των μεταβλητών που θα χρησιμοποιούνται καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Όνομα	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
R1	0,03	mm	Radius 1 (inner)
R2	0,035	mm	Radius 2
R3	0,04	mm	Radius 3
R4	0,05	mm	Radius 4
R5	0,07	mm	Radius 5 (outer)
Height1	0,0005	mm	Thickness of the first level layers
Height2	0,001	mm	Thickness of the second level layers
Height3	0,002	mm	Thickness of the third level layers
Height4	0,003	mm	Thickness of the fourth level layers
Height5	0,005	mm	Thickness of the fifth level layers
Height6	0,007	mm	Thickness of the sixth level layers
Emissivity	0,8		Surface emissivity (dimensionless)
Power	20	W	Laser Power
D_spot	0,01	mm	Laser Spot Diameter
Period	Pi/4	rad	Period
Wf_amp	0,01		Waveform amplitude
Ref_Index_n	1,0972		Refractive Index n (for webe)
Ref_Index_k	1,0972		Refractive Index k (for webe)
Pulse_width	100	ns	Pulse Duration
Pulse_freq	20	kHz	Pulse frequency
Ptot	1/Pulse_freq	s	Total Period
time_step	Pulse_width/10	s	Time step to store solution
End_time	Ptot*2	s	End time

Πίνακας 5. 1: Ρύθμιση των παραμέτρων του προβλήματος

5.2.2 Προσδιορισμός υλικού

Ακολουθεί ο προσδιορισμός του υλικού και των παραμέτρων του, από το οποίο θα είναι κατασκευασμένο κάθε κομμάτι του μοντέλου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ως υλικό του δοκιμίου έχει επιλέγει το αλουμίνιο, λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων του. Διαθέτει χαμηλή πυκνότητα, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, είναι μη τοξικό και παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Ουσιαστικά αυτό συμβαίνει καθώς με την έκθεση του μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζεται στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό αλλά μη – ορατό στρώμα οξειδίου του αργιλίου, το οποίο εμποδίζει τη διάβρωσή του σε βάθος. (φαινόμενο παθητικοποίησης). Αποτελεί το δεύτερο πιο ελατό μέταλλο καθώς και το έκτο πιο όλκιμο. Για το λόγο αυτό συναντάται με υψηλή συχνότητα σε μηχανουργικές κατεργασίες. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι το υλικό αυτό διαθέτει υψηλή αντοχή σε περιβάλλον φωτιάς, καθώς όταν η θερμοκρασία του μετάλλου ξεπεράσει το σημείο τήξης τότε αυτό αρχίζει να λιώνει και όχι να φλέγεται. Συνεπώς, αποτελεί ιδανική επιλογή για κατεργασίες που πραγματοποιούνται με τη χρήση δέσμης laser.

Στον Πίνακα 5.2 που ακολουθεί καταγράφονται οι σημαντικότερες ιδιότητες του αλουμινίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά τη μοντελοποίηση.

Ιδιότητα	Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Σχετική διαπερατότητα	μ_r	1	
Θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση	C_p	900	J/(kg*K)
Θερμική αγωγιμότητα	k	238	W/(m*K)
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	σ	3,774e7	S/m
Σχετική διαπερατότητα	ϵ	1	
Συντελεστής θερμικής διαστολής	α	23e-6	1/K
Πυκνότητα	ρ	2.700	kg/m ³
Μέτρο Young	E	70e9	N/m ²
Λόγος Poisson	ν	0,33	
Δείκτης διάθλασης	n	1	
Δείκτης διάθλασης φανταστικό μέρος	k	1	
Murnaghan: ελαστικότητα τρίτης τάξης	l	-2,5e11	N/m ²
Murnaghan: ελαστικότητα τρίτης τάξης	m	-3,3e11	N/m ²
Murnaghan: ελαστικότητα τρίτης τάξης	n	-3,5e11	N/m ²
Παράμετρος λ	λ	5,1e10	N/m ²
Παράμετρος μ	μ	2,6e10	N/m ²

Πίνακας 5. 2: Τιμές ιδιοτήτων αλουμινίου που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα

Όταν η δέσμη του laser χτυπά στο υλικό, εξαιτίας της υψηλής θερμικής αγωγιμότητάς του, μεγάλο τμήμα της ενέργειας απορροφάται από αυτό και το υπόλοιπο ανακλάται διάχυτα. Αυτό το απορροφώμενο ποσό ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα και λιώνει το υλικό. Εφόσον η ένταση της ισχύος του laser είναι αρκετά υψηλή, τότε το υλικό αυτό τοπικά εξαχνώνεται. Ιδίως όταν εξατμίζεται υπό κενό σχηματίζει μια εξαιρετικά ανακλαστική επίστρωση τόσο για το φως όσο και για τη θερμότητα. Όπως έχει μελετηθεί και σε προηγούμενη ενότητα, για τα μεταλλικά υλικά ισχύει ότι η ανακλαστικότητα = 1 - απορροφητικότητα. Το ποσοστό αυτό αλληλεπιδρά και με άλλους παράγοντες που θα αναφερθούν παρακάτω:

- Μήκος κύματος. Η συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών είναι αντιστρόφως ανάλογη καθώς όσο μικραίνει το μήκος κύματος τόσο υψηλότερη είναι η τιμή της απορροφητικότητας
- Θερμοκρασία. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο υψηλότερη είναι και η απορροφητικότητα του υλικού (να σημειωθεί ότι η απορροφητικότητα φτάνει στην υψηλότερη τιμή της κατά την διάρκεια της τήξης)
- Το πάχος της επιφανειακής οξειδωσης, που λειτουργεί ως αντανάκλαστική επίστρωση
- Γωνία πρόσπτωσης
- Τραχύτητα επιφάνειας υλικού. Όσο τραχύτερη είναι η επιφάνεια του υλικού τόσο περισσότερο αυξάνεται η διάχυτη ανάκλαση

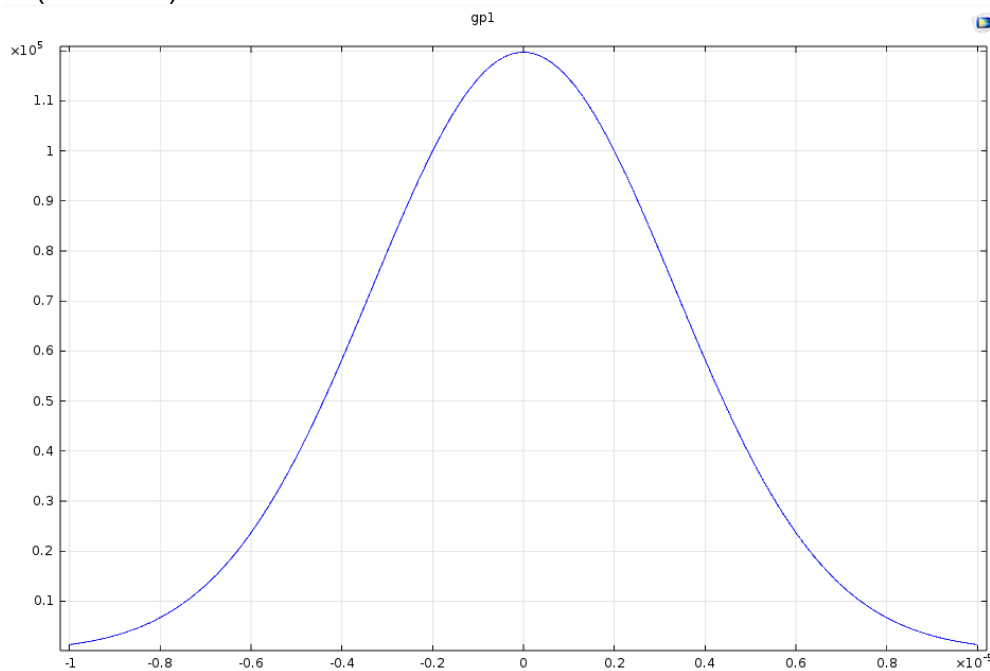
Δηλαδή, το απορροφώμενο ποσοστό ενέργειας διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την επεξεργασία του υλικού. Συνεπώς, η επιλογή του υλικού κατεργασίας αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την ομαλή προσομοίωση της χάραξης και για την επίτευξη ποιοτικού και ακριβούς αποτελέσματος.

5.2.3 Ορισμός πεδίου επίλυσης

Στην συνέχεια, γίνεται προσδιορισμός του περιβάλλοντος και ορίζονται τα φυσικά πεδία τα οποία περικλείει η μηχανουργική κατεργασία της χάραξης με δέσμη laser. Το πλήρες πρόβλημα περιλαμβάνει τέσσερα τμήματα:

- Την οπτική
- Την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (RF)
- Τη μεταφορά θερμότητας
- Την ηλεκτροθερμική αλληλεπίδραση

Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι, το πεδίο στο οποίο βασίζεται η δημιουργία της γεωμετρίας της χάραξης (του κρατήρα) αποτελεί κατά κύριο λόγο η μετάδοση της θερμότητας. Δηλαδή, η αρχή θερμικής αγωγιμότητας θεωρείται το κύριο πεδίο για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Η δέσμη του laser προσομοιώνεται ως μια πηγή θερμότητας με προφίλ ίδιο με το Γκαουσιανό (Gaussian).



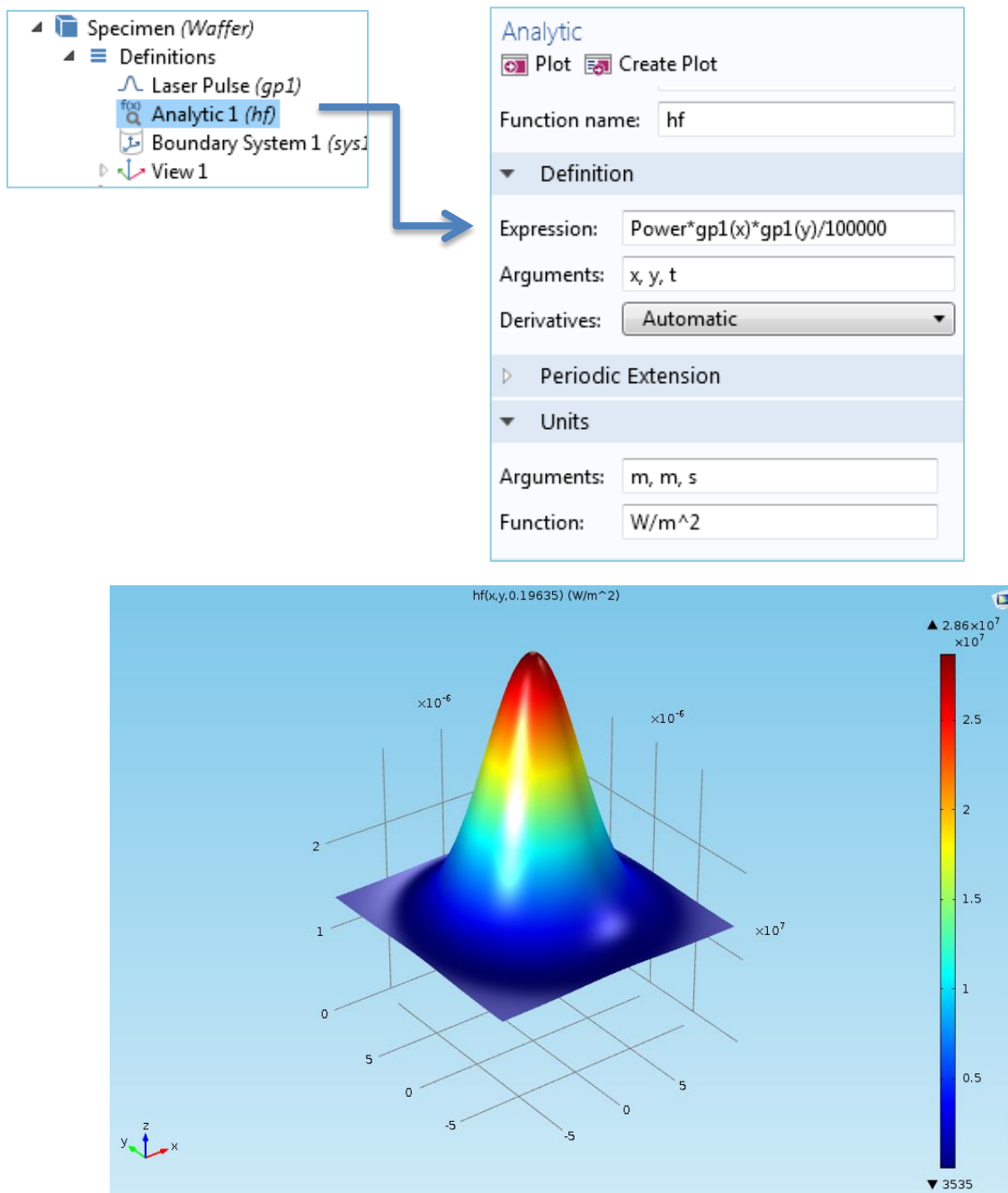
Σχήμα 5. 3: Καμπύλη της δέσμης του laser

Το σημείο της εστίασης του laser μετακινείται με τη χρήση μιας τριγωνικής κυματομορφής για τον καθορισμό της θέσης του κατά μήκος του άξονα x με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, η ταχύτητα της αγωγιμότητας εξαρτάται από τις παραμέτρους της πυκνότητας του υλικού, την ειδική θερμοχωρητικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα, τη διαφορά των θερμοκρασιών και τη μορφή του αγωγού. Η δέσμη μπορεί να οριστεί από την Εξίσωση 5.1 μηδενίζοντας το δεξί μέλος της εξίσωσης και θεωρώντας ως οριακή συνθήκη την κινούμενη ροή θερμότητας κατά μήκος της διαδρομής χάραξης.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = Q \quad [5.1]$$

όπου,

- Q: η θερμότητα
- t: ο χρόνος
- k: η θερμική αγωγιμότητα
- ρ: η πυκνότητα
- C_p: η ειδική θερμοχωρητικότητα
- A: η διατομή του υλικού
- x: η απόσταση μεταξύ των πηγών θερμότητας

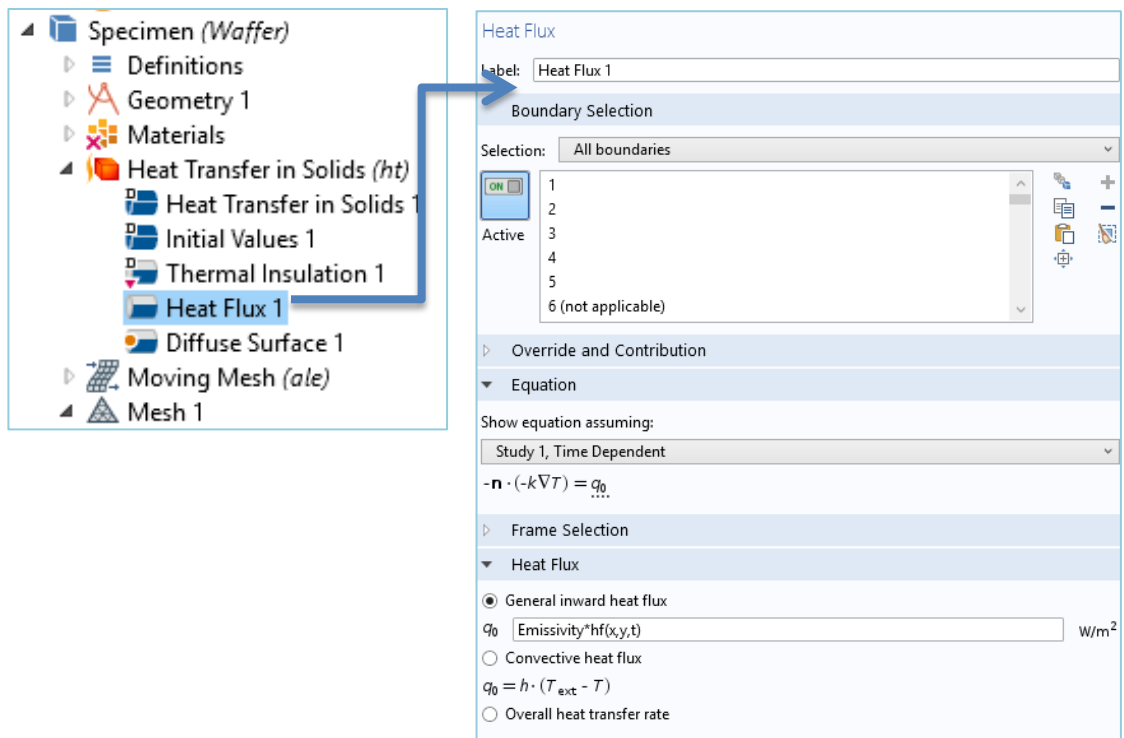


Σχήμα 5. 4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του προφίλ της δέσμης του laser

Συνεπώς, κατά τη μοντελοποίηση ορίζεται ως πεδίο φυσικής η μετάδοση θερμότητας σε στερεά σώματα “Heat Transfer in Solids”. Μέσω του πεδίου αυτού γίνεται ο καθορισμός της θερμικής πηγής και προσδιορίζεται η ισχύς της τροφοδοσίας. Ως προεπιλογή του πεδίου ρυθμίζονται η θερμομόνωση (Thermal Insulation) και η αρχική τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ίση με $T_a=293,15$ K (Initial Values). Ακόλουθα, ορίζεται η κατεύθυνση της ροής θερμότητας (Heat flux) από την επιφάνεια πρόσπτωσης της ακτινοβολίας προς το εσωτερικό του δοκιμίου μέσω της Εξίσωσης 5.2, καθώς και η επιφάνεια από την οποία πραγματοποιείται διάχυση της ακτινοβολίας (Diffuse Surface). Το συνολικό διάνυσμα της ροής θερμότητας ορίζεται από την Εξίσωση 5.3, όπου με U συμβολίζεται η εσωτερική ενέργεια.

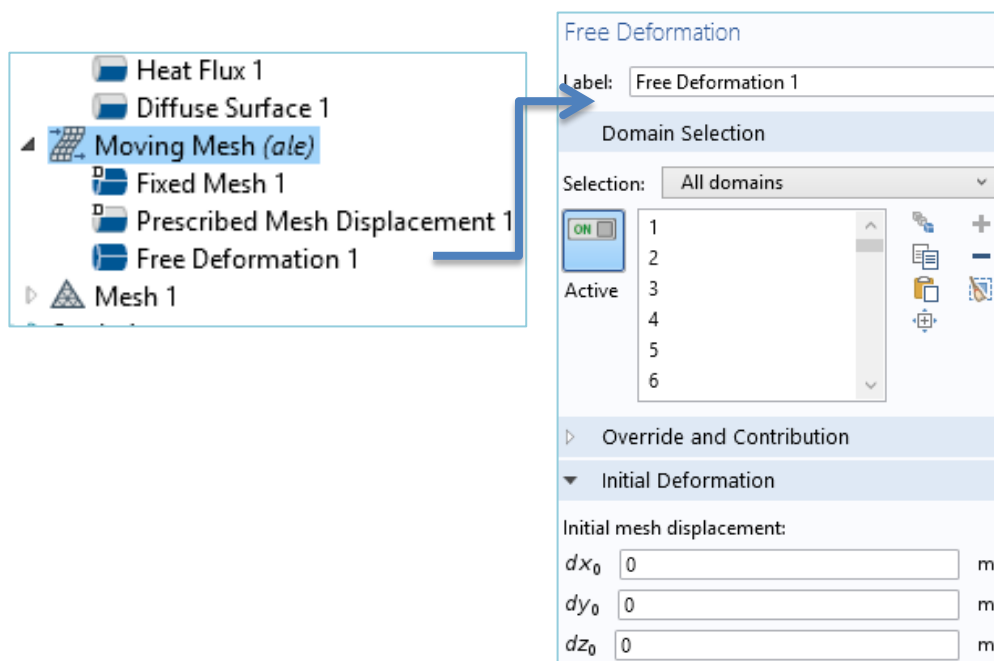
$$q_0 = emissivity * hf(x, y, t) \quad [5.2]$$

$$\rho u U - k \nabla T + q_r \quad [5.3]$$



Σχήμα 5. 5: Προσδιορισμός της ροής θερμότητας στο δοκίμιο

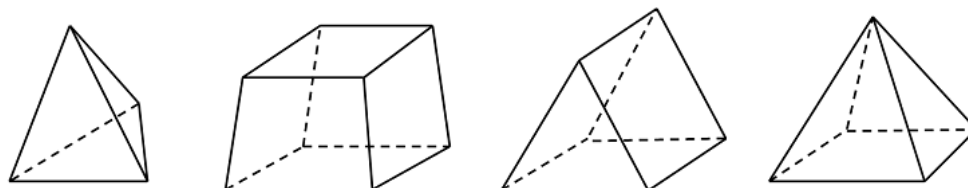
Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας χάραξης αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στην επιφάνεια του δοκιμίου, έχοντας ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση σε μεγάλο βαθμό του πλέγματος κατά την επίλυση του προβλήματος. Για το λόγο αυτό προστίθεται εκ των προτέρων στον τομέα της φυσικής το πεδίο του κινούμενου πλέγματος (Moving Mesh) για την αναπαράσταση των κινήσεων της ελεύθερης επιφάνειας. Ως εκ τούτου επιτυγχάνεται η μοντελοποίηση του κατεργαζόμενου δοκιμίου με την μέθοδο ALE, η οποία επιτρέπει στο πλέγμα να κινείται ανεξάρτητα από το υλικό που παραμορφώνεται, με σκοπό να βελτιστοποιεί το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων. Μέσω του πεδίου καθορίζεται η μετατόπιση του πλέγματος και η ελεύθερη παραμόρφωσή του.



Σχήμα 5. 6: Ρύθμιση παραμέτρων της μεθόδου ALE

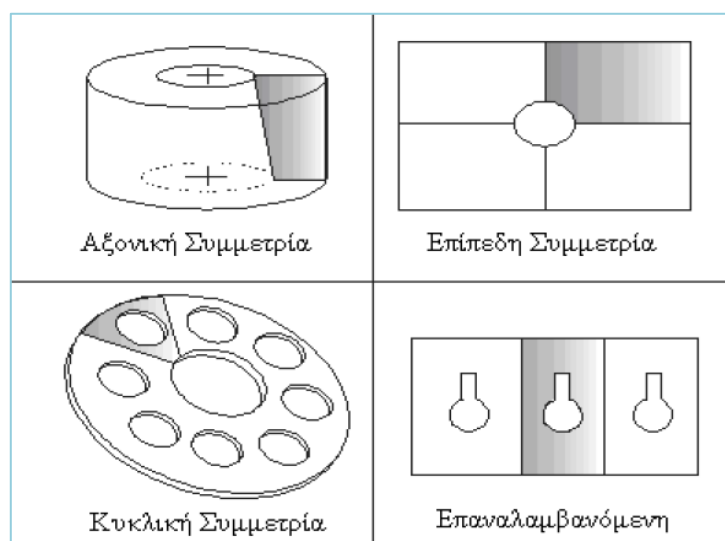
5.2.4 Δημιουργία πλέγματος

Το τελευταίο βήμα πριν την επίλυση του μοντέλου είναι η δημιουργία της διακριτοποίησης και η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους και της μορφής των πλεγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται το μέγεθος των στοιχείων (elements size), η βαθμονόμησή τους (calibration) και η πυκνότητα με την οποία εμφανίζονται καθώς και οι παράμετροι του μεγέθους των στοιχείων. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι ο διαμερισμός του μοντέλου σε μικρότερα στοιχεία, για την διευκόλυνση της επίλυσης. Η διαδικασία της διακριτοποίησης είναι απαραίτητη προκειμένου να καταστεί δυνατή η αριθμητική επίλυση του προβλήματος και επηρεάζει άμεσα και σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τα επιμέρους τμήματα (domains) του σώματος διακριτοποιούνται σε στοιχεία, τα οποία αποτελούνται από πλευρές, ακμές και κορυφές (κόμβους). Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται οι τέσσερις διαφορετικοί τύποι των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό τρισδιάστατων μοντέλων (tets, bricks, prisms, pyramids).



Σχήμα 5. 7: Οι τέσσερις τύποι τρισδιάστατων στοιχείων

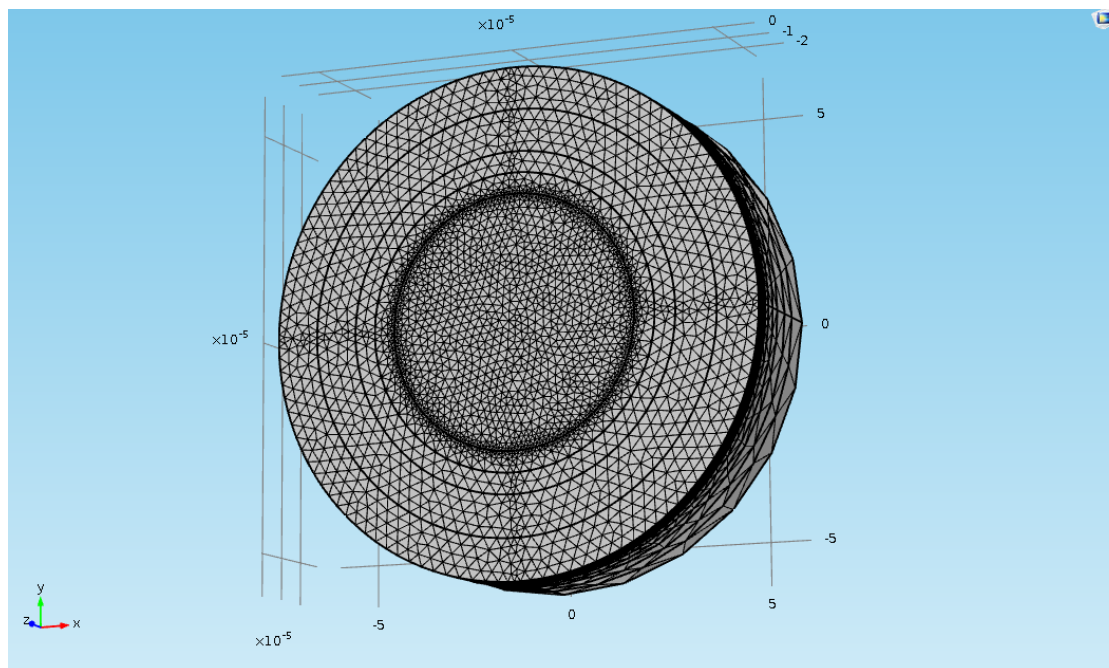
Πέραν της γεωμετρικής απλοποίησης των στοιχείων που απαρτίζουν το μοντέλο μπορεί να πραγματοποιηθεί και απλοποίηση μέσω της συμμετρίας του αντικειμένου. Τα κύρια είδη συμμετρίας που συναντώνται σε προβλήματα μηχανικής είναι η αξονική, η επίπεδη, η κυκλική και η επαναλαμβανόμενη. Στην περίπτωση που το μοντέλο εμφανίζει συμμετρία ως προς τη γεωμετρία του αλλά παράλληλα και ως προς τα φορτία που του ασκούνται, υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης μέρους μόνο του σώματος.



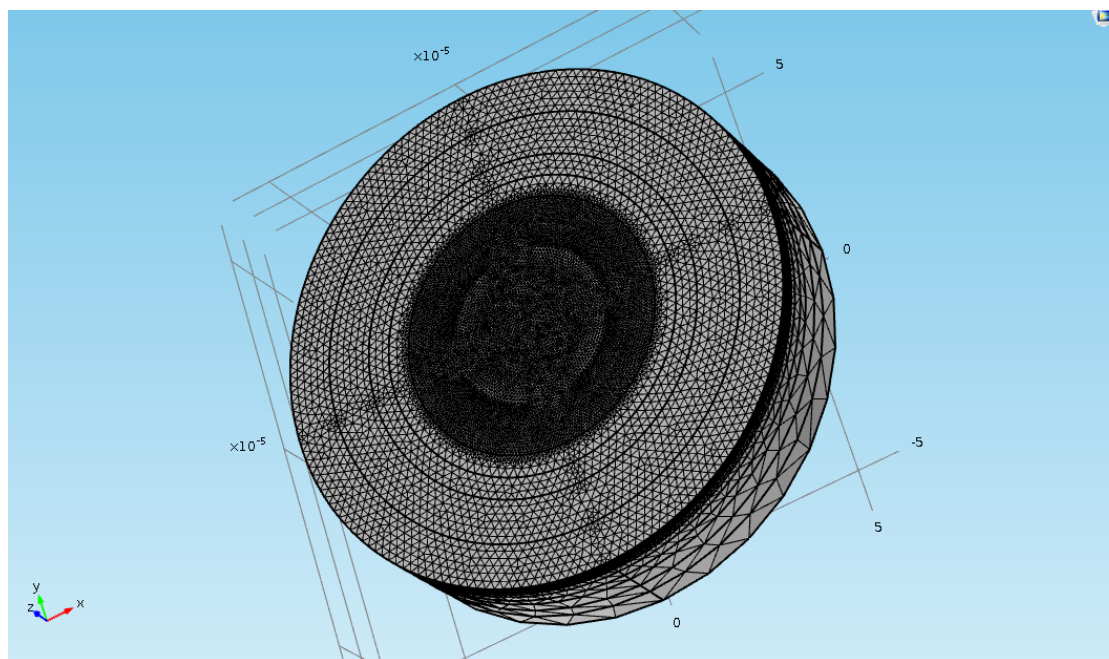
Σχήμα 5. 8: Είδη συμμετρίας (Fagan)

Στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά στοιχεία μέσω της εντολής “Free Tetrahedral”. Τα στοιχεία αυτά, γνωστά και ως simplex, έχουν την ιδιαιτερότητα ότι μπορούν να διακριτοποιήσουν οποιοδήποτε τρισδιάστατο όγκο, ανεξαρτήτως σχήματος ή τοπολογίας. Ουσιαστικά, εφαρμόζουν ένα τριγωνικό πλέγμα σε όλες τις επιφάνειες του όγκου του σώματος. Εν συνεχεία, ο όγκος υποδιαιρείται σε τετράεδρα έτσι ώστε να πληρούνται τα καθορισμένα κριτήρια μεγέθους των στοιχείων. Κατά τη μοντελοποίηση το δοκίμιο διακριτοποιήθηκε σε δύο διαφορετικά επίπεδα. Αρχικά, δημιουργείται πλέγμα με υψηλή πυκνότητα και μικρού μεγέθους στοιχεία στο σημείο όπου προσπίπτει η δέσμη του laser καθώς και στα domains του πρώτου επιπέδου των στρωμάτων. Ακόλουθα, δημιουργείται πλέγμα μεγαλύτερων στοιχείων (elements) για την υπόλοιπη γεωμετρία του δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται υψηλή ακρίβεια

αποτελεσμάτων για το τμήμα του δοκιμίου που υφίσταται την κατεργασία, μειώνοντας παράλληλα σημαντικά το χρόνο της προσομοίωσης καθώς και την απαίτηση για αυξημένη υπολογιστική ισχύ. Στα Σχήματα 5.9 και 5.10 απεικονίζονται οι περιπτώσεις με υψηλό και χαμηλό αριθμό πλεγμάτων στον όγκο του δοκιμίου.



Σχήμα 5. 9: Διακριτοποίηση με μικρό αριθμό πλεγμάτων

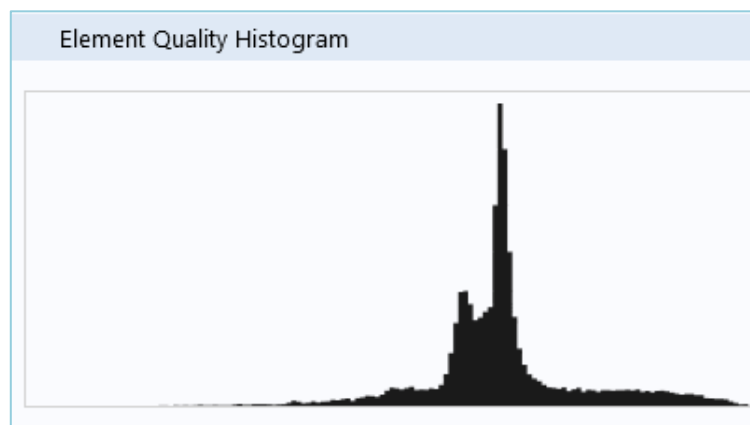


Σχήμα 5. 10: Διακριτοποίηση με μεγάλο αριθμό πλεγμάτων

Τα πλέγματα ορίζονται με μεταβλητά μεγέθη όπως παρουσιάζονται στα παραπάνω σχήματα. Τα μεγέθη του πλέγματος είναι πολύ μικρότερα γύρω από το σημείο όπου «χτυπά» η δέσμη του laser για μεγαλύτερη ακρίβεια. Στη δεύτερη περίπτωση, το λεπτότερο πλέγμα αυξάνει το συνολικό αριθμό των στοιχείων (elements) και συνεπώς αυξάνει και το χρόνο της προσομοίωσης με το λογισμικό. Το σημείο της χάραξης απαρτίζεται από 46.303 τετραεδρικά στοιχεία, τα χαρακτηριστικά των οποίων αναλύονται στον Πίνακα 5.3.

Statistics	Value
Minimum element quality	0,07789
Average element quality	0,6482
Element volume ratio	0,1036
Mesh volume	$1,414 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$
Maximum growth rate	3,304
Average growth rate	1,805

Πίνακας 5. 3: Χαρακτηριστικά των στοιχείων του κεντρικού domain

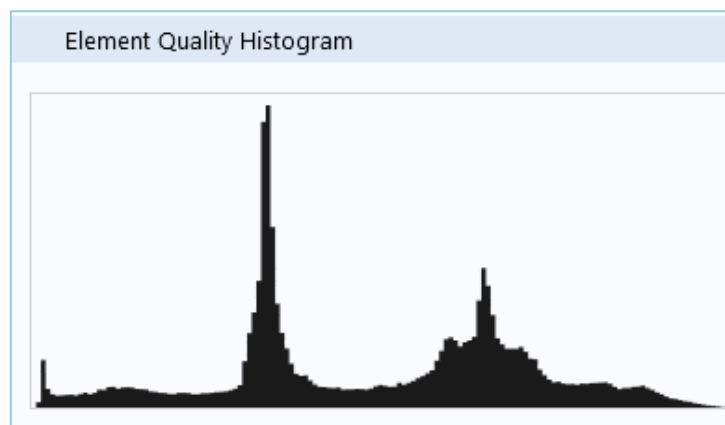


Σχήμα 5. 11: Ιστόγραμμα της ποιότητας των στοιχείων του κεντρικού domain

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται το σύνολο των στοιχείων που αποτελούν το πλέγμα της γεωμετρίας του δοκιμίου καθώς και τα διαφορετικά είδη από τα οποία απαρτίζεται.

Statistics	Value
Tetrahedral elements	243592
Pyramid elements	0
Prism elements	0
Hexahedral elements	0
Triangular elements	103656
Quadrilateral elements	0
Edge elements	7422
Vertex elements	280
Number of elements	243592
Minimum element quality	0,004111
Average element quality	0,4886
Element volume ratio	$2,298 \cdot 10^{-5}$
Mesh volume	$3,329 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$
Maximum growth rate	5,546
Average growth rate	2,182

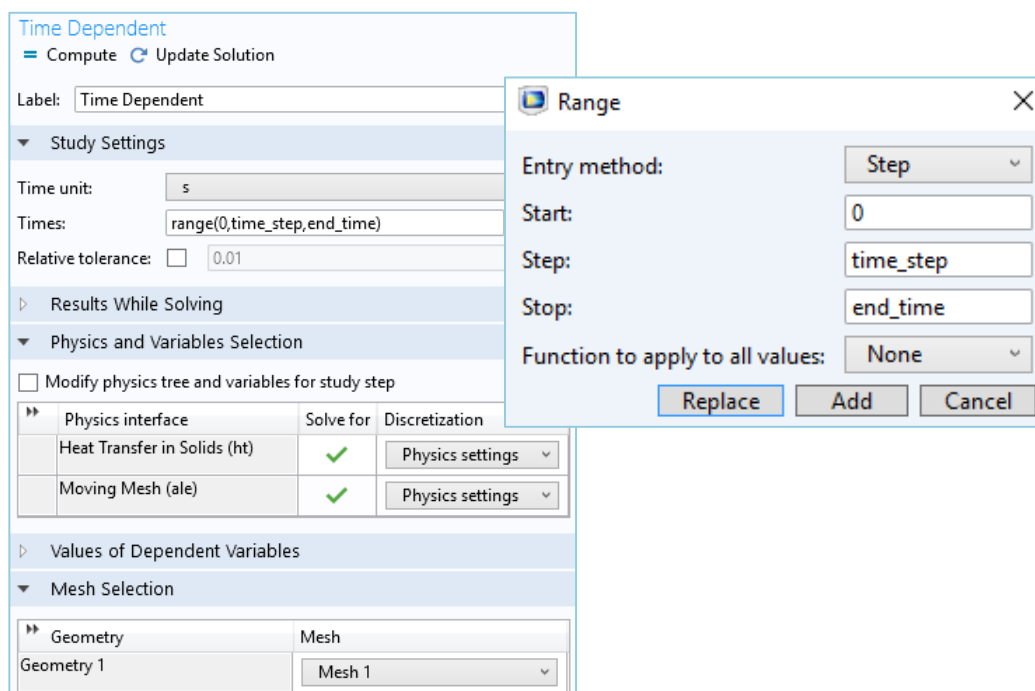
Πίνακας 5. 4: Τύπος και χαρακτηριστικά των στοιχείων όλης της γεωμετρίας



Σχήμα 5. 12: Ιστόγραμμα της ποιότητας των στοιχείων της γεωμετρίας του δοκιμίου

5.2.5 Επίλυση του μοντέλου

Εφ'όσον έχουν ολοκληρωθεί όλες οι απαραίτητες διαδικασίες και έχουν καθοριστεί οι παράμετροι του προβλήματος επιλέγεται το είδος της επίλυσης και καθορίζονται οι παράμετροι της (solver parameters). Η διαδικασία αυτή υλοποιείται μέσω των επιλυτών (pre – processors). Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα εισάγονται στον solver, ο οποίος χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος. Το λογισμικό του COMSOL διαθέτει πολλούς διαφορετικούς επιλυτές ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Δίνεται η δυνατότητα επίλυσης γραμμικών και μη προβλημάτων, σε μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση, καθώς επίσης και προβλήματα ιδιοτιμών. Στο στάδιο αυτό, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μητρώων και των διανυσμάτων κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Έπειτα, πραγματοποιείται η σύνδεση των επί μέρους πινάκων και των διανυσμάτων, με σκοπό τη δημιουργία των εξισώσεων που περιγράφουν την ανάλυση του μοντέλου, από τις οποίες εξαγεται το μητρώο δυσκαμψίας καθώς και το σύνολο των διανυσμάτων του μοντέλου. Στα διανύσματα εισάγονται οι οριακές συνθήκες που επιδρούν στο πρόβλημα και στο τέλος μέσω της επίλυσης πραγματοποιείται η εύρεση των αγνώστων μεταβλητών στους κόμβους του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η επίλυση πραγματοποιείται με δυναμική ανάλυση ως προς το χρόνο εφαρμόζοντας την ισχύ της δέσμης του laser σε μια σειρά διαφορετικών χρονικών στιγμών και καταγράφοντας τις μεταβολές που εμφανίζονται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου εξαρτάται από την πολυπλοκότητά του καθώς και από επιλογή των στοιχείων του πλέγματος.

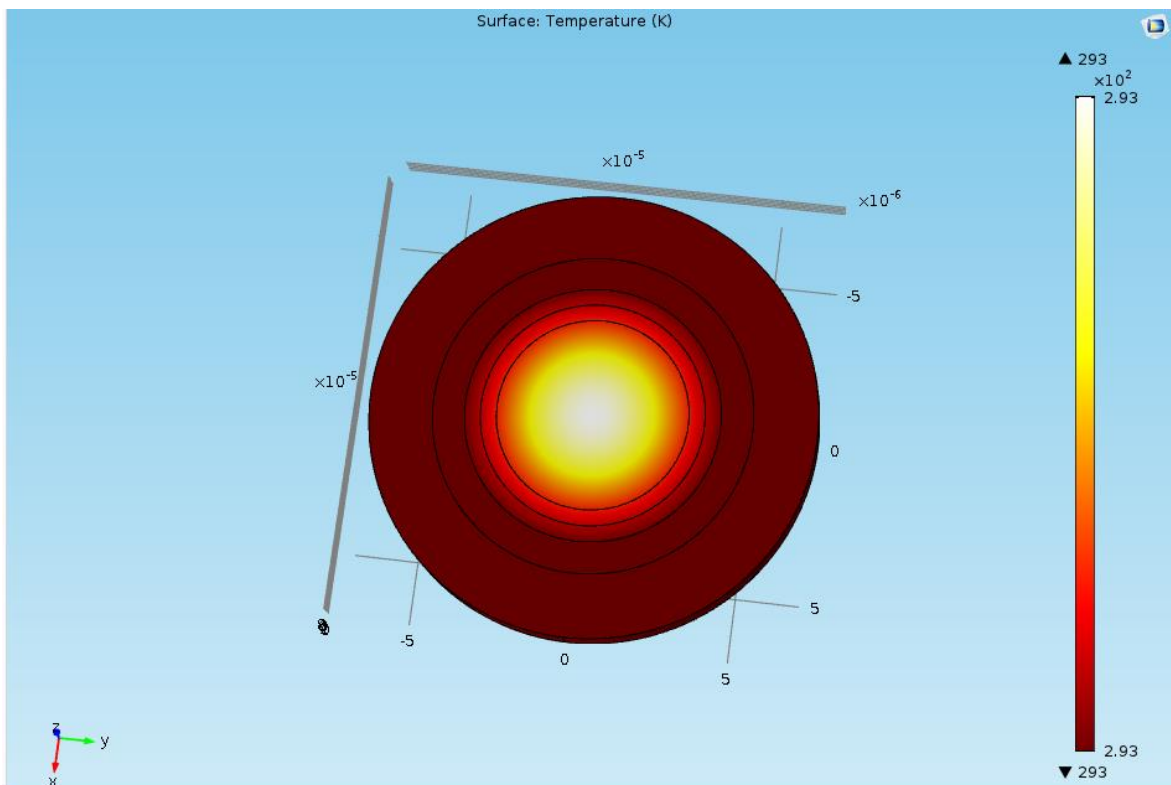


Σχήμα 5. 13: Ρύθμιση των παραμέτρων της επίλυσης

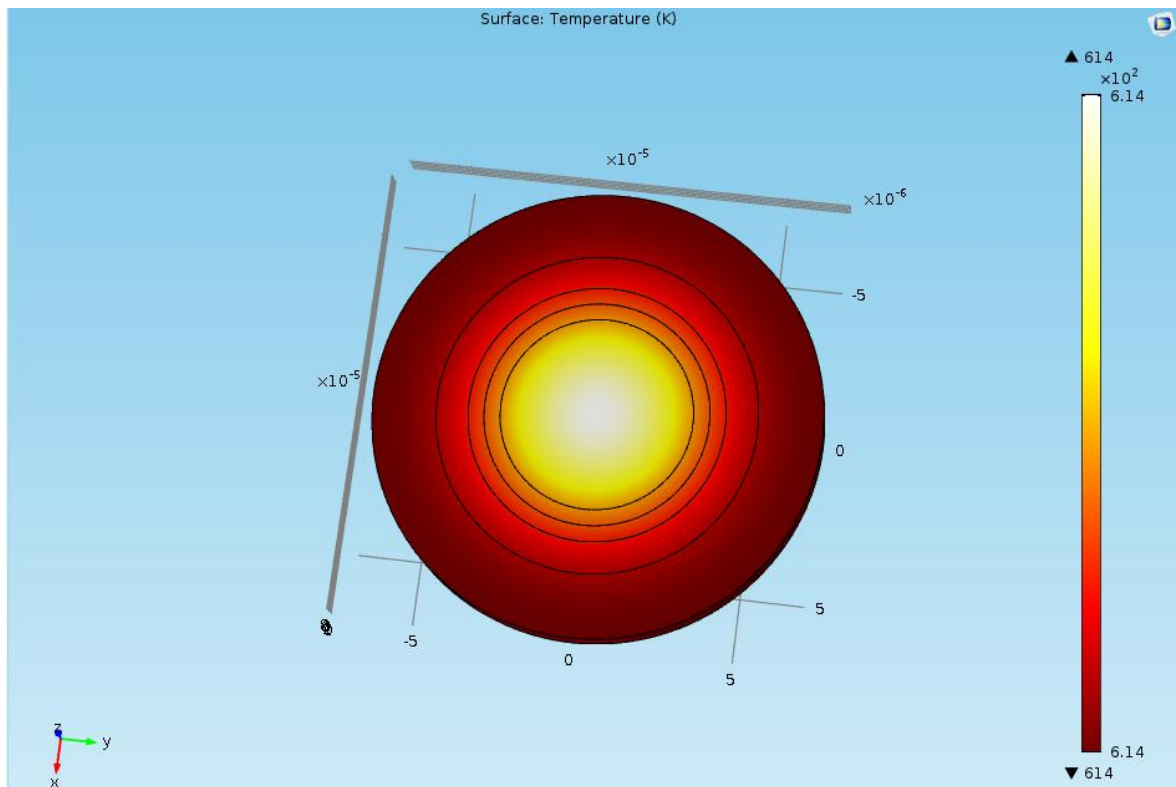
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά από την επίλυση του προβλήματος μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης, απομένει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του θερμικού μοντέλου. Στο Post Processing του κεντρικού μενού του λογισμικού και μέσω της επιλογής Plot Parameters παρέχεται πλήθος δυνατοτήτων ως προς την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Μερικές από τις επιλογές είναι η εξαγωγή τρισδιάστατων ή δισδιάστατων γραφικών παραστάσεων, η δημιουργία βίντεο και διαγραμμάτων σχετικών με τη διακύμανση των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε για δίσκιο αλουμινίου με παραμέτρους επεξεργασίας που εμφανίζονται στον Πίνακα 5.1. Στις διαγραμματικές απεικονίσεις το σύστημα συντεταγμένων x,y,z υπολογίζεται σε mm.

Σε πρώτο στάδιο, το μοντέλο εξετάστηκε για την περίπτωση όπου στο δοκίμιο προσπίπτει δέσμη laser ισχύος 20 Watt. Στα Σχήματα 6.1 και 6.2 που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του δοκιμίου κατεργασίας για δύο διαφορετικούς χρόνους, στην αρχή και στο τέλος της κατεργασίας. Η δέσμη του laser ενεργοποιείται και προσπίπτει στο αντικείμενο για χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου. Η κατανομή της θερμοκρασίας αποτυπώνεται πάνω στο δοκίμιο με χρονικό βήμα 0,1 sec. Όπως παρατηρείται, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου κατά την εκτέλεση της δέσμης του laser στο τέλος της κατεργασίας ισούται με 614 K.

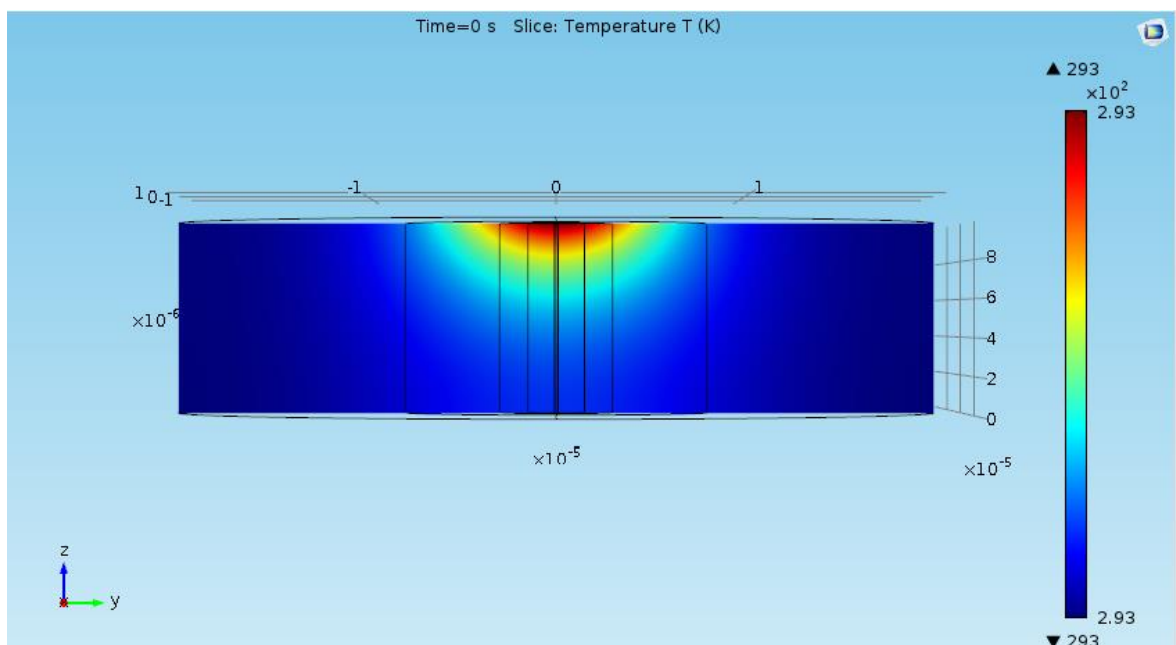


Σχήμα 6. 1: Αποτύπωση κατανομής της θερμοκρασίας για τη χρονική στιγμή 0,1 sec

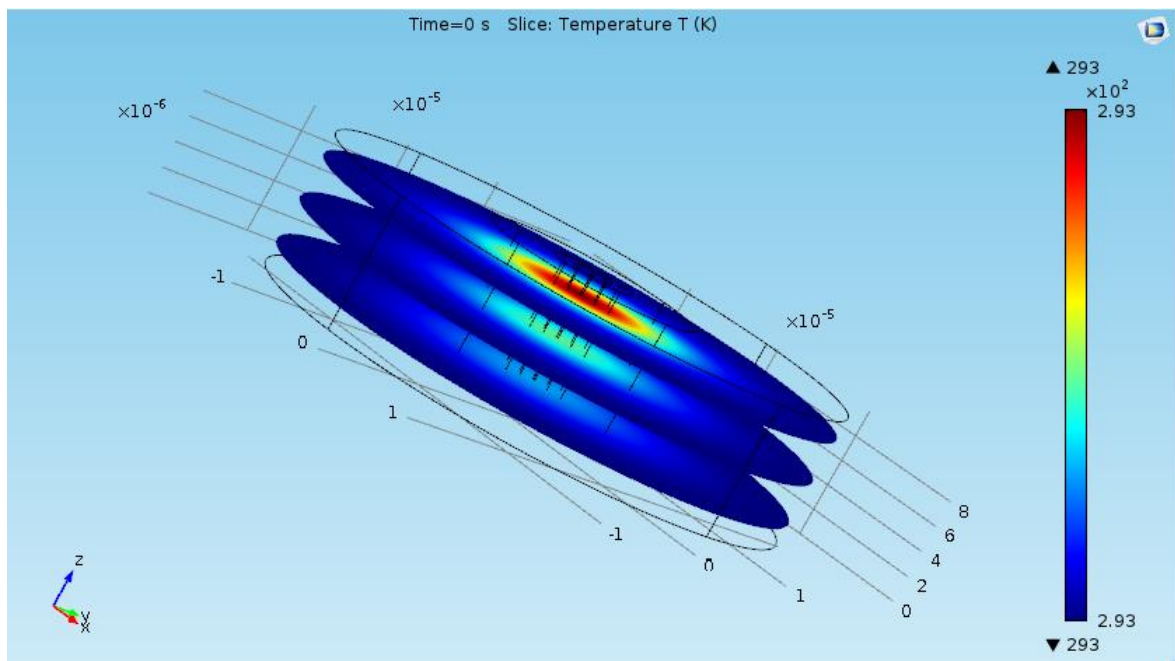


Σχήμα 6. 2: Αποτύπωση κατανομής της θερμοκρασίας μετά το πέρας της κατεργασίας ($t=1\text{sec}$)

Με το πέρας των δεκάτων του δευτερολέπτου, παρουσιάζεται μια θερμική μεταβολή κοντά στο σημείο όπου χτυπά η δέσμη του laser, ενώ η θερμοκρασία του δοκιμίου που βρίσκεται μακριά από την πηγή θερμότητας δεν μεταβάλλεται. Αντιστοίχως, παρουσιάζεται θερμική διαβάθμιση στο εσωτερικό του όγκου του σώματος. (Σχήματα 5.16, 5.17).

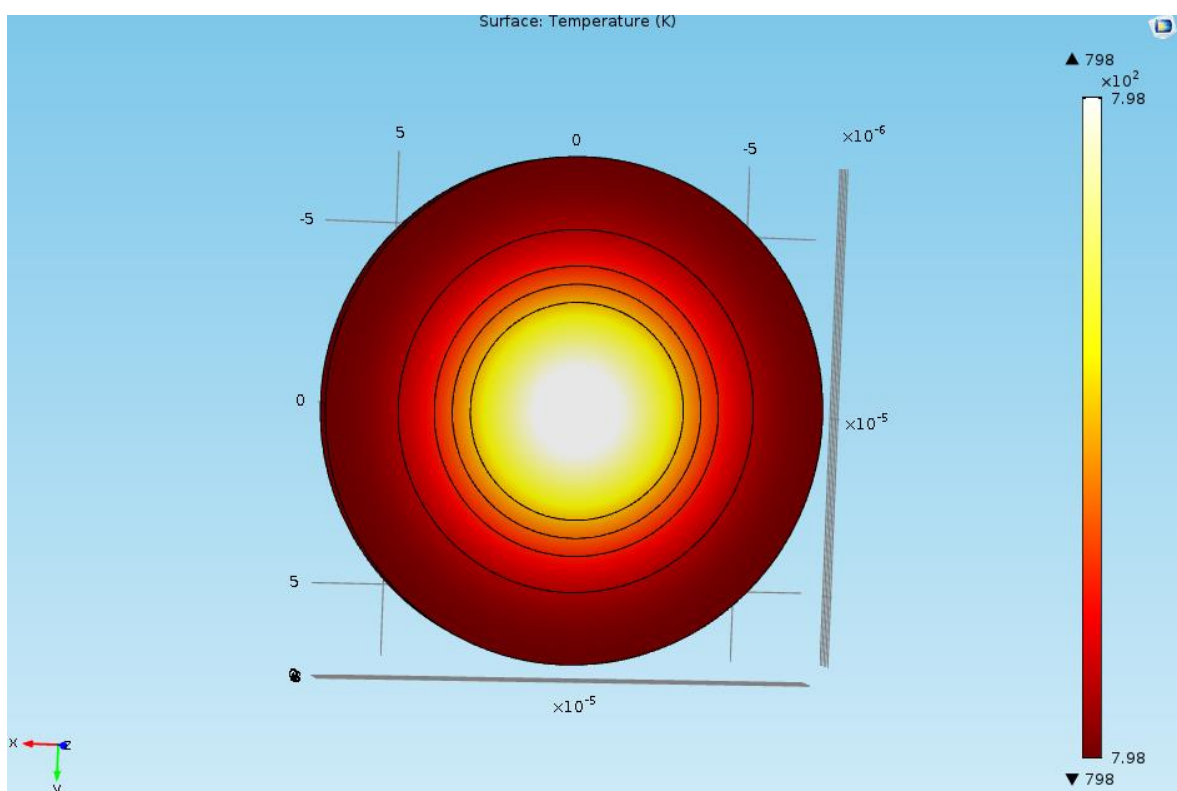


Σχήμα 6. 3: Αποτύπωση διαβάθμισης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου κατά τους άξονες yz



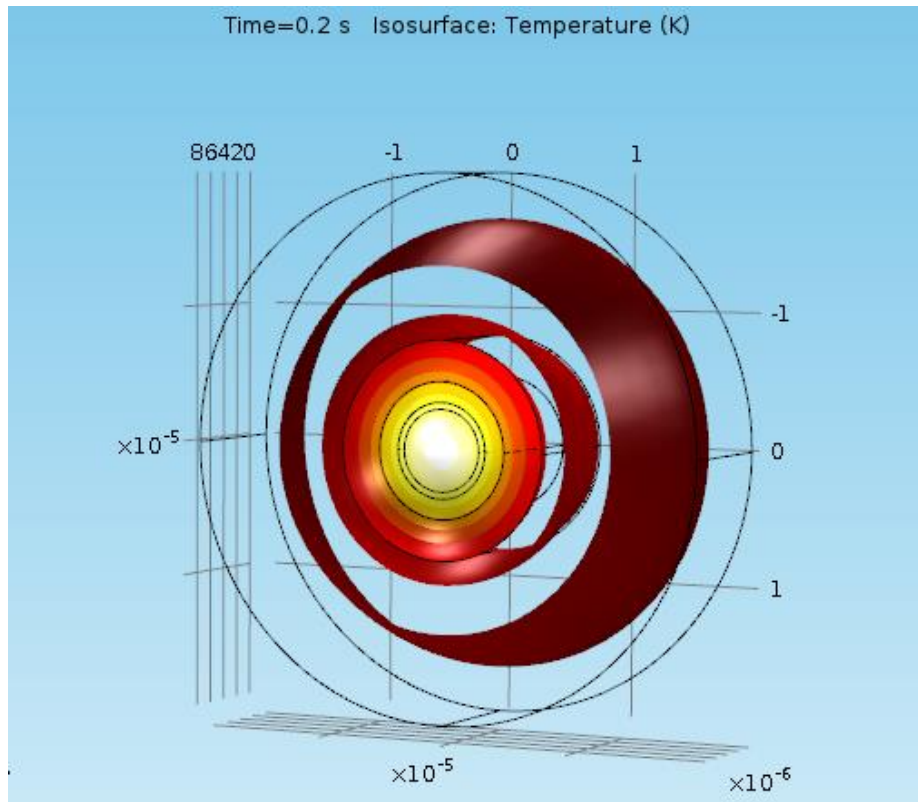
Σχήμα 6. 4: Αποτύπωση διαβάθμισης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου κατά τους άξονες xy

Σε δεύτερο στάδιο, πραγματοποιείται μελέτη της διακύμανσης της θερμοκρασίας για δοκίμιο το οποίο υποβάλλεται σε παλμό laser διπλάσιας ισχύος ($P=40 \text{ Watt}$). Η θερμοκρασία που επετεύχθει κατά την εκτέλεση της δέσμης φτάνει τους 798 K υπερβαίνοντας το σημείο εξαχνωσης του αλουμινίου.



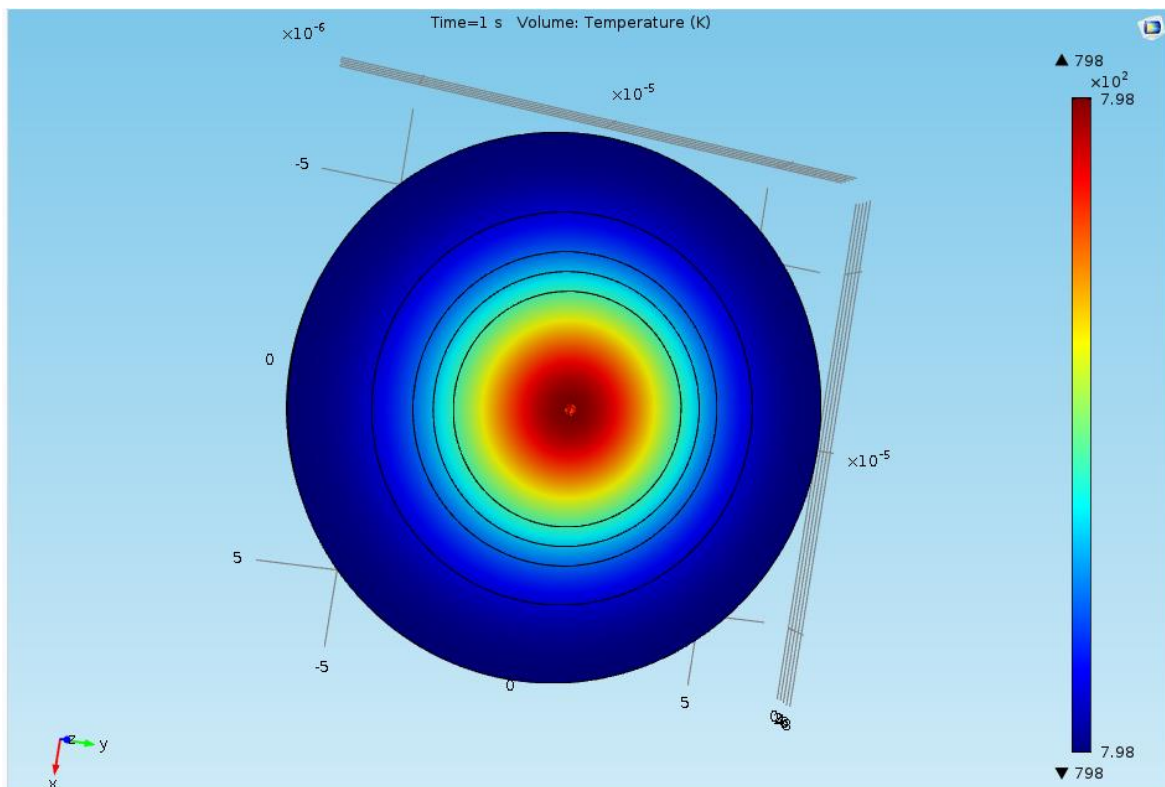
Σχήμα 6. 5: Αποτύπωση κατανομής της θερμοκρασίας για παλμό ισχύος 40 Watt

Στο Σχήμα 6.6 αναπαριστώνται οι ισοθερμικές γραμμές της θερμοκρασίας του σώματος. Μέσω των καμπυλών παρουσιάζεται η ροή της θερμότητας, η οποία πραγματοποιείται από το θερμότερο domain (εσωτερικό) προς το ψυχρότερο (εξωτερικό).



Σχήμα 6. 6: Ισοθερμικές καμπύλες της ροής θερμότητας

Με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.7, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση ορισμένων στοιχείων (elements) από το τμήμα του δοκιμίου στο οποίο προσπίπτει η δέσμη του laser.



Σχήμα 6. 7: Αφαίρεση στοιχείων από όγκο του δοκιμίου

7. ΣΥΝΟΨΗ

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες ανάγκες για την παραγωγή νέων και βελτιωμένων προϊόντων, επέφερε καινοτομίες και βελτιώσεις στη διαδικασία παραγωγής ενός προϊόντος. Μια από τις μεγαλύτερες καινοτομίες αποτέλεσε η χρήση του laser στις μεθόδους παραγωγής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κατεργασίες με laser σε μικροκλίμακα, οι οποίες αποτελούν πλέον μια ώριμη τεχνολογία που εφαρμόζεται σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες κατασκευής προϊόντων υψηλής τεχνολογίας, όπως είναι οι τηλεπικοινωνίες, η βιοτεχνολογία, τα ιατρικά εξαρτημάτα, ενώ συνεχώς βρίσκει εφαρμογή και σε νέους τομείς. Σημαντική περιοχή των κατεργασιών με Laser αποτελεί η διαδικασία χάραξης με τη χρήση laser (Laser Engraving), αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία.

Σκοπό της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου για την προσομοίωση της θερμικής μεταβολής κατά την κατεργασία της εγχάραξης με δέσμη laser, μιας πλάκας αλουμινίου. Η επίλυση της αριθμητικής μεθόδου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του υπολογιστικού λογισμικού COMSOL Multiphysics με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων. Μέσω του μοντέλου δόθηκε η δυνατότητα επιλογής των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας ανά κατεργαζόμενο υλικό. Πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των πεδίων θερμοκρασίας που αναπτύσσονται στον όγκο του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μέχρι την επιστροφή σε θερμική ισορροπία. Οι μεταβλητές παράμετροι της διεργασίας που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν την ισχύ του laser, το πλάτος της δέσμης και τη θερμοκρασία.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] COMSOL Manual: *"Laser Heating of a Silicon Wafer"*
- [2] Agalinos F., Patelis S., Kyratsis P., Maravelakis E., Vasarmidis E., Antoniadis A., 2011, *"Industrial Applications of Laser Engraving: Influence of the Process Parameters on Machined Surface Quality"*, World Academy of Science, Engineering and Technology 59 2011
- [3] Basu B., Srinivasan J., 1988, *"Numerical study of steady – state laser melting problem"*, Int. J. Heat Mass Transfer, Volume 31, No 11, pages 2331 – 2338, Great Britain
- [4] Belhadj A., Bessrouer J., Masse J.E., Bouhafs M., Barrallier L., 2010, *"Finite element simulation of magnesium alloys laser beam welding"*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 210, Issue 9, pages 1131 - 1137
- [5] Cadot G.B.J., Axinte D.A., Billingham J., 2013, *"Continuous trench, pulsed laser ablation for micro – machining applications"*, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Volume 107, pages 8 - 20
- [6] Datta A., 2002, *"Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer"*, Cornell University, Ithaca, New York
- [7] Diaci J., Bracun D., Gorkic A., Mozina J., 2010, *"Rapid and flexible marking and engraving of titled and curved surfaces"*, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Askerceva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia
- [8] Dillmann M., Braun B., Kottcke M., *"Investigation of Ablation of a Copper Surface Caused by 220 Nanosecond Laser Pulse"*, Proceeding of the 2016 COMSOL Conference in Munich, Technische Hochschule Georg – Simon – Ohm, Nuernberg. Germany
- [9] Genna S., Leone C., Lopresto V., Santo L., Trovalusci F., 2010, *"Study of Fibre Laser Machining of C45 Steel: Influences of Process Parameters on Material Removal Rate and Roughness"*, Int. J. Mater Form, Volume 3, pages 1115 – 1118
- [10] Kamath C., 2016, *"Data mining and statistical inference in selective laser melting"*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pages 1 - 19
- [11] Karbasi H., 2010, *"COMSOL Assisted Simulation of Laser Engraving"*, Proceeding of the Comsol Conference, Conestoga College Institute of Technology and Advanced Learning School of Engineering and Information Technology 299 Doon Valley Dr., Kitchener, Ontario, N2G 4M4, Canada
- [12] Kasman S., 2013, *"Impact of parameters on the process response: A Taguchi orthogonal analysis for laser engraving"*, Measurement Volume 46, Issue 8, Pages 2577-2584
- [13] Kim M.J., Chen Z.H., Majumdar P., 1993, *"Finite element modeling of the laser cutting process"*, J. Comput. Struct., Volume 49, pages 231 – 241
- [14] Kluess D., Steinhäuser E., Joseph M., Koch U., Ellenrieder M., Mittelmeier W., Bader R., 2015, *"Laser engravings as reason for mechanical failure of titanium – alloyed total hip stems"*, J. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, Volume 135, Issue 7, pages 1027-1031
- [15] Leone C., Genna S., Caprino G., De Iorio I., 2010, *"AISI 304 stainless steel marking by a Q switched diode pumped Nd: YAG Laser"*, Journal of Materials Processing Technology 210 pages 1297 – 1303
- [16] Leung K.W.K., Keshtgar A., Iyyer N., 2016, *"Heat Transfer Simulation for Reliability Estimation of Additive Manufacturing Process using the COMSOL Multiphysics Software"*, Proceeding of the 2016 Comsol Conference in Boston, Technical Data Analysis, Inc., Falls Church, VA, USA
- [17] Lin C-J., Wang Y-C., Lin L-D., Chiou C-R., Wang Y-N., Tsai M-J, 2008, *"Effects of feed ratio and Laser power on engraved depth and color differences of Moso bamboo lamina"*, Journal of Materials Processing Technology Volume 198, pages 419 - 425
- [18] Manninen M., Hirvimäki M., Poutiainen I., 2015, *"Effect of Pulse Length on Engraving Efficiency in Nanosecond Pulsed Laser Engraving of Stainless Steel"*, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 46B, pages 2129-2136
- [19] Martinov M., Obuhov A., Martinova L., Grigoriev A., (2015), *"An approach to building a specialized CNC system for laser engraving machining"*, 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems – CIRP CMS 2015
- [20] Miloni P.W., Eberly J.H., 2010, *"Laser Physics"*, John Wiley

- [21] Mohanty S., Hattel J.H., 2014, "*Numerical model based reliability estimation of selective laser melting process*", J. Physics Procedia, Volume 56, pages 379 - 389
- [22] Qi J., Wang K.L., Zhu Y.N., 2003, "*A study on the Laser marking process of stainless steel*", Journal of Materials Technology 139, pages 273-276
- [23] Radice J.J., Joyce P.J., Tresansky A.C., Wathin R.J., 2012, "*A COMSOL Model of Damage Evolution Due to High Energy Laser Irradiation of Partially Absorptive Materials*", Proceeding of the 2012 Comsol Conference in Boston, Mechanical Engineering Department, United States Naval Academy.
- [24] Tomashchuk I., Bendaoud I., Sallamand P., (2016), "*Multiphysical modelling of keyhole formation during dissimilar laser welding*", Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Munich
- [25] Turns S, 2006, "*Thermodynamics: Concepts and Applications, Volume 1*", Cambridge University Press
- [26] Zhang J., Kim M.J., 2001, "*Finite element analysis of evaporative cutting with a moving high energy pulsed laser*", Applied Mathematical Modelling, Volume 25, Issue 3, Pages 203-220
- [27] Γκότσης Π., 2004, «Πεπερασμένα Στοιχεία», Εκδόσεις Ζήτη
- [28] Κουμούσης Β., 1998, «Σημειώσεις μαθήματος: Ανάλυση Φορέων με Πεπερασμένα Στοιχεία», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
- [29] Μπενής Μ., 2013, «Σημειώσεις μαθήματος: Φυσική των Laser», Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Φυσικής
- [30] Σιμσερίδης Κ., 2015, «Κβαντική Οπτική και Lasers», Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής

9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ως σύνοψη των διαφόρων ειδών laser που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 2, στον πίνακα 1 πραγματοποιείται συγκεντρωτική καταγραφή των δεδομένων λειτουργίας τους.

Τύπος Laser	Τρόπος Λειτουργίας	λ (nm)	Μέση Ισχύς (W)	Ισχύς Κορυφής (kW)	Διάρκεια Παλμού	Αποδοτικότητα Κλίσης (%)
Ρουβίδιο	P	694,3	1	10^{-10^4}	1 ms-10ns	<0,1
Nd:YAG	CW	1.064	150			1-3
Nd:YAG	P	1.064	400	10	1-5 ms	1-3
Nd:YAG	P	1.064	4	2×10^4	10-20 ns	1-3
He-Ne	CW	632,8	$10^{-3}10^{-2}$			
Cu	P	510,5	40	100	20-40 ns	1
Ar ⁺	CW	514,5	10-150			<0,1
He-Cd	CW	325	0,1			
CO ₂	CW	10,6 μ m	(1-15) $\times 10^3$			10-20
CO ₂	P	10,6 μ m	10^3	10^4	0,1-0,5 μ S	10
N ₂	P	337,1	0,1	10^5	10 ns	<0,1
KrF	P	248	100	5×10^3	10 ns	1
Ροδαμίνη 6G	P	590	100	100	10 μ s	0,5
HF	CW	2,6-3,3 μ m	10^4			
HF	P	2,6-3,3 μ m		10^3		
GaAs	CW	840	10^{-2}			10

Πίνακας 1: Δεδομένα λειτουργίας ορισμένων laser