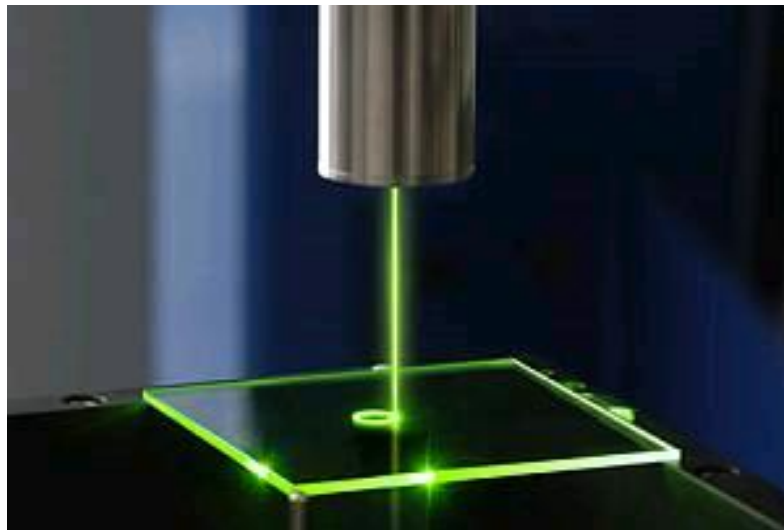


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ LASER**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΑΝΕΛΛΑΚΗΣ ΠΕΡΙΚΛΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΡΚΑΣ ΣΩΤΗΡΗΣ  
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2010**

Αφιερώνεται στους γονείς μου, Ευάγγελο και  
Αγγελική.

«Το μυαλό ενός άνδρα πρέπει να είναι γένος θηλυκού...

Να γεννά ιδέες!!»

Κανελλάκης Ευα. Περικλής

Μάιος 2010

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Α.Τ.Ε.Ι Πάτρας και αναφέρεται στο laser και στην τεχνική της διεργασίας διάτρησης με δέσμη laser. Τα laser είναι μία νέα τεχνολογία, που η χρήση τους παγιώθηκε τα τελευταία χρόνια. Βρήκαν και βρίσκουν κάθε μέρα και νέες εφαρμογές: στην κατεργασία των υλικών, στη μικροηλεκτρονική, στη μέτρηση της ταχύτητας ρευστών, στη διάγνωση ατμοσφαιρικών ρύπων, σε όλους σχεδόν τους κλάδους της ιατρικής και σε πλήθος άλλων τομέων της βιομηχανικής και κοινωνικής μας ζωής.

Στα πρώτα κεφάλαια γίνεται μια εισαγωγή στο τι είναι δέσμη laser και πώς δημιουργείται και αναλύεται η διεργασία της διάτρησης με δέσμες. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται οι παράμετροι που καθορίζουν αυτή τη διεργασία και διάφορα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς και στο τέλος παρουσιάζονται οι κίνδυνοι από την έκθεση στη δέσμη laser και προτείνονται μέτρα ασφαλείας κατά τη λειτουργία των συστημάτων laser. Απώτερος σκοπός των παραπάνω ήταν η καθοδήγηση του αναγνώστη για την αποτελεσματικότερη και ασφαλέστερη λειτουργία του σύγχρονου αυτού εργαλείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σωτήρη Τσίρκα, για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Σπύρο Γαλάνη για τη γενική ιδέα της εργασίας και τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στη φίλη μου Κατερίνα για την πολύτιμη βοήθειά της για τη σύνταξη της παρούσας πτυχιακής.

Κανελλάκης Ευα. Περικλής  
Μάιος 2010

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι διεργασίες αφαίρεσης υλικού με laser (laser machining) αποτελούν μία από τις πιο σημαντικές κατηγορίες εφαρμογών των lasers στη βιομηχανική παραγωγή. Στο σύνολό τους αποτελούν μη συμβατικές θερμικές διεργασίες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την απουσία πολλών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι συμβατικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού.

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη laser (laser drilling). Η διεργασία διάτρησης με δέσμη laser περιλαμβάνει τη χρήση μιας εστιασμένης δέσμης laser υψηλής ενεργειακής πυκνότητας για τη διάτρηση του υλικού μέσω της τήξης ή ακόμα και εξάτμισής του.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην τεχνολογία laser: πώς δημιουργείται, ποια είναι τα χαρακτηριστικά και ποιες ιδιότητες έχει το laser που το κάνουν τόσο χρήσιμο σύγχρονο εργαλείο. Αναφέρονται, επίσης, διάφοροι τύποι lasers. Περιγράφονται περιληπτικά οι διεργασίες αφαίρεσης υλικού με laser (laser machining) σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στη διεργασία διάνοιξης οπών με τη χρήση δέσμης laser (laser drilling). Γίνεται μια διερεύνηση της διεργασίας, αναπτύσσονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της διεργασίας και τα προβλήματα που παρουσιάζει η δέσμη laser στο υλικό.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι παράμετροι που επηρεάζουν αυτή τη διεργασία. Τις παραμέτρους της διεργασίας αυτής αποτελούν η ισχύς της δέσμης, η διάμετρος της δέσμης, καθώς και η εστίαση της δέσμης. Επίσης, οι ιδιότητες που έχει το υπό επεξεργασία υλικό παίζουν σημαντικό ρόλο στη διεργασία αυτή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναφέρονται μελέτες και μέθοδοι μοντελοποίησης και πειραματισμοί που έχουν γίνει και αναφέρονται σε αυτή την τεχνική. Επίσης, παρουσιάζεται μια σύγχρονη μηχανή κατεργασίας με δέσμη laser.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στους κινδύνους που παρουσιάζονται, αν δεν είναι ασφαλής η χρήση των laser, καθώς και στα μέτρα πρόληψης και ασφάλειας, που προτείνονται σε αυτή την εργασία.

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία παραθέτει μια ανασκόπηση της διεργασίας διάτρησης με τη χρήση δέσμης laser, βασιζόμενη στις πιο πρόσφατες ερευνητικές τάσεις και εξελίξεις.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LASER</b>	Σελίδα
1.1	Γενικά για τα laser.....	2
1.1.1	Ιστορική αναδρομή .....	3
1.1.2	Μηχανισμός δημιουργίας των LASER.....	5
1.1.3	Χαρακτηριστικά των Laser.....	7
1.1.4	Ιδιότητες των Laser.....	11
1.1.5	Βασικοί τύποι Laser.....	12
1.2	Μηχανουργικές διεργασίες με LASER.....	17
1.2.1	Κοπή με LASER (Laser Cutting).....	17
1.2.2	Χάραξη με LASER (Laser Grooving).....	18
1.2.3	Συγκόλληση με LASER (Welding).....	19
1.2.4	Διάνοιξη οπών με LASER (Laser Drilling).....	19
<b>2</b>	<b>ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΟΠΩΝ ΜΕ LASER (LASER DRILLING)</b>	
2.1	Εισαγωγή .....	20
2.2	Διεργασίες με δέσμη Laser.....	20
2.3	Σύντομη περιγραφή της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser.....	22
2.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser.....	24
2.5	Γενική διατύπωση του προβλήματος .....	25
<b>3</b>	<b>ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ</b>	
3.1	Ισχύς της δέσμης .....	28
3.2	Διάμετρος της δέσμης .....	29
3.3	Ιδιότητες υλικού .....	34
3.4	Εστίαση της δέσμης .....	36
3.5	Κωνικότητα της δέσμης .....	37
3.6	Ποιότητα κοπής .....	39
3.7	Ζώνη θερμικής επιρροής .....	42
3.8	Επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στη τελική επιφάνεια του τεμαχίου .....	44
3.9	Διάρκεια παλμού της δέσμης laser .....	46
..		
<b>4</b>	<b>ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΥ</b>	
4.1	Εισαγωγή.....	48
4.2	Μελέτες και πειράματα σχετικά με την διάτρηση με laser.....	48
4.3	Τυπική μηχανή κατεργασίας με δέσμη laser.....	49

## **5 ΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ LASER.**

5.1	Κίνδυνοι κατά τη χρήση των συστημάτων laser.....	53
5.1.1	Βιολογική επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς .....	53
5.1.2	Κίνδυνοι από την ανακλώμενη και διάχυτη ακτινοβολία .....	53
5.2	Συστήματα ασφάλειας και πρόληψης .....	54
5.2.1	Εισαγωγή .....	54
5.2.2	Τεχνητά συστήματα .....	54
5.2.3	Κατάλληλος εξοπλισμός .....	54

## **6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

6.1	Συμπεράσματα .....	56
-----	--------------------	----

## **7 ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ**

7.1	Προοπτική .....	58
7.2	Θέματα για μελλοντική διερεύνηση .....	58

## **8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

8.1	Παράρτημα Α: Ονοματολογία .....	59
8.2	Παράρτημα Β: Κατάλογος σχημάτων .....	60
8.3	Παράρτημα Γ: Κατάλογος πινάκων .....	61
8.4	Βιβλιογραφία .....	62

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε βιομηχανία έχει ως στόχο να παράγει προϊόντα που να ικανοποιούν τις ανθρώπινες ανάγκες με το μικρότερο δυνατό κόστος και την καλύτερη ποιότητα. Για τον παραπάνω λόγο τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται μια σημαντική και συνεχής προσπάθεια προκειμένου να αναπτυχθούν περαιτέρω οι διεργασίες με laser στην βιομηχανία και να αυξηθούν οι βιομηχανικές εφαρμογές τους με αποτέλεσμα την καλύτερη ποιότητα των προϊόντων, σε μικρότερο χρόνο και μικρότερο κόστος.

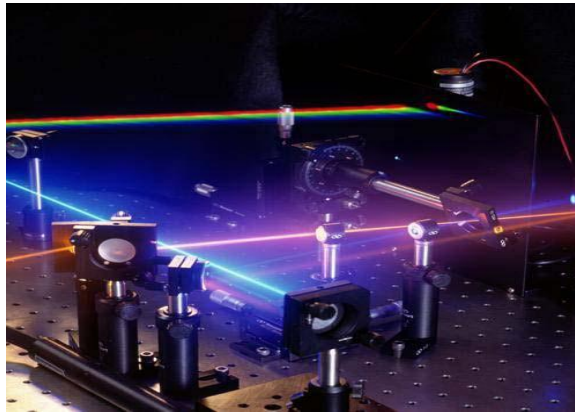
Το laser είναι μια νέα τεχνολογία που ανακαλύφθηκε πριν περίπου μισό αιώνα και η χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές παγιώθηκε τα τελευταία χρόνια. Παρουσιάζει πάρα πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας των υλικών και όπως φαίνεται από τις βιομηχανικές τάσεις και εξελίξεις σε μερικά χρόνια θα είναι το απόλυτο εργαλείο στην βιομηχανία αλλά και σε άλλους τομείς.

Η μελέτη της παρούσας πτυχιακής εργασίας, όσον αφορά κυρίως την φυσική και την τεχνολογία του laser, απαιτεί βασικές γνώσεις Ατομικής Φυσικής και Κβαντικής Μηχανικής. Στα κεφάλαια που αναφέρονται στις εφαρμογές της δέσμης και στους παράγοντες που την επηρεάζουν είναι απαραίτητες γνώσεις Τεχνολογίας των Υλικών και φυσικά Θερμοδυναμικής. Το τελευταίο κεφάλαιο ασχολείται με την επίδραση της δέσμης στους ιστούς, τα όργανα και τα κύτταρα του ανθρώπου. Καταγράφονται οι κίνδυνοι από την έκθεση των εργαζομένων στην δέσμη laser και προτείνονται μέτρα ασφάλειας, κατά την λειτουργία των συστημάτων laser.

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LASER

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ LASER

Η λέξη Laser είναι ακρωνύμιο των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας). Ένα laser είναι ένας ενισχυτής φωτός. Μπορεί να παράγει μία έντονη δέσμη φωτονίων τα οποία έχουν την ίδια συχνότητα, φάση, διεύθυνση και πόλωση. Αυτή η ιδιαιτερότητα έχει ως αποτέλεσμα η δέσμη laser να ξεχωρίζει από μία κοινή δέσμη φωτός βάσει των εξής ειδικών χαρακτηριστικών: λαμπρότητα, μονοχρωματικότητα, συμφωνία και κατευθυντικότητα.



**Σχήμα 1-1:** Laser.

Όλες οι εφαρμογές των laser βασίζονται σε ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω ειδικά γνωρίσματα.

Οι πηγές laser μπορούν να ταξινομηθούν, με βάση το μέσο που χρησιμοποιείται για την δημιουργία της δέσμης του laser. Οι βασικοί τύποι που διακρίνονται με βάση το παραπάνω κριτήριο είναι: τα laser **στερεού, υγρού** και **αέριου** τύπου. Η δέσμη φωτός που παράγεται από κάθε τύπο laser έχει ένα χαρακτηριστικό μήκος κύματος και εύρος ενέργειας. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι laser που χρησιμοποιούνται για διεργασίες στην βιομηχανία είναι τα laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub> laser), τα laser Nd:YAG και τα excimer laser.

Από τα παραπάνω, το χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει και τονίζει την ιδιαιτερότητα ενός laser είναι η συμφωνία, γι' αυτό και το φως του laser είναι "σύμφωνο", σε αντίθεση με το κοινό φως που είναι ασύμφωνο. Μπορεί κανείς να φανταστεί το σύμφωνο φως σαν μία καλά οργανωμένη ομάδα στρατιωτών που περπατούν με βήμα προς την ίδια κατεύθυνση και φορούν όλοι την ίδια στολή. Όπως ένα καλά οργανωμένο στρατιωτικό τμήμα, το φως του laser μπορεί να κάνει πράγματα τα οποία το λιγότερο οργανωμένο φως ή αντίστοιχα η λιγότερο οργανωμένη ομάδα στρατιωτών, δεν μπορεί να κάνει τόσο καλά. Οι φυσικοί έχουν κατορθώσει να ελέγχουν και να χειρίζονται το φως του laser εδώ και περισσότερα από 40 χρόνια έχοντας επιτύχει θαυμαστά αποτελέσματα.



### 1.1.1 Ιστορική αναδρομή

Το 1704 ο Newton χαρακτήρισε το φως σαν το σύνολο πολύ γρήγορα κινούμενων σωματιδίων εξαιτίας της τάσης του να κινείται σε ευθεία γραμμή. Επίσης, αναγνώρισε ότι το φως κατέχει συγκεκριμένες κυματοειδείς ιδιότητες. Στην συνέχεια, από πειράματα που πραγματοποίησε ο Άγγλος φυσικός Young, το 1803, εξήχθησαν νέα συμπερασματικά δεδομένα, ενώ παράλληλα οι Fresnel και Arago ερμήνευσαν σωστά ένα πείραμα που είχε γίνει από τον Huygens στις αρχές του 17<sup>ου</sup> αιώνα, και ο οποίος είχε δείξει ότι η δέσμη φωτός που μεταφερόταν μέσα από κρυστάλλους ασβεστίτη ήταν πολωμένη και πείστηκε ότι το φως αποτελείται από κύματα. Οι Fresnel και Arago επανεξέτασαν το πείραμα και εξήγησαν ότι τα κύματα του φωτός είναι εγκάρσια κύματα ταλαντούμενα κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης και όχι διαμήκη, όπως είχε αξιώσει ο Huygens. Στην συνέχεια ο Maxwell περιέγραψε το φως σαν ταχεία μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δια μέσω της ταλάντωσης των φορτισμένων σωματιδίων.

Το 1900, ο Plank ξεκίνησε μια έρευνα για την εκπομπή κυμάτων από ζεστά ανθρώπινα σώματα. Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, η ένταση της ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη συχνότητα θα έπρεπε να είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της συχνότητας. Παρ' όλα αυτά, τελείως διαφορετικά αποτελέσματα εξήχθησαν από τα πειράματα. Ο Plank αναζήτησε μια εμπειρική φόρμουλα για να εξηγήσει την σχέση μεταξύ της έντασης και της συχνότητας της εκπεμπόμενης ραδιενέργειας και τεκμηρίωσε το γεγονός ότι το φως πρέπει να ανταλλάσσει ενέργεια με την ύλη. Η εξίσωση του έδειξε ότι η ενέργεια που ανταλλάσσεται είναι σχετική με την συχνότητα μέσω μιας σταθεράς, που είναι γνωστή σαν **σταθερά του Planck**.

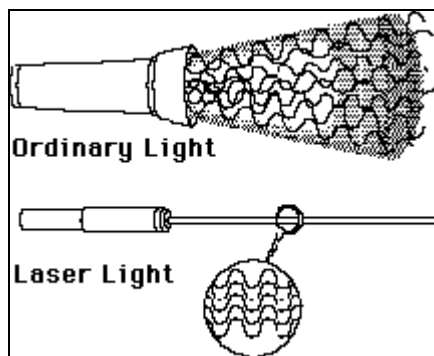
Το 1905, ο Einstein επέκτεινε περισσότερο την ιδέα του φωτός. Επισημάνει ότι η ηλεκτρομαγνητική θεωρία απέτυχε στο να εξηγήσει τις φωτοηλεκτρικές επιδράσεις, στις οποίες φορτισμένα μεταλλικά πιάτα έχαναν το φορτίο τους όταν εκτίθονταν στην ακτινοβολία σημαντικού ποσού ενέργειας. Τα ηλεκτρόνια απορροφούσαν αρκετή ραδιενεργό ενέργεια με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αρκετή διέγερση, ώστε να εγκαταλείψουν το μεταλλικό πιάτο. Έτσι ο Einstein ισχυρίστηκε ότι η κβαντική συμπεριφορά του φωτός ήταν η μόνη εξήγηση.

Το φως, λοιπόν, κατέχει σίγουρα κυματοειδείς ιδιότητες, όπως είναι η πολικότητα και η ικανότητα ανάμιξης, αλλά μπορεί επίσης να συμπεριφερθεί σαν να αποτελείται από ξεχωριστά σωματίδια, τα οποία ονομάζονται φωτόνια και τα οποία περιέχουν ένα ξεχωριστό ποσό ενέργειας. Το 1920, κατανοήθηκαν για πρώτη φορά αυτά τα φαινόμενα και έτσι δημιουργήθηκε η **κβαντική μηχανική**.

Παρ' όλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις το φως δεν διακατέχεται από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής και εμφανίζει κυματοειδείς ιδιότητες αλλά και ιδιότητες ύλης. Η δέσμη φωτός του Laser διαφέρει από το συνηθισμένο φως στο ότι αποτελείται από φωτόνια τα οποία έχουν όλα την ίδια συχνότητα και φάση.

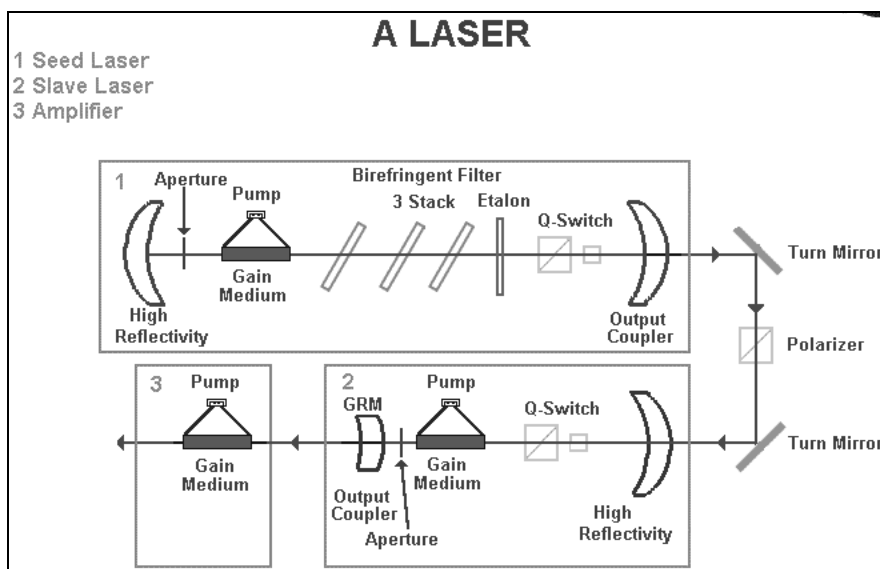
Όταν το 1960 εμφανίστηκαν τα πρώτα lasers, μερικοί επιστήμονες συνήθιζαν να μιλούν ειρωνικά λέγοντας ότι 'το laser ήταν μια λύση που έψαχνε για το πρόβλημα'. Αυτό το έλεγαν, διότι εκείνη την εποχή τα lasers είχαν πολύ λίγες πρακτικές εφαρμογές. Ραγδαία όμως οι εφαρμογές αυτές πολλαπλασιάστηκαν και σήμερα τα lasers έχουν τόσες πολλές εφαρμογές, που λίγοι άνθρωποι γνωρίζουν με πόσους τρόπους επηρεάζουν την ζωή μας.

Έκτοτε και ιδιαίτερα μετά το 1970 η τεχνική των laser παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη και μαζί με την μικροηλεκτρονική θεωρείται ο σημαντικότερος τομέας της σύγχρονης τεχνολογίας από την άποψη των πολυάριθμων και οικονομικά εκμεταλλεύσιμων εφαρμογών της. Κατά το διάστημα αυτό εξάλλου, ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της ακτινοβολίας, έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη laser.



**Σχήμα 1–2:** Διαφορά μεταξύ του κοινού φωτός και δέσμη Laser.

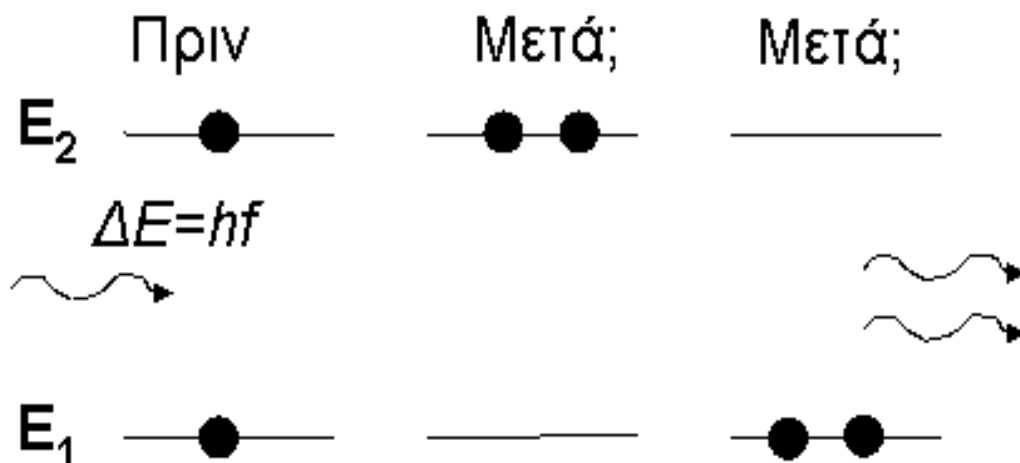
Η ικανότητα των Laser να παράγουν τέτοιου είδους δέσμη φωτός βασίζεται στην θεωρία ότι τα φωτόνια μπορούν να διεγείρουν τα ηλεκτρόνια των ατόμων και έτσι εκπέμπουν φωτόνια της ίδιας ακριβώς συχνότητας. Αυτό συμβαίνει όταν ένα φωτόνιο περάσει πολύ κοντά από ένα ηλεκτρόνιο και μπορεί να εξηγηθεί μέσω της κβαντικής μηχανικής. Η πιθανότητα της διέγερσης αξιώθηκε αρχικά από τον Einstein το 1917, αλλά η πρώτη πηγή Laser δημιουργήθηκε μετά από σχεδόν μισό αιώνα.



**Σχήμα 1–3:** Τυπικός μηχανισμός Laser.

### 1.1.2 Μηχανισμός δημιουργίας των LASER

Από την στιγμή που η κύρια συνιστώσα του Laser είναι τι ίδιο το Laser, είναι αναγκαία η κατανόηση των μηχανισμών που δημιουργούν την δέσμη φωτός του Laser. Οι πηγές Laser μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε ακτίνα φωτός υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, μέσω των μηχανισμών της διέγερσης και της ενίσχυσης.

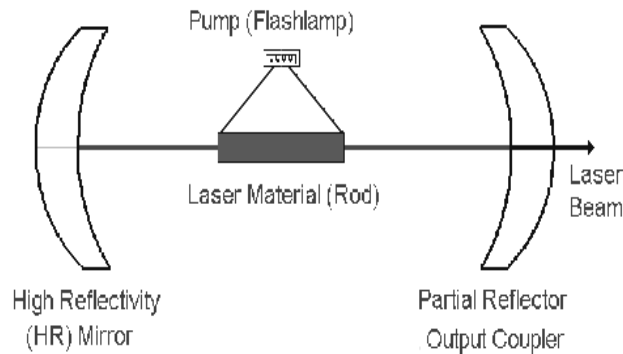


Σχήμα 1-4: Διέγερση ηλεκτρονίων.

Ο μηχανισμός της διέγερσης (*Stimulation*) λαμβάνει χώρα όταν ηλεκτρόνια διεγείρονται από μια εξωτερική πηγή όπως είναι ένα ηλεκτρικό τόξο ή μια λάμπα, έχοντας σαν αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων. Η απαιτούμενη ενέργεια για την μετάβαση ενός ηλεκτρονίου από μια ενεργειακή κατάσταση σε μια άλλη παρέχεται από μια διαδικασία διέγερσης ή από ένα μηχανισμό άντλησης ιόντων. Αυτό επιτυγχάνεται με την απορρόφηση ενέργειας, η οποία προέρχεται από μηχανικές, χημικές, ηλεκτρικές ή πηγές φωτός, από το μέσο του Laser. Η παρεχόμενη ενέργεια στην διαδικασία διέγερσης πρέπει να υπερβαίνει την ενέργεια εξόδου από το Laser, δεδομένου ότι υπάρχουν αρκετές απώλειες ενέργειας. Το μέσο του Laser, αποτελείται από ιόντα, άτομα ή μόρια των οποίων τα ηλεκτρόνια συντελούν στην αλλαγή ενεργειακής κατάστασης. Σύμφωνα με τις αρχές της κβαντικής μηχανικής, άτομα ή μόρια του μέσου έχουν ξεχωριστά ενεργειακά επίπεδα. Η ακτίνα του Laser δημιουργείται κατά την μετάβαση ηλεκτρονίων από μία υψηλή ενεργειακή κατάσταση σε μια χαμηλή ενεργειακή κατάσταση και το παραγόμενο μήκος κύματος είναι χαρακτηριστικό του μέσου του Laser. Στην αρχή της διαδικασίας παραγωγής της ακτίνας Laser, η εκπομπή φωτονίων γίνεται τυχαία. Καθώς κάθε φωτόνιο διεγείρει άλλα ηλεκτρόνια ώστε να εκπέμπουν φωτόνια, τα νέα αυτά φωτόνια θα έχουν πανομοιότυπο μήκος κύματος, διεύθυνση και χαρακτηρισικά φάσης με τα αρχικά φωτόνια. Τελικά, θα παραχθεί μια ακτίνα με φωτόνια ίδιου μήκους κύματος, διεύθυνσης και φάσης.

Ο μηχανισμός της ενίσχυσης (*Amplification*) του φωτός σε μια πηγή Laser επιτυγχάνεται μέσω ενός οπτικού συντονιστή (*resonator*), οποίος αποτελείται από μια κοιλότητα και το μέσο διέγερσης βρίσκεται μεταξύ δύο, υψηλής ακρίβειας, ευθυγραμμισμένων φακών. Ο ένας φακός είναι πλήρως απορροφητικός και ο δεύτερος

είναι απορροφητικός κατά ένα μικρό ποσοστό, ώστε να επιτρέπει την έξοδο της ακτίνας. Οι φακοί διοχετεύουν το φως πίσω στο μέσο διέγερσης, έτσι ώστε τα ήδη διεγερμένα φωτόνια να διεγείρουν και άλλα. Τα φωτόνια που δεν είναι ευθυγραμμισμένα με τον συντονιστή δεν κατευθύνονται από τους φακούς στο μέσο ώστε να ενισχύσουν άλλα φωτόνια, οπότε ο συντονιστής θα ενισχύσει μόνο εκείνα τα φωτόνια τα οποία έχουν κατάλληλο προσανατολισμό. Με τον μηχανισμό αυτό δημιουργείται μια ακτίνα με φωτόνια ίδιας συχνότητας και φάσης.

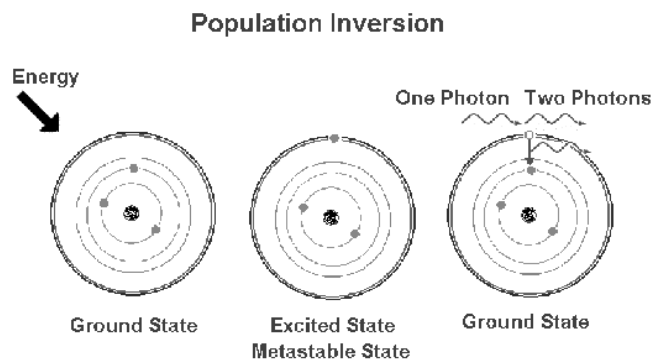


**Σχήμα 1-5:** Μηχανισμός διέγερσης ηλεκτρονίων.

Η αναστροφή πληθυσμού (*Population inversion*) είναι άλλη μια απαραίτητη συνθήκη για την παραγωγή της ακτίνας του Laser. Όταν το μέσο του Laser βρίσκεται σε ισορροπία, ο πληθυσμός των ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε μια ενεργειακή κατάσταση, καθορίζεται από την εξίσωση Boltzman. Για ένα μέσο με δύο ενεργειακές καταστάσεις, η σχέση μεταξύ της ενέργειας και του πλήθους των ηλεκτρονίων δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right) \quad (1-1)$$

όπου  $N_1$  και  $N_2$  είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων στις ενεργειακές καταστάσεις 1 και 2,  $E_1$  και  $E_2$  είναι οι ενέργειες των καταστάσεων 1 και 2, αντιστοίχως,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του μέσου και  $K$  είναι η σταθερά του Boltzman.



**Σχήμα 1-6:** Μηχανισμός αναστροφής πληθυσμού.

Καθώς, η αναλογία του πληθυσμού στις δύο ενεργειακές καταστάσεις είναι σχετική με την εκθετική συνάρτηση της διαφοράς των ενεργειακών καταστάσεων, η κατάσταση υψηλής ενέργειας έχει μικρότερο πληθυσμό ηλεκτρονίων από την κατάσταση χαμηλής ενέργειας, σε συνθήκες ισορροπίας. Ο σκοπός της επιλογής του κατάλληλου μέσου και μεθόδου διέγερσης είναι να προκληθεί μια μη ισορροπημένη κατάσταση, η οποία θα περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας από ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας. Θεωρητικά, ένας πολύ μικρός πληθυσμός ηλεκτρονίων απαιτείται για να επιτευχθεί η παραπάνω διαδικασία, αλλά λόγω ενεργειακών απωλειών που λαμβάνουν χώρα ο αριθμός των διεγερμένων ηλεκτρονίων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος.

Το αποτέλεσμα των μηχανισμών διέγερσης, ενίσχυσης και αναστροφής πληθυσμού είναι η παραγωγή μιας ακτίνας φωτονίων με κοινά χαρακτηριστικά, ονομαζόμενη δέσμη Laser. Η δέσμη αυτή έχει διαφορετικές ενεργειακές ιδιότητες από αυτές του διαχεόμενου φωτός. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τις δέσμες Laser χρήσιμες για πολλές εφαρμογές στους τομείς των επικοινωνιών, μετρήσεων και διεργασίας υλικών.

### 1.1.3 Χαρακτηριστικά των Laser

Από την στιγμή που τα βιομηχανικά Laser απαιτούν υψηλό κεφάλαιο και λόγω του ότι έχουν μεγάλο λειτουργικό κόστος, η κατάλληλη επιλογή του Laser πρέπει να είναι προσεκτικά συνυφασμένη με την μηχανική διεργασία και τα υλικά τα οποία πρόκειται να επεξεργαστούν έτσι ώστε η λειτουργία του να είναι οικονομικά συμφέρουσα.

Τα πέντε πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της δέσμης που παράγεται από μια μηχανή Laser και τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του κατάλληλου Laser για μια συγκεκριμένη λειτουργία είναι **η ισχύς της δέσμης, το μήκος κύματος, η χρονική κατάσταση, η χωρική κατάσταση** και **το μέγεθος εστιασμένης ακτίνας**, τα οποία αναφέρονται εκτενώς παρακάτω. Άλλοι πρακτικοί και οικονομικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη είναι: **η σταθερότητα της ενέργειας εξόδου, η κατάσταση TEM, το φυσικό μέγεθος της μονάδας, ο χρόνος ζωής της μηχανής, η κατανάλωση αερίων και λαμπτήρων, η δυνατότητα επισκευής και εύρεσης ανταλλακτικών, οι ενεργειακές απαιτήσεις και η αποδοτικότητα της μηχανής**. Αυτά τα δευτερεύοντα χαρακτηριστικά ποικίλουν ανάλογα με την κατασκευή και το μοντέλο της μηχανής Laser.

### Ενέργεια του Laser (Laser Power)

Η ενέργεια εξόδου είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας πηγής δέσμης Laser. Η επιλογή μιας πηγής με ενέργεια μικρότερη από την επιθυμητή θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου διεργασίας ή την ανικανότητα της μηχανής να επεξεργαστεί τα επιθυμητά υλικά. Τα έξοδα αγοράς μιας μηχανής Laser αυξάνουν με την αύξηση της ενέργειας εξόδου και η αγορά ενός συστήματος Laser μεγαλύτερης ενέργειας μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση των εξόδων.

Γενικά, η υψηλότερη ενέργεια συνεχούς κύματος επιτυγχάνεται από Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub> Laser), ενώ τα Laser Νεοδυμίου (Ned: YAG Laser) παρέχουν την υψηλότερη **“κορυφή ενέργειας”** (Peak Power) για Laser παλμικού κύματος. Η απαιτούμενη ενέργεια ενός Laser καθορίζεται εξετάζοντας τις οπτικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού ή της ομάδας των υλικών που πρόκειται να επεξεργαστεί. Οι θερμικές ιδιότητες μπορούν να χωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες: **σταθερές** και **“ιδιότητες απώλειες”**.

Η πρώτη κατηγορία καθορίζει το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την τήξη και την εξάτμιση του υλικού. Οι ιδιότητες της δεύτερης κατηγορίας είναι σημαντικές γιατί

καθορίζουν την μεταφερόμενη ενέργεια στην περιφέρεια του υλικού κατά την διάρκεια της διεργασίας. Η θερμική διάχυση δεν είναι σημαντική στις παροδικές λειτουργίες, ενώ η αγωγιμότητα είναι περισσότερο σημαντική στις σταθερές διεργασίες. Οι οπτικές ιδιότητες της μηχανής επηρεάζουν την ποιότητα της επιφάνειας του κατεργαζόμενου υλικού. Από όλες τις οπτικές ιδιότητες, η **απορροφητικότητα** του υλικού έχει την μεγαλύτερη επίδραση στον καθορισμό της απαιτούμενης ενέργειας του Laser. Επίσης ο ρυθμός της διεργασίας επηρεάζει την απαιτούμενη ενέργεια, αλλά η σχέση τους είναι πολύ πολύπλοκη δεδομένου ότι ο ρυθμός της διεργασίας επηρεάζει και τις ενεργειακές απώλειες. Η εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων μιας πηγής Laser μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μοντέλα της συγκεκριμένης διεργασίας σε σχέση με τις ιδιότητες του υλικού, τις παραμέτρους της διεργασίας (ενέργεια του Laser και ρυθμός διεργασίας) και τα χαρακτηριστικά αφαίρεσης υλικού (βάθος κοπής, βάθος οπής και γεωμετρία).

### **Μήκος κύματος (Wavelength)**

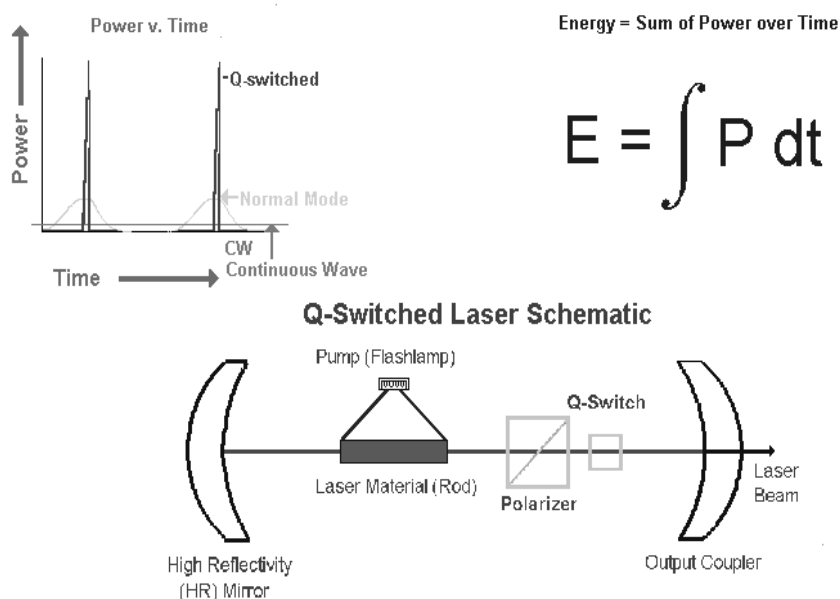
Το οπτικό σύστημα της μηχανής, από το οποίο και παράγεται η δέσμη του Laser, πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένο έτσι ώστε να παράγει το κατάλληλο μήκος κύματος. Η θερμική διαστολή των τμημάτων του συστήματος μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας σύστημα ψύξεως νερού. Μεγάλες μηχανικές δομές χρησιμοποιούνται με σκοπό να παρέχουν μια άκαμπτη βάση για την απόσβεση των ταλαντώσεων, ώστε να μην μεταδίδονται στο οπτικό σύστημα και ιδιαίτερα στους καθρέφτες. Η επιλογή των οπτικών εξαρτημάτων, όπως είναι οι φακοί, οι καθρέπτες, οι πολωτές, εξαρτάται και από το μήκος κύματος της δέσμης Laser. Σε μηχανές που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες για την μετάδοση της δέσμης, κατάλληλα υλικά είναι διαθέσιμα μόνο για περιορισμένα μήκη κύματος. Η απορροφητικότητα των υλικών εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης και γι' αυτό τον λόγο ορισμένες μηχανές Laser μπορεί να είναι πιο κατάλληλες για την διεργασία διαφορετικών υλικών.

### **Χρονική κατάσταση (Temporal Mode)**

Οι πηγές Laser μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε κατάσταση συνεχούς κύματος (*Continues Wave*), είτε σε κατάσταση παλμικού κύματος (*Pulsed Wave*). Στην κατάσταση συνεχούς κύματος η δέσμη του Laser εκπέμπεται χωρίς διακοπή, ενώ στην κατάσταση παλμικού κύματος η δέσμη εκπέμπεται περιοδικά. Η αντλούμενη ενέργεια συσσωρεύεται μέχρι να επιτευχθεί η οριακή ενέργεια. Τότε η αποθηκευμένη ενέργεια απελευθερώνεται ταχύτατα στην κοιλότητα του Laser. Η διεργασία με δέσμη συνεχούς κύματος έχει το πλεονέκτημα ότι η επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού είναι λεία μετά την διεργασία. Χρησιμοποιώντας διεργασία με δέσμη παλμικού κύματος μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερο βάθος οπών ή βάθος κοπής σε σχέση με το Laser συνεχούς κύματος αλλά προκαλεί μεγαλύτερες επιφανειακές ανωμαλίες στο κατεργαζόμενο υλικό.

Η δέσμη συνεχούς κύματος περιορίζεται από την ανικανότητα των ηλεκτρονίων να επιστρέφουν γρήγορα στην κατάσταση χαμηλής ενέργειας για επαναδιέγερση. Επίσης, υπάρχουν θερμικοί περιορισμοί όσον αφορά την ποσότητα της θερμότητας που μπορεί να απορροφηθεί από το μέσο. Επίσης περιορισμός υπάρχει και στον ρυθμό αποβολής της θερμότητας.

## Temporal Performance



Σχήμα 1-7: Χρονική κατάσταση Laser.

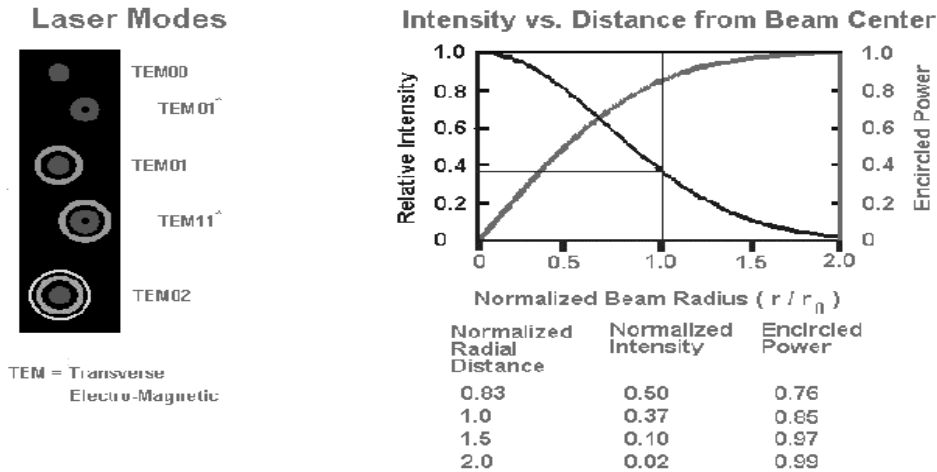
Το μέσο διέγερσης του Laser παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο αν η δέσμη θα είναι συνεχούς ή παλμικού κύματος. Τυπικά, τα Laser στερεού τύπου λειτουργούν καλύτερα με δέσμη παλμικού κύματος, ενώ τα Laser αερίου τύπου λειτουργούν καλύτερα με δέσμη συνεχούς κύματος. Η επιλογή μιας μηχανής Laser και της κατάστασης λειτουργίας του εξαρτάται πάρα πολύ από την διεργασία για την οποία προορίζεται. Η λειτουργία σε κατάσταση παλμικού κύματος είναι συνήθως καλύτερη για διεργασίες βαθιάς εισχώρησης (Deep Penetration). Η εστίαση της ενέργειας κάθε παλμού οδηγεί στην απώλεια ενός μικρού ποσοστού ενέργειας είτε μέσω αγωγιμότητας στο υλικό, είτε στο περιβάλλον. Η λειτουργία συνεχούς κύματος χρησιμοποιείται όταν απαιτείται υψηλή μέση ενέργεια, η οποία είναι σημαντικός παράγοντας στην επίτευξη υψηλών ρυθμών αφαίρεσης υλικού. Επίσης, η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας είναι πολύ σημαντική. Με δέσμη συνεχούς κύματος η επιφάνεια του κατεργαζόμενου υλικού είναι λεία, ενώ χρησιμοποιώντας δέσμη παλμικού κύματος σχηματίζεται κυματοειδής επιφάνεια.

### Χωρική κατάσταση (Spatial Mode)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο σχεδιασμός του συστήματος παραγωγής της δέσμης (*Resonator*) είναι πολύ σημαντικός για την παραγωγή της δέσμης με συγκεκριμένο μήκος κύματος. Ομοίως, η φάση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος μπορεί να διαφέρει από τον σχεδιασμό του συστήματος αυτού, έχοντας σαν αποτέλεσμα στην μορφή της χωρικής κατάστασης της δέσμης του Laser. Η μορφή της δέσμης μπορεί να χαρακτηριστεί από την **Εγκάρσια Ηλεκτρομαγνητική Κατάσταση** (Transverse Electromagnetic Mode – T.E.M.).

Οι TEM καταστάσεις γράφονται συνήθως με την μορφή  $TEM_{nm}$ . Οι δείκτες  $n$  και  $m$  χαρακτηρίζουν τον αριθμό των κόμβων σε ορθογώνιες κατευθύνσεις στην διάδοση της δέσμης. Παραδείγματα αποτελούν οι καταστάσεις  $TEM_{00}$  και  $TEM_{01}$ . Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες βασικές καταστάσεις TEM.

## Spatial Performance Parameters



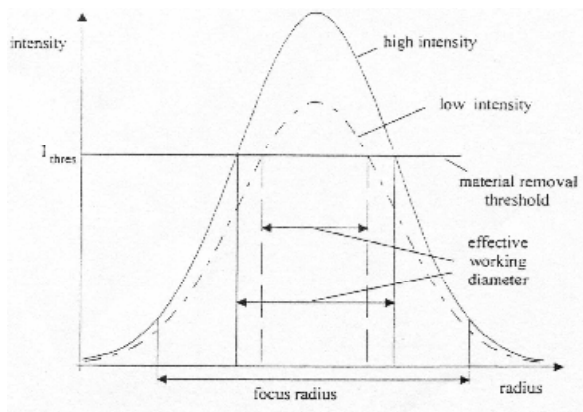
Σχήμα 1–8: Χωρική κατάσταση Laser.

Στην κατάσταση  $TEM_{00}$  για την οποία θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο, η κατανομή της ενέργειας της δέσμης ακολουθεί την κατανομή Gauss (*Gaussian Beam*) και θεωρείται η καλύτερη κατάσταση για μηχανικές διεργασίες διότι η φάση είναι ομοιόμορφη και υπάρχει μια ομαλή μείωση της ενέργειας κατά την απομάκρυνση από το κέντρο της δέσμης. Αυτό μειώνει στο έπακρο την διάθλαση κατά την εστίαση και επιτρέπει την δημιουργία δέσμης μικρού μεγέθους. Η κατανομή της ενέργειας σε αυτή την περίπτωση περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P = \int_0^{\infty} I(r) 2\pi r dr = \frac{P w_0^2}{2} I_0 \quad (1-2)$$

Όπου  $P$  είναι η ενέργεια της δέσμης,  $r$  είναι η ακτίνα από το κέντρο της δέσμης,  $w_0$  είναι η ακτίνα στην οποία η ένταση της ενέργειας της δέσμης βρίσκεται στο  $1/e^2$  της τιμής που έχει στο κέντρο της δέσμης ( $I_0$ ),  $I(r)$  είναι η ένταση της ενέργειας της δέσμης και δίνεται από την σχέση:

$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{w_0^2}\right) \quad (1-3)$$



Σχήμα 1–9: Κατανομή της ενέργειας της δέσμης κατά Gauss.



### **Εστιακό μέγεθος δέσμης (Focal Spot Size)**

Στην διεργασία υλικών, η ενεργειακή πυκνότητα της δέσμης (ενέργεια ανά μονάδα εμβαδού) στην επιφάνεια του υλικού είναι μεγάλης σημαντικότητας. Ακτινοβολία αρκετή ώστε να τήξει ή να εξατμίσει κάθε υλικό μπορεί να επιτευχθεί με την εστίαση της δέσμης του Laser. Η μεγαλύτερη δυνατή ακτινοβολία παρατηρείται στο εστιακό σημείο (Focus point) ενός φακού, όπου η δέσμη έχει την μικρότερη δυνατή διάμετρο και παίρνει τιμές της τάξεως των δισεκατομμυρίων Watt ανά τετραγωνικό εκατοστό.

Το μέγεθος της δέσμης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Αρχικά το μέγεθος της εστιασμένης δέσμης σχετίζεται με την ποιότητα της εισερχόμενης ακτίνας που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από την απόκλιση της ακτίνας. Επίσης, το μέγεθος της εστιασμένης δέσμης εξαρτάται από την διάθλαση και από την διάμετρο της εισερχόμενης ακτίνας. Περιοριζόμενοι σε συγκεκριμένα οπτικά εξαρτήματα, ο μόνος τρόπος για την παραγωγή δέσμης με μικρότερο μέγεθος είναι η αύξηση της διαμέτρου της εισερχόμενης ακτίνας.

#### **1.1.4 Ιδιότητες των Laser**

Οι ιδιότητες της δέσμης που παράγεται από μια πηγή Laser είναι μοναδικές και είναι αυτές που κάνουν την δέσμη του Laser να διαφέρει από το «κοινό» φως. Οι ιδιότητες που διακατέχουν κάθε δέσμη που παράγεται από μια πηγή Laser είναι ο μονοχρωματισμός, η συνάφεια, η διάθλαση, ακτινοβολία, επίσης είναι η κατευθυντικότητα, η λαμπρότητα και η πόλωση της δέσμης.

#### **Κατευθυντικότητα της δέσμης**

Κριτήριο για την Κατευθυντικότητα της δέσμης είναι το λεγόμενο "άνοιγμα" της, που στην πράξη είναι το διπλάσιο της γωνίας που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης με την κεντρική ακτίνα. Συνηθίζεται να εκφράζεται σε mrad. Για ένα κλασσικό μικρό Laser το άνοιγμα της δέσμης του είναι περίπου 1mrad, πράγμα που αντιστοιχεί σε αύξηση της διαμέτρου της δέσμης του Laser κατά 1mm ανά μέτρο διαδρομής.

#### **Λαμπρότητα δέσμης**

Τα Laser είναι πηγές μεγάλης λαμπρότητας και μεγάλης έντασης ακτινοβολίας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η λαμπρότητα της δέσμης ενός Laser He-Ne που έχει ισχύ 1mWatt είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη λαμπρότητα του ήλιου (τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη).

#### **Η πόλωση της δέσμης LASER**

Το φως των ηλεκτρικών λαμπτήρων, των λαμπτήρων φθορισμού, του ήλιου και των πολλών άλλων φωτεινών πηγών συμπεριφέρεται γενικά σαν "μη πολωμένο" ή "τυχαία πολωμένο". Αντίθετα, πολλά Laser παράγουν πολωμένο φως. Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε, ότι η ακτινοβολία τους έχει και αυτή την ιδιότητα σαν χαρακτηριστικό της.

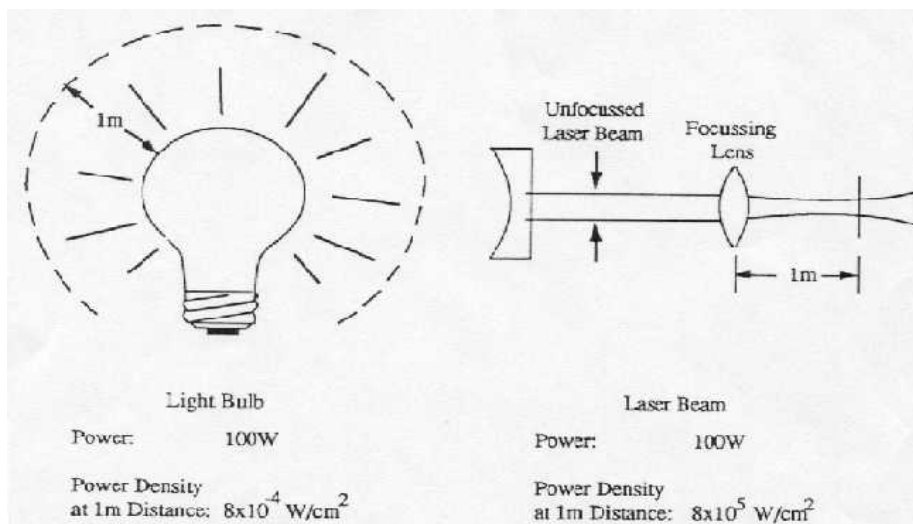
Στην πράξη η πόλωση της δέσμης του Laser επιτυγχάνεται με την χρήση ενός οπτικού πολωτικού στοιχείου που τοποθετείται μέσα στο οπτικό αντηχείο. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά τα στοιχεία είναι οπτικές επιφάνειες σε γωνίες Brewster, (που συνήθως ονομάζονται "παράθυρα Brewster"), πρίσματα, φράγματα ανάκλασης, οπτικοί πολωτές κλπ.

**Μονοχρωματισμός** συμβαίνει όταν το εύρος των συχνοτήτων που εκπέμπονται από την πηγή φωτός είναι μικρό. Η δέσμη του Laser συνήθως περιέχει πολύ λίγες ή μια φασματική γραμμή πολύ μικρού πλάτους.

Η χωρική και χρονική **συνάφεια** της δέσμης φωτός που παράγεται από μια πηγή Laser αναφέρεται συνήθως στην σχέση μεταξύ των ηλεκτρονικών και μαγνητικών στοιχείων που αποτελούν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η χωρική συνάφεια αφορά την συσχέτιση των φάσεων σε διαφορετικά σημεία του χώρου μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ενώ η χρονική συνάφεια της δέσμης αναφέρεται στην συσχέτιση των φάσεων σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου κατά την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα της δέσμης των Laser είναι η **διάθλαση**. Όταν το «κοινό» φως διοχετεύεται σε μεγάλη απόσταση, ένα μεγάλο μέρος του φωτός διασκορπίζεται. Το μεγάλο πλεονέκτημα των δεσμών Laser σε σχέση με το «κοινό» φως είναι ότι η διάθλαση τους είναι πολύ περιορισμένη, γι' αυτό και η δέσμη που παράγεται από μια πηγή Laser συνήθως χαρακτηρίζεται ως «ευθυγραμμισμένη ακτίνα». Η απόκλιση μιας τυπικής δέσμης Laser μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 10 mrad (mili – radians).

Τέλος, ένα άλλο χαρακτηριστικό των Laser είναι η **ακτινοβολία**. Ακτινοβολία είναι το ποσό της ενέργειας που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός ανά μονάδα επιφάνειας για μια συγκεκριμένη γωνία στερεού. Οι δέσμες φωτός που παράγονται από πηγές Laser χαρακτηρίζονται από υψηλή ακτινοβολία, δηλαδή έχουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, και λόγω του ότι η δέσμη έχει πολύ μικρή απόκλιση χρησιμοποιούνται για διεργασίες που έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις και μεγάλη ακρίβεια.



**Σχήμα 1–10:** Ακτινοβολία του φωτός.

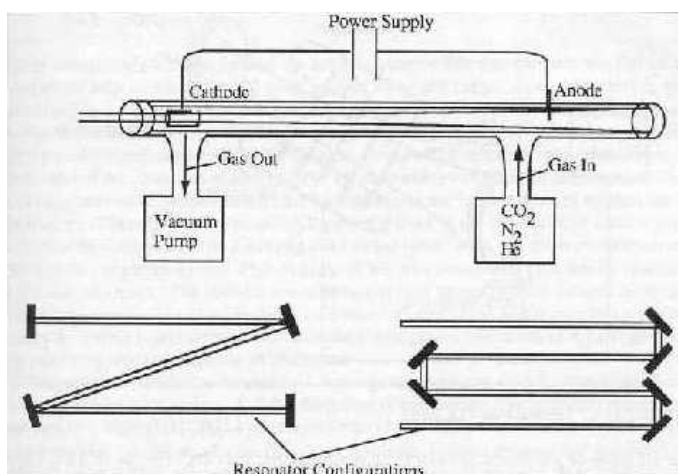
### 1.1.5 Βασικοί τύποι Laser

Τα Laser όπως προαναφέραμε μπορούν να ταξινομηθούν, αρκετά εύκολα, σύμφωνα με το είδος του μέσου που χρησιμοποιούν για την παραγωγή της δέσμης. Τρεις είναι οι κύριες κατηγορίες που προκύπτουν με βάση την παραπάνω ταξινόμηση: **Laser αέριου, υγρού** και **στερεού** τύπου.

Οι μηχανές Laser υγρού μέσου ανάλογα με την σύνθεση του μέσου, διαχωρίζονται λεπτομερέστατα σε τέσσερις υποκατηγορίες οι οποίες είναι: **ουδέτερα, ατομικά, ιοντικά** και **μοριακά**. Ένα τυπικό Laser ουδέτερου ατόμου είναι το laser Ηλίου – Νέου (HeNe), το οποίο είναι και το πιο διαδεδομένο Laser ορατού φωτός και μπορεί να συντονιστεί από υπέρυθρες μέχρι ποικίλες ορατές συχνότητες, με πιο κοινή την κόκκινη με μήκος κύματος 0.6328 μm. Η απαιτούμενη διέγερση παρέχεται από έναν ηλεκτρικό εκκενωτή συνεχούς ρεύματος σε χαμηλής πίεσης αγωγό εκκένωσης. Τα Laser ιονισμένου αερίου χρησιμοποιούν ένα ιονισμένο αέριο όπως είναι το Αργό (Ar), το Κρυπτόν (Kr) και το Ξέnon (Xe) για την παραγωγή δέσμης Laser με μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 0.5 και 1.0 μm. Η διέγερση σε αυτή την περίπτωση προκαλείται από έναν ηλεκτρικό εκκενωτή σε δύο στάδια. Αρχικά, το αέριο ιονίζεται και έπειτα τα ηλεκτρόνια οδηγούνται σε κατάσταση διέγερσης. Τα Laser μοριακού μέσου, χρησιμοποιούν αέρια μόρια σαν μέσο για την παραγωγή της δέσμης, ενώ τα μόρια διεγείρονται και αλλάζει ο τρόπος που δονούνται.

Το Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub> Laser) εκπέμπει δέσμη φωτός με μήκος κύματος 10.6 μm, στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το μέσο που χρησιμοποιείται είναι μια σύνθεση των αερίων διοξειδίου του άνθρακα, αζώτου και ηλίου. Ο μηχανισμός του Laser του διοξειδίου του άνθρακα διαφέρει σε σχέση με τους μηχανισμούς των Laser υγρού και ιοντικού τύπου. Η διέγερση του διοξειδίου του άνθρακα, στην συγκεκριμένη περίπτωση, επιτυγχάνεται με την αύξηση της ενέργειας ταλάντωσης των μορίων. Μόνο ένα μικρό ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα διεγείρεται μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης, διότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας απορροφάται από το άζωτο. Η μεγάλη πλειοψηφία των μορίων διοξειδίου του άνθρακα διεγείρεται μέσω της σύγκρουσης τους με μόρια αζώτου, τα οποία και μεταδίδουν την επιπρόσθετη ενέργεια ταλάντωσης. Αυτός είναι ένας τρόπος μεταφοράς ενέργειας πολύ επιλεκτικός και αποτελεσματικός λόγω του ότι το άζωτο είναι διμερές με μόνο ένα τρόπο ταλάντωσης και μια κατάσταση διέγερσης. Οι ιδιότητες ενός Laser διοξειδίου του άνθρακα καθορίζονται κυρίως από τον τρόπο ροής του αερίου. Οι τρεις κύριοι τρόποι ροής του αερίου είναι **σφραγισμένου εκκενωτικού σωλήνα, αξονική ροής και κάθετης ροής**.

Το Laser σφραγισμένου εκκενωτικού σωλήνα περιέχει ένα σταθερό μείγμα αερίου σφραγισμένο στην κοιλότητα, και επομένως δεν χρειάζεται σύστημα υποστήριξης και διαχείρισης αερίου. Ο δεύτερος τύπος, της αξονικής ροής, είναι ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος και στον οποίο το διοξείδιο του άνθρακα ρέει παράλληλα με τον άξονα της οπτικής κοιλότητας. Επίσης, τα Laser διοξειδίου του άνθρακα που χρησιμοποιούν αξονική ροή μπορούν να ταξινομηθούν λεπτομερέστερα με βάση την ταχύτητα της ροής σε **χαμηλής ταχύτητας** και **υψηλής ταχύτητας**. Τέλος, ο τρίτος τύπος είναι κάθετης ροής και στον οποίο μείγμα αερίων ηλίου (He), αζώτου (N<sub>2</sub>) και διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ρέει κάθετα στον άξονα της οπτικής κοιλότητας. Η ροή του αερίου υποστηρίζεται από φυσητήρα και ψύχεται με την βοήθεια εναλλάκτη θερμότητας.



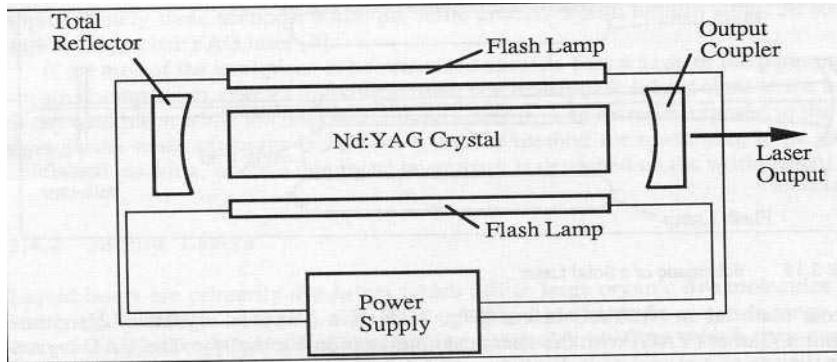
**Σχήμα 1–11:** Τυπικό CO<sub>2</sub> Laser.

Σε όλες τις περιπτώσεις Laser αερίου τύπου, η παροχή ρεύματος είναι είτε συνεχής, είτε εναλλασσόμενη, είτε συνδυασμός και των δύο. Τα οπτικά συστήματα κατασκευάζονται από κρυστάλλους Ψευδάργυρου – Σεληνίου (ZnSe), Γαλλίου – Αρσενικού (GaAs) ή από κρυστάλλους άλατος (NaCl, KCl). Το αλάτι χαρακτηρίζεται από φτωχές υγροσκοπικές ιδιότητες και έτσι χρησιμοποιείται μόνο σε ερευνητικές διεργασίες.

Ένας δημοφιλής και αναπτυσσόμενος τύπος αερίου Laser είναι ο ονομαζόμενος **“Excimer”**. Ο όρος *Excimer* είναι συντόμευση της φράσης **“Excited Dimer”**, δηλαδή διεγερμένο διμερές, μία σύνθεση δύο πανομοιότυπων ειδών που βρίσκονται σε μία κατάσταση. Μερικά Laser αυτού του τύπου χρησιμοποιούν Ξένο (Xe) και Φθόριο (F<sub>2</sub>) σαν μέσο, αλλά τα περισσότερα χρησιμοποιούν ένα σύμπλεγμα ανώτερου αερίου και αλογόνου.

Τα Laser τύπου *Excimer* χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατεργασία στερεών πολυμερών, για μικροεπεξεργασία κεραμικών και ημιαγωγών και τα χαρακτηριστικά του το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για διεργασίες αφαίρεσης υλικού.

Οι μηχανές Laser υγρού τύπου είναι κυρίως Laser βαφής τα οποία χρησιμοποιούν μεγάλα οργανικά μόρια βαφής σαν μέσο. Τα μόρια αυτά απορροφούν ακτινοβολία από ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και έχουν εκατοντάδες φασματικές γραμμές υπέρθεσης. Τα Laser αυτά είναι κατά τέτοιο τρόπο σχεδιασμένα ώστε η συχνότητα στην οποία και εκπέμπουν να μπορεί να μεταβάλλεται και γι’ αυτό ονομάζονται και **αρμονικά**. Η διέγερση επιτυγχάνεται συνήθως κάθετα με την βοήθεια ενός άλλου παλμικού Laser, μιας παλμικής λάμπας ή ενός εστιασμένου Laser συνεχούς κύματος.



**Σχήμα 1–12:** Τυπικό Nd: YAG Laser.

Η τρίτη μεγάλη κατηγορία πηγών Laser είναι τα Laser στερεού τύπου, τα οποία χρησιμοποιούν αιωρούμενα ιόντα σε μια κρυσταλλική μήτρα για την παραγωγή της δέσμης. Τα ιόντα ή **δότες**, όπως λέγονται, παρέχουν ηλεκτρόνια για διέγερση ενώ η κρυσταλλική μήτρα διαδίδει την ενέργεια μεταξύ των ιόντων. Οι δύο πιο κυρίαρχοι δότες είναι ιόντα Χρωμίου ( $\text{Cr}^{3+}$ ) για Laser ρουμπινιού και ιόντα Νεοδιμίου ( $\text{Nd}^{3+}$ ) για Laser Nd:YAG και Nd:glass. Τα Laser Nd:YAG και Nd:glass μοιάζουν πολύ μεταξύ τους όσον αφορά την δομή και την δράση της δέσμης. Η διέγερση των ηλεκτρονίων επιτυγχάνεται με την βοήθεια λαμπτήρων κρυπτού ή ξένου και δημιουργείται δέσμη με μήκος κύματος 1.06  $\mu\text{m}$ . Η παλμική λειτουργία των Laser Νεοδιμίου τα καθιστά κατάλληλα για διεργασίες διάνοιξης οπών και συγκόλλησης. Ιδιαίτερα τα Laser τύπου Nd:YAG απαιτούν κατά την λειτουργία και την υποστήριξη ψυκτικού συστήματος. Με μια απόδοση της τάξεως του 3%, ένα τυπικό Nd:YAG Laser έχει απώλεια ενέργειας τριάντα φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια εξόδου και αυτή η θερμότητα πρέπει να απομακρυνθεί ώστε να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία της πηγής.

- Τα laser αργού, που χρησιμοποιούνται ήδη από τη δεκαετία του 1960 για χειρουργικές επεμβάσεις στο μάτι.
- Τα laser ηλίου-νέου, που χρησιμοποιούνται στην καταπολέμηση των ρευματικών παθήσεων.
- Τα laser ημιαγωγών, που χρησιμοποιούνται στα C.D., όπου μια ακτίνα λέιζερ έχει αντικαταστήσει την κλασική βελόνα ανάγνωσης του δίσκου. Άλλες σημαντικές εφαρμογές τους είναι η μετάδοση μηνυμάτων μέσω οπτικών ινών και η κατασκευή μιας νέας γενιάς ταχύτατων και αθόρυβων εκτυπωτών, ενώ πολύ μεγάλες δυνατότητες παρέχουν και στην τρισδιάστατη απεικόνιση αντικειμένων.
- Τα laser υγρών χρωστικών, που χρησιμοποιούνται στη φασματοσκοπία και αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο της μοριακής και της ατομικής φυσικής.
- Τα laser ελεύθερων ηλεκτρονίων, που έχουν και τη μεγαλύτερη απόδοση εισερχόμενης-εξερχόμενης ακτινοβόλου ενέργειας σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα. Χρησιμοποιούνται στη χημεία για τη διάσπαση των μορίων σε προκαθορισμένες θέσεις και για τη διερεύνηση των κρυσταλλικών δομών, ενώ είναι ιδανικά για την κατασκευή οπλικών συστημάτων κατευθυνόμενης ενέργειας, που μπορούν μάλιστα να τοποθετηθούν σε τεχνητούς δορυφόρους και να έχουν ως αποστολή την καταστροφή εχθρικών διηπειρωτικών πυραύλων. Σχετικές έρευνες έχουν γίνει στις Ην. Πολιτείες στο πλαίσιο του προγράμματος SDI.
- Τα lasers ακτίνων Χ, που είναι και τα πλέον πρόσφατα και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μελέτη του κυττάρου στη βιολογία και για τη μελέτη των ιδιοτήτων των επιφανειών σε μοριακό επίπεδο στη φυσικοχημεία.

Σε γενικές γραμμές οι ακτίνες lasers κατακτούν μέρα με τη μέρα ολοένα και μεγαλύτερο τμήμα της επιστημονικής έρευνας (βασικής και εφαρμοσμένης), της βιομηχανικής παραγωγής, αλλά και της αγοράς.

Εκτός από τις πολυάριθμες χρήσεις τους στην ιατρική, μερικές από τις νεότερες, μετά το 1990, ερευνητικές προσπάθειες και εφαρμογές των ακτίνων lasers είναι:

- Η προστασία των μεταλλικών τμημάτων διαφόρων κατασκευών από τη διάβρωση. Η τεχνική βασίζεται σε μια θερμική διαδικασία, κατά τη διάρκεια της οποίας μια δέσμη laser προκαλεί σε κλάσματα του δευτερολέπτου την τήξη μιας προστατευτικής σκόνης, που επικάθεται στη συνέχεια πάνω στο μέταλλο δημιουργώντας ένα λεπτότατο, αλλά εξαιρετικά ανθεκτικό προστατευτικό στρώμα.

- Η χρήση επίγειων laser για την προώθηση διαστημοπλοίων. Από τη NASA γίνονται έρευνες για την ανάπτυξη ενός διαστημικού οχήματος που θα τίθεται σε τροχιά με τη βοήθεια μιας ισχυρότατης πηγής λέιζερ, τοποθετημένης στο έδαφος. Το σύστημα αυτό έχει το πλεονέκτημα η ενέργεια προώθησης να παρέχεται από τη Γη και να μη μεταφέρεται από το ίδιο το όχημα εις βάρος του ωφέλιμου του φορτίου.

- Η χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας laser για τον εντοπισμό ρυπογόνων ουσιών. Πρόκειται για ένα σύστημα που αναπτύχθηκε ταυτόχρονα στη Μ. Βρετανία και την Καλιφόρνια των Ην. Πολιτειών και το οποίο είναι σε θέση να εντοπίζει με μεγάλη ακρίβεια στην ατμόσφαιρα ρυπογόνες ουσίες, όπως μεθάνιο, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο κ.λπ., από απόσταση μέχρι και 3 χλμ.

- Πειράματα με laser για την επίτευξη της ελεγχόμενης πυρηνικής σύντηξης. Μία από τις δυνατές λύσεις για το πρόβλημα αυτό, που απασχολεί εδώ και πολλές δεκαετίες τους φυσικούς, είναι η σύνθλιψη σφαιριδίων πυρηνικού καυσίμου με τη χρήση laser ακτίνων Χ. Σ' ένα πρόσφατο πείραμα που έγινε στις Η.Π.Α., 24 δέσμες ενός συστήματος λέιζερ εστιάστηκαν σε ένα σφαιρίδιο καυσίμου μεγέθους τυπογραφικού στίγματος, με ενθαρρυντικά όσον αφορά το βαθμό απόδοσης αποτελέσματα.

- Εφαρμογές στη γεωπονία. Με τη βοήθεια ακτίνων laser που "σαρώνουν" τις φυτείες, εντοπίζονται ελλείψεις οργανικών συστατικών στα φυτά, οι οποίες δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι.

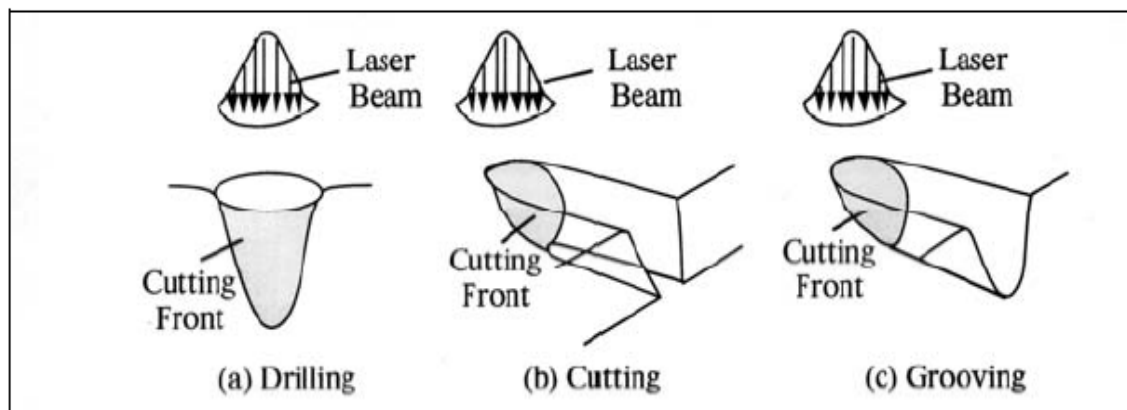
- Οι οπτικές κάρτες laser. Πρόκειται για πιστωτικές ή άλλου είδους κάρτες, στις οποίες η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται με χρήση οπτικών μεθόδων που βασίζονται στη τεχνική laser. Οι κάρτες αυτές διαθέτουν μνήμες εκατοντάδες φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των λεγόμενων έξυπνων καρτών, που διαθέτουν τσιπ μνήμης, και επιπλέον αποκλείουν τη δυνατότητα υποκλοπής ή πλαστογράφησης των πληροφοριών τους. Είναι σε χρήση ήδη στην Ιαπωνία από τράπεζες και στη Μ. Βρετανία στον τομέα των τηλεπικοινωνιών.

Οι εφαρμογές των ακτίνων lasers έχουν αναπτυχθεί κατά την τελευταία εικοσαετία με γεωμετρική πρόοδο και αγκαλιάζουν ένα ευρύτατο πεδίο: από την πολεμική βιομηχανία και την αεροδιαστημική έως αντικείμενα και συσκευές της καθημερινής ζωής, όπως είναι οι οπτικές κάρτες λέιζερ και τα ηχοσυστήματα Compact Disk (CD). Εκτός, όμως, από την τεχνολογία, σημαντικότερη είναι η προσφορά τους και στην ιατρική, όπου αποτελούν ένα σύγχρονο εργαλείο θεραπευτικής παρέμβασης μεγάλης πιστότητας και ακρίβειας στο χειρισμό, το οποίο έχει μειώσει σε πολλές παθήσεις τόσο τον πόνο όσο και το χρόνο θεραπείας. Επιπλέον, οι ακτίνες λέιζερ έχουν δώσει λύσεις σε πολλές περιπτώσεις που η κλασική χειρουργική αδυνατούσε να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά.

Αυτές είναι λίγες από τις πάμπολλες εφαρμογές και χρήσεις των lasers σε ποικίλους τομείς των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, οι οποίες και συνεχώς αυξάνονται. Το πιο εντυπωσιακό όμως γεγονός στην ιστορία αυτή αποτελεί αυτή καθαυτή η ανακάλυψη του laser, η φυσική και η τεχνολογία του.

## 1.2 ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ LASER

Στις μηχανουργικές διεργασίες με Laser, εκτός από τις γνωστές, όπως η κοπή, η συγκόλληση, η λείανση, η διάτρηση, ή η τórνευση υλικών, περιλαμβάνονται και πολύ πιο πολύπλοκες όπως η δημιουργία "μασκών" στην παραγωγή μικροκυκλωμάτων ή η κατασκευή σωλήνων μικρής διαμέτρου μηχανικά ανθεκτικών εξωτερικά και χημικά ανθεκτικών εσωτερικά. Ειδικότερα, Laser με μικρό μήκος κύματος εκπομπής μεταδίδουν θερμότητα σε μέταλλα ή διηλεκτρικά καλύτερα από τα Laser μεγάλου μήκους κύματος και επομένως κάνουν μια συγκεκριμένη δουλειά πιο γρήγορα.



**Σχήμα 1-13:** Σχηματικές αναπαραστάσεις των διεργασιών διάτρησης, κοπής και χάραξης.

Υπερτερούν επίσης γιατί μπορούν να κάνουν πιο λεπτές εργασίες επειδή έχουν πιο μικρή διάμετρο εστιασμένης δέσμης, ίση περίπου με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας τους. Δυστυχώς όμως τα Laser μικρού μήκους κύματος έχουν μικρότερη ηλεκτρική απόδοση.

### 1.2.1 Κοπή με Laser (Laser Cutting)

Η κοπή με laser αποτελεί την πιο δημοφιλή διεργασία με laser. Στην κοπή με laser, η δέσμη διαπερνά το προς επεξεργασία κομμάτι και μετακινείται παράλληλα προς την επιφάνεια του. Με τη κοπή με laser μπορούμε να επιτύχουμε και διάνοιξη οπών, αν η διάμετρος της οπής είναι μεγαλύτερη από τη δέσμη laser που χρησιμοποιείται στην διάτρηση. Ανάλογα με τη φύση του υλικού που αφαιρείται, η κοπή με laser διαιρείται σε δύο τύπους: αυτούς της κοπής με εξάχνωση και της κοπής με τήξη. Στην περίπτωση της κοπής με εξάχνωση το υλικό ατμοποιείται (π.χ. στα

πλαστικά υλικά).Το φαινόμενο αυτό συναντάται συνηθέστερα σε παλμικά (στερεάς κατάστασης) lasers όπου η ενεργειακές συγκεντρώσεις των παλμών είναι ιδιαίτερα υψηλές.Στην κοπή με τήξη το υλικό λιώνει στο μέτωπο διάβρωσης και εκτινάσσεται από το διάκενο κοπής (kerf) με τη βοήθεια ενός αδρανούς ή ενεργού αερίου.Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ένα ενεργό αέριο,όπως οξυγόνο,η χημική αντίδραση καύσης του υλικού δρα ως ένας σημαντικός δευτερεύων μηχανισμός παροχής ενέργειας για την αφαίρεση υλικού.Σε μερικές περιπτώσεις όπου το οξυγόνο εφαρμόζεται στην κοπή με laser χάλυβα,οι αντιδράσεις καύσης μπορούν να αποτελέσουν τον πρωταρχικό λόγο αφαίρεσης υλικού,όπως συμβαίνει και με την κοπή με τόξο πλάσματος.

Βασικός στόχος της κοπής με laser είναι να επιτευχθεί το υψηλότερο ποσοστό αφαίρεσης υλικού για δεδομένο πάχος υλικού.Το αποτέλεσμα της επίδρασης των διαφορετικών παραμέτρων της διεργασίας μπορεί να κατανοηθεί μελετώντας μια πεπερασμένη επιφάνεια ελέγχου στο μέτωπο διάβρωσης.Αν και η θερμότητα μεταδίδεται και στις τρεις διαστάσεις κοντά στο μέτωπο διάβρωσης,εξαιτίας του πάχους του προς επεξεργασία κομματιού (η κατώτατη επιφάνεια αποτελεί ένα αδιαβατικό όριο),θεωρείται ότι η θερμότητα μεταδίδεται μέσω αγωγής παράλληλα προς την επιφάνεια του κάτω ορίου του κομματιού.Κατά συνέπεια,το φαινόμενο μετάδοσης θερμότητας μέσα στο στερεό μελετάται στις δύο διαστάσεις.

## 1.2.2 Χάραξη με laser (Laser grooving)

Στην χάραξη με laser,η δέσμη δεν κόβει το προς επεξεργασία κομμάτι καθ' όλο το πάχος του,αλλά μέρος αυτού.Η διεργασία της χάραξης περιλαμβάνει παρόμοια φαινόμενα με αυτά που συναντώνται και στην κοπή με laser.Αρκετές μελέτες έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια που αφορούν την μοντελοποίηση της συγκεκριμένης διεργασίας.Πειραματικά αποτελέσματα χάραξης με laser έχουν γίνει γνωστά,όπου δημιουργήθηκαν χαράξεις σε μεταλλικά και κεραμικά υλικά με μία δέσμη laser.

Δεδομένου ότι η διεργασία χάραξης με laser είναι παρόμοια με την διεργασία κοπής,μια παρόμοια προσέγγιση χρησιμοποιείται για να προκύψουν σχέσεις μεταξύ του βάθους της χάραξης και των παραμέτρων της διεργασίας.

Όσον αφορά τον πειραματισμό,οι σύγχρονες διεργασίες με laser στηρίζονται σε χρονοβόρες πρακτικές «δοκιμής και λάθους» προκειμένου να προσδιοριστεί ένα σύνολο αποδεκτών λειτουργικών συνθηκών.

Αυτό απαιτείται συχνά επειδή η αφαίρεση υλικού με laser-σε αντίθεση με τις παραδοσιακές,μηχανικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού με συμβατικές μηχανές,όπου η γεωμετρία εργαλείων είναι γνωστή,και «αποτυπώνεται» στο κομμάτι είναι γενικά,μια «τυφλή» διεργασία όπου το βάθος κοπής δεν είναι προκαθορισμένο.

Αντίθετα,τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση της δέσμης laser με το προς επεξεργασία υλικό για μια ορισμένη χρονική περίοδο,κατά τη διάρκεια της οποίας η ισχύς της δέσμης laser μπορεί να παρουσιάσει διακυμάνσεις,οι θερμικές ιδιότητες του υλικού μπορεί να μεταβληθούν και ένα πλήθος άλλων παραγόντων μπορεί να επηρεάσει την αλληλεπίδραση της δέσμης laser με το υπό επεξεργασία κομμάτι.



### 1.2.3 Συγκόλληση με LASER (Laser welding)

Η συγκόλληση με laser έχει μεγάλη δυνατότητα εστίασης σε μικρή περιοχή. Ο λόγος βάθους, πλάτος συγκόλλησης, ξεκινά από 4 και φτάνει ως 10. Για σημειακές συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων που χρειάζονται ισχύς μικρότερη από 100 KW, υπάρχει η δυνατότητα παλμικής διαμόρφωσης laser. Με την συγκόλληση με laser μπορεί να γίνει εύκολα πιο αυτοματοποιημένη η παραγωγή διότι υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης σε δύσκολα σημεία, τα πάχη μπορεί να είναι κάτω από 2mm και οι ταχύτητες συγκόλλησης ξεκινούν από 2.5-80 m/min ανάλογα με το πάχος. Οι ιδιότητες οι οποίες έχει η συγκόλληση με laser είναι ότι η επιφάνεια του υλικού έχει καλή ποιότητα, υπάρχουν πολύ μικρές παραμορφώσεις, έχει καλή ολκιμότητα και μικρό πορώδες. Τα υλικά τα οποία συγκολλούνται με αυτή την διαδικασία είναι τα Al, Ti, St, Cu, καθώς και υπερκράματα.

### 1.2.4 Διάνοιξη οπών με laser (Laser drilling)

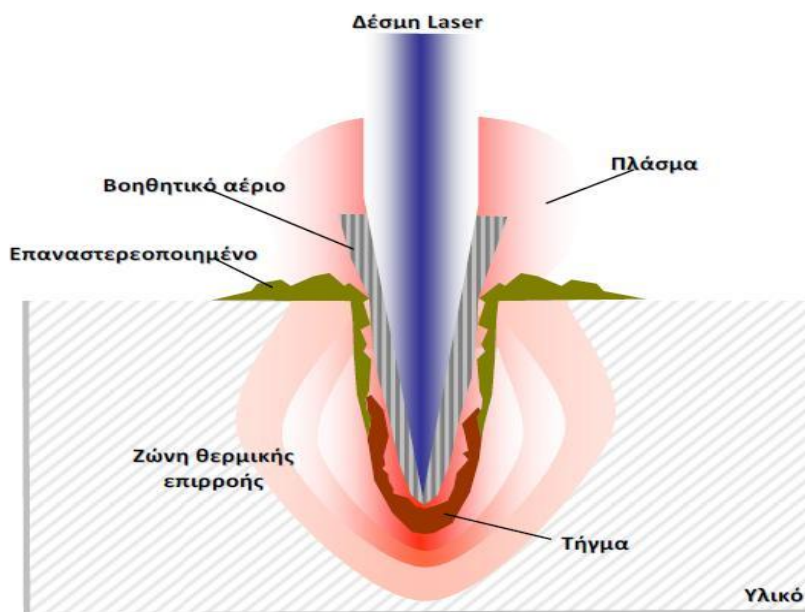
Η διάνοιξη οπών με τη χρήση δέσμης laser, αποτελείται από μια δέσμη laser μεγάλης ισχύος όπου προσπίπτει στο υλικό και κατά την εξάχνωση ή την τήξη του, δημιουργείται η επιθυμητή οπή. Στη διάνοιξη οπών με laser, η κίνηση του μετώπου διάβρωσης και η κατανομή της θερμοκρασίας με το χρόνο έχει μια σημαντική επίδραση στην απορρόφηση της ενέργειας της δέσμης. Η απορροφητικότητα του υλικού, μαζί με την ένταση laser της δέσμης, βρέθηκαν ότι αποτελούν τις σημαντικότερες παραμέτρους στη διεργασία διάτρησης με laser [19]. Η μεταβολή της απορροφητικότητας ή/και της ανακλαστικότητας κατά τη διάρκεια της διάτρησης με laser έχει ερευνηθεί σε διάφορα πειράματα. Για ένταση laser κάτω από μια τιμή κατώτατων ορίων (π.χ.  $300 \text{ J/cm}^2$  για το χαλκό), η επιφάνεια για τα περισσότερα μέταλλα παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα στην ενέργεια του laser και δεν εμφανίζεται αφαίρεση υλικού. Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της αλληλεπίδρασης της δέσμης και του υλικού, η ανακλαστικότητα της επιφάνειας είναι χρονικά εξαρτημένη, δεδομένου ότι η κλίση του ορίου των οπών που σχηματίζονται μεταβάλλεται ταχέως με το χρόνο.

Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται έως ένα σημείο στο οποίο η ένταση του laser που δέχεται το κομμάτι και αντιστοιχεί στην επιφάνεια της δημιουργούμενης οπής δεν είναι ικανή να προκαλέσει την περαιτέρω μετακίνηση του μετώπου διάβρωσης κατά την διεύθυνση διάδοσης της δέσμης laser. Για τιμές εντάσεως laser πάνω από το εν λόγω κατώτατο όριο, η διάτρηση πραγματοποιείται αλλά μπορεί να παρακλυθεί από την ανάπτυξη πλάσματος ή την δημιουργία κρουστικών κυμάτων (Laser Supported Detonation Waves-LSD). Ο μηχανισμός της διάτρησης με laser μπορεί να διαιρεθεί σε δύο στάδια: αυτά της θέρμανσης και της διάτρησης. Στο στάδιο της θέρμανσης, η θερμοκρασία της επιφάνειας του προς επεξεργασία κομματιού αυξάνεται μέχρι τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Το στάδιο της θέρμανσης είναι συνήθως πολύ σύντομο, επειδή η ένταση της δέσμης laser είναι πολύ υψηλή. Στο στάδιο διάτρησης, το βάθος των οπών αυξάνεται μέσω της απομάκρυνσης του τήγματος. Κατά τη διάρκεια του σταδίου θέρμανσης, η επιφάνεια του κομματιού δεν διαβρώνεται θερμικά. Επειδή είναι δύσκολο να δοθεί μια απλή αναλυτική λύση για τη διάτρηση λαμβάνοντας υπ' όψη τρισδιάστατα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας μεταβαλλόμενα με τον χρόνο, η διεργασία αντιμετωπίζεται συνήθως ως ένα μονοδιάστατο πρόβλημα μετάδοσης θερμότητας με ομοιόμορφη κατανομή έντασης laser [Καράμπελας Α. Τεχνολογία LASER].

## 2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΟΠΩΝ ΜΕ LASER

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διεργασία διάτρησης με δέσμη Laser όπως έχει ήδη αναφερθεί, περιλαμβάνει την αξιοποίηση μιας εστιασμένης δέσμης Laser υψηλής ενεργειακής πυκνότητας για την διάτρηση του υλικού μέσω της τήξης ή ακόμα και εξάτμισης του. Όπως σε όλες τις διεργασίες με δέσμη Laser, η διεργασία διάτρησης βασίζεται στην απορρόφηση της ενέργειας της δέσμης από το υλικό και την μετατροπή της ενέργειας των φωτονίων σε θερμική ενέργεια. Όταν η θερμοκρασία του υλικού ξεπεράσει το σημείο τήξης ή ακόμα και εξάτμισης, το υλικό αλλάζει φάση, απομακρύνεται κυρίως εξαιτίας της πίεσης ατμών και του βοηθητικού αερίου, το οποίο ρέει ομοαξονικά με την δέσμη, και με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται η οπή.



**Σχήμα 2-1:** Σχηματική απεικόνιση διεργασίας διάτρησης με δέσμη laser.



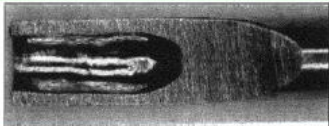
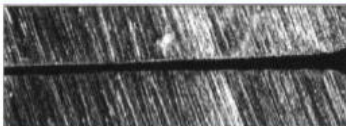



Στο στάδιο διάτρησης, το βάθος των οπών αυξάνεται μέσω της απομάκρυνσης του τήγματος. Κατά τη διάρκεια του σταδίου θέρμανσης, η επιφάνεια του κομματιού δεν διαβρώνεται θερμικά.

### 2.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER

Η τεχνολογία Laser και οι αντίστοιχες κατεργασίες με δέσμη Laser έχουν βρει σημαντική ανταπόκριση στην βιομηχανία και παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό

ενδιαφέρον,λόγω ορισμένων χαρακτηριστικών τα οποία τους προσδίδουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με συμβατικές διεργασίες .

Η αποδοτικότητα των διεργασιών με δέσμη *Laser* εξαρτάται κυρίως από τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες του υλικού και όχι από τις μηχανικές (αντοχή σε θραύση,όριο θραύσης,σκληρότητα,όριο διαρροής κτλ.). Κατά συνέπεια υλικά τα οποία είναι δύσκολο να κατεργαστούν με συμβατικές μεθόδους,π.χ. υψηλής σκληρότητας χάλυβες,κεραμικά,γυαλί,πλαστικά και σύνθετα υλικά,και διαθέτουν τις κατάλληλες θερμικές ιδιότητες,μπορούν να κατεργαστούν πολύ αποτελεσματικά με μια δέσμη *Laser*.Επίσης,στις διεργασίες με δέσμη *Laser* η απαραίτητη για την διεργασία ενέργεια μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας και κατά συνέπεια δεν αναπτύσσονται δυνάμεις μέσω της επαφής εργαλείου-υλικού.Αυτό έχει σαν συνέπεια την απουσία σημαντικών προβλημάτων που παρουσιάζουν οι συμβατικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού,όπως είναι η φθορά,η τριβή και η θραύση εργαλείων,ταλαντώσεις κατά την διάρκεια της διεργασίας,παραμορφώσεις στα στοιχεία των εργαλειομηχανών κ.α.

<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b>	<b>Αεροναυπηγική</b>	<b>Ηλεκτρονικά</b>
		
	<b>Ιατρική</b>	<b>Εργαλειομηχανές</b>
		
	<b>Αυτοκινητοβιομηχανία</b>	
		

**Σχήμα 2-2:** Εφαρμογές διάτρησης με δέσμη laser σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ο υψηλός βαθμός ευελιξίας.Ουσιαστικά το ίδιο σύστημα κατεργασίας και το ίδιο εργαλείο,δηλ.η δέσμη *Laser*,μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια πληθώρα διεργασιών όπως:διάτρηση,κοπή,χάραξη,συγκόλληση και θερμική επεξεργασία,με την ίδια προετοιμασία (*setup*) του ίδιου συστήματος *Laser*,μιας και οι διαφορετικές διεργασίες μπορούν να εκτελεστούν μεταβάλλοντας μόνο κάποιες κοινές παραμέτρους. Επίσης,εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους του στίγματος της δέσμης αλλά και της δυνατότητας διαχείρισης της κατανομής ισχύος της δέσμης,οι διεργασίες με δέσμη *Laser* χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας.

Ο σκοπός των διεργασιών αφαίρεσης υλικού με δέσμη *Laser* είναι η μεγιστοποίηση του ποσοστού αφαίρεσης υλικού,εξασφαλίζοντας βέλτιστη ποιότητα και διαστασιολογική ακρίβεια προκειμένου να παραχθεί οικονομικά,ένα υψηλής ποιότητας εξάρτημα ή

προϊόν. Η αφαίρεση υλικού με δέσμη Laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροπορική βιομηχανία, η μικροεπεξεργασία, η εμβιομηχανική, η χειρουργική, για την δημιουργία τρισδιάστατων μορφών, κτλ. Αυτές οι εφαρμογές όμως είναι σε διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης και βιομηχανικής εκμετάλλευσης. Μερικές από αυτές δεν έχουν εκμεταλλευτεί, είτε επειδή δεν προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με ανταγωνιστικές διεργασίες, είτε επειδή δεν είναι ακόμα επαρκώς θεμελιωμένες για βιομηχανική χρήση. Η βιομηχανική χρήση μερικών βασικών διεργασιών με δέσμη Laser εξαρτάται επίσης από την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση των πηγών δέσμης Laser χαμηλού κόστους. Η τεχνολογία των Lasers προσφέρει διαφορετικές μεθόδους δημιουργίας μίας δέσμης τόσο συνεχούς κύματος όσο και παλμικής, με μήκος κύματος που κυμαίνεται από κλάσματα έως δεκάδες μm. Ανάλογα με τον μηχανισμό που διέπει την επίδραση της δέσμης Laser στο υλικό, οι διεργασίες με δέσμη Laser μπορούν να διαχωριστούν σε διεργασίες αφαίρεσης υλικού, συνένωσης ή προσθήκης υλικού, και διεργασίες τροποποίησης των ιδιοτήτων ενός υλικού. Η διαδικασία αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser αποτελεί μια εξαιρετικά καθιερωμένη οικογένεια διεργασιών. Κατά τη διάρκεια της επίδρασης της δέσμης στο υλικό, ορισμένη ποσότητα της ακτινοβολούμενης ενέργειας απορροφάται από το υλικό (απορρόφηση φωτονίων), γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στο υλικό κοντά στην περιοχή του στίγματος της δέσμης με συνέπεια την τοπική εξασθένηση, την τήξη ή και την εξάχνωση του υλικού. Ανάλογα με το υλικό που υποβάλλεται σε επεξεργασία, την ισχύ της δέσμης Laser, το μέγεθος του στίγματος της δέσμης, επίσης την ταχύτητα σάρωσης, σε περίπτωση σχετικής κίνησης μεταξύ της δέσμης και του υλικού, τα αποτελέσματα που προκαλεί η δέσμη Laser στο υλικό μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τα φαινόμενα που προκαλούνται:

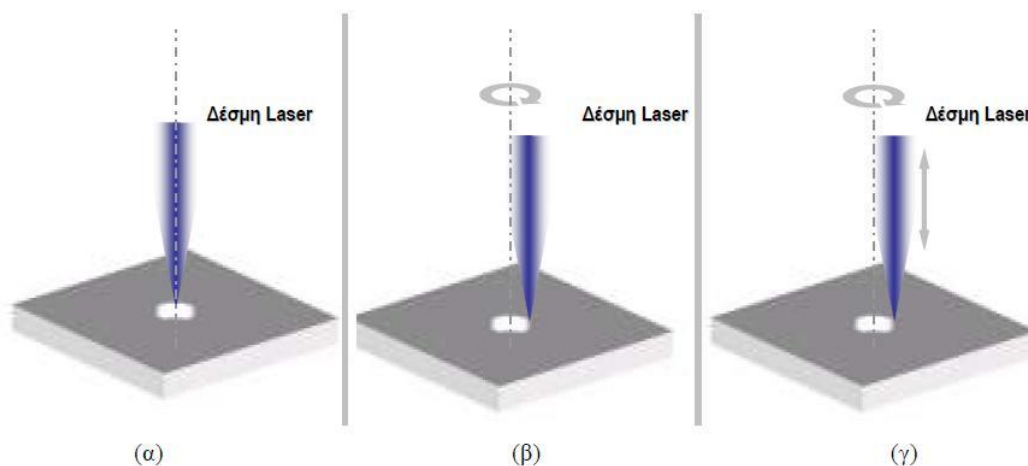
- Μηχανικά αποτελέσματα: Σε περίπτωση μικρών και μέσων τιμών έντασης Laser, σε συνδυασμό με υψηλές ταχύτητες σάρωσης, η άνοδος της θερμοκρασίας στην επεξεργαζόμενη επιφάνεια είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του υλικού. Κατά συνέπεια, το επεξεργαζόμενο υλικό θερμαίνεται τοπικά και οι δεσμοί των μορίων του υλικού εξασθενούν.
- Αποτελέσματα αλλαγής φάσης: Όταν η ένταση Laser είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε να ανυψώσει τη θερμοκρασία της ακτινοβολούμενης επιφάνειας του υλικού πάνω από το σημείο τήξης του υλικού ή και του σημείου εξάχνωσης.
- Φυσικές-χημικές αλληλεπιδράσεις: Ανάλογα με το βοηθητικό υλικό που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε διεργασία, το οποίο και την επηρεάζει, μπορούν να πραγματοποιηθούν φυσικό-χημικές αντιδράσεις μεταξύ του βοηθητικού υλικού και του προς επεξεργασία κομματιού. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ενεργοποίηση φαινομένων, όπως το κάψιμο, η πυροσυσσωμάτωση, η συγκόλληση, η ανάμειξη, κτλ.

### **2.3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER**

Η διεργασία διάτρησης με δέσμη Laser όπως είναι γνωστό, περιλαμβάνει την αξιοποίηση μιας εστιασμένης δέσμης Laser υψηλής ενεργειακής πυκνότητας για την διάτρηση του υλικού μέσω της τήξης ή ακόμα και εξάτμισης του. Όπως σε όλες τις διεργασίες με δέσμη Laser, η διεργασία διάτρησης βασίζεται στην απορρόφηση της ενέργειας της δέσμης από το υλικό και την μετατροπή της ενέργειας των φωτονίων σε θερμική ενέργεια. Όταν η θερμοκρασία του υλικού ξεπεράσει το σημείο τήξης ή ακόμα και εξάτμισης, το υλικό αλλάζει φάση, απομακρύνεται κυρίως εξαιτίας της πίεσης ατμών και του βοηθητικού αερίου, το οποίο ρέει ομοαξονικά με την δέσμη, και με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται η οπή.

Η διεργασία διάτρησης με δέσμη Laser μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τη σχετική κίνηση της δέσμης ως προς το κατεργαζόμενο υλικό ως εξής :

- Κρουστική διάτρηση (percussion Laser drilling)
- διάτρηση μέσω κοπής (trepanning Laser drilling)
- Ελικοειδής διάτρηση (helical Laser drilling)



**Σχήμα 2-3:** Διάφορες τεχνικές διάτρησης, (α)κρουστική διάτρηση, (β) διάτρηση μέσω κοπής και (γ) ελικοειδής διάτρηση.

Στην περίπτωση της κρουστικής διάτρησης η δέσμη παραμένει στατική επάνω από το υλικό και προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού,συνεχόμενα ή παλμικά,και η αφαίρεση του τηγμένου υλικού επιτυγχάνεται με την βοήθεια του βοηθητικού αερίου.Η δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνει την κίνηση της δέσμης στην περιφέρεια της οπής και κατά συνέπεια την κοπή του υλικού για τον σχηματισμό της οπής.Σε αυτή την περίπτωση,η διάμετρος της οπής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της δέσμης και επίσης αρκετά μεγαλύτερη από το πάχος του υλικού,προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του υλικού η οποία θα οδηγήσει στην μη επιτυχή κοπή της οπής.Επίσης,με αυτή την τεχνική δημιουργούνται μόνο διαμπερείς οπές.Στην τρίτη περίπτωση η κίνηση της δέσμης είναι ελικοειδής,δηλαδή καθώς κινείται στην περιφέρεια της οπής ταυτόχρονα κινείται και κάθετα ως προς το επίπεδο κατεργασίας.

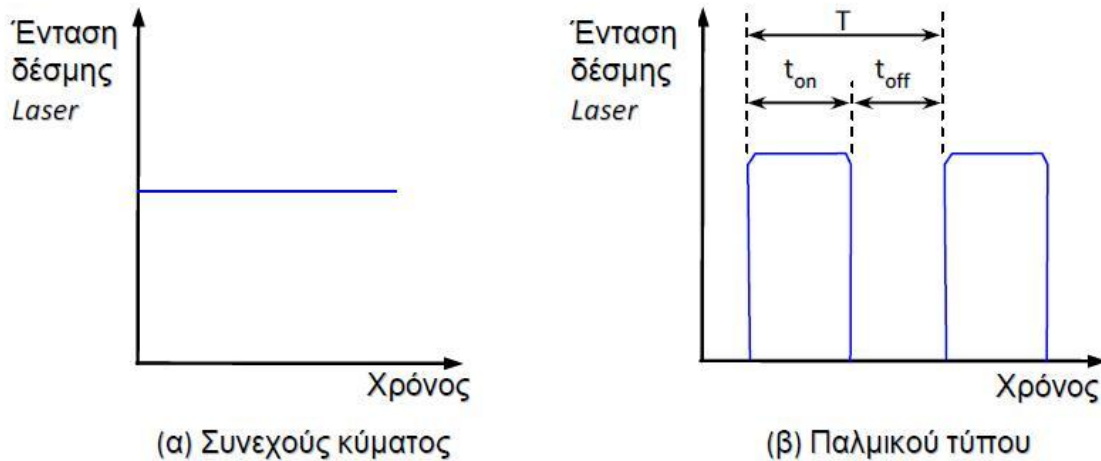
Κατά την κρουστική διάτρηση με παλμούς δέσμης Laser χρησιμοποιείται πληθώρα παλμών για την διαμόρφωση της οπής.Με αυτή την τεχνική μπορούν να δημιουργηθούν οπές με λόγο διαμέτρου-προς-βάθος έως και 1:100 για διαμπερείς οπές και 1:20 για «τυφλές» οπές.Η διάτρηση με παλμούς δέσμης Laser προσφέρει την δυνατότητα ρύθμισης της διάρκειας του παλμού και της συχνότητας των παλμών,γεγονός που μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αποφυγή απορρόφησης της δέσμης και διαστρέβλωσης της από τον πλάσμα (νέφος ιονισμένων ιόντων) ή το τηγμένο υλικό.

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η δημιουργία μεγάλου αριθμού οπών οι οποίες είναι πολύ κοντά τοποθετημένες.Τυπικές εφαρμογές της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser περιλαμβάνουν την δημιουργία οπών σε ιατρικά όργανα,σε ακροφύσια έγχυσης καυσίμων και σε φίλτρα και την δημιουργία καναλιών ψύξης και λίπανσης σε τμήματα κινητήρων.

Κατά την διεργασία διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser η διάρκεια κάθε παλμού χωρίζεται σε δύο στάδια:το στάδιο θέρμανσης και στάδιο διάτρησης/ψύξης.Στην πρώτη

φάση (στάδιο θέρμανσης) η δέσμη προσπίπτει στο υλικό και υπάρχει ροή θερμότητας με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του έως και την θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού. Στην δεύτερη φάση (στάδιο ψύξης) δεν υπάρχει ροή θερμότητας στο υλικό λόγω της δέσμης, το τήγμα απομακρύνεται και το υλικό ψύχεται λόγω των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής και ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον.

**Σχήμα 2-4:** Ένταση δέσμης laser, (α) συνεχούς κύματος, (β) παλμικού τύπου.



## 2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ LASER

Η διεργασία διάτρησης με δέσμη Laser παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, κάποια από αυτά είναι :

- Εξαιτίας της θερμικής φύσης της διεργασίας, μπορούν να δημιουργηθούν οπές σε υλικά τα οποία είναι δύσκολα να κατεργαστούν με συμβατικές μεθόδους, όπως π.χ. τα κεραμικά και σύνθετα υλικά αλλά και σληρυμένα μέταλλα.
- Ανάλογα με τον φακό εστίασης που χρησιμοποιείται, μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες ακρίβειες και μικρότερες διαστάσεις οπών.
- Είναι δυνατή η διάτρηση επικλινών οπών με κλίσεις έως και 80 μοίρες, κάτι το οποίο είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί με συμβατικές μεθόδους εξαιτίας της εκτροπής του εργαλείου από τον άξονα διάτρησης.

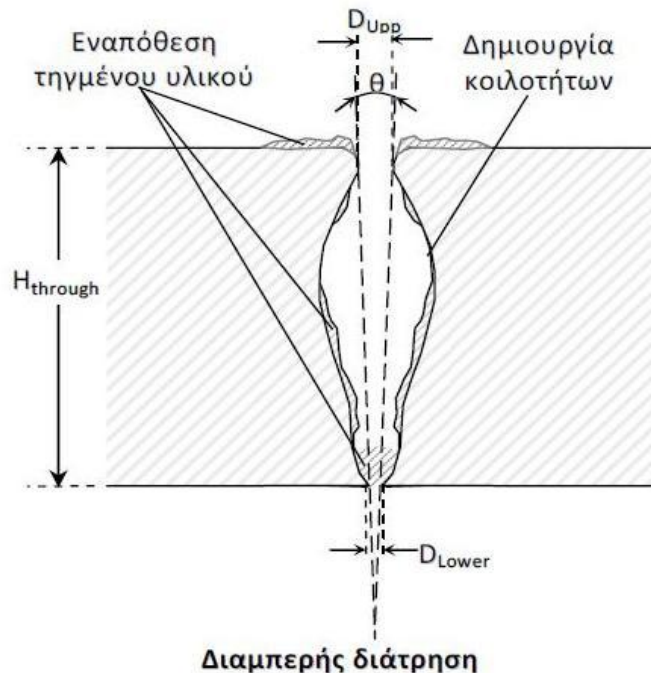
Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα, η διεργασία διάτρησης με δέσμη Laser έχει και κάποιους περιορισμούς:

- Είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθούν οπές μεταβλητής διαμέτρου.
- Για οπές μεγάλου βάθους, η απόκλιση της δέσμης Laser μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία μη αποδεκτών οπών.
- Εξαιτίας της επιρροής διαφόρων αστάθμητων παραγόντων, ο έλεγχος του βάθους στην περίπτωση «τυφλών» οπών αλλά και γενικώς των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής είναι πάρα πολύ δύσκολος.

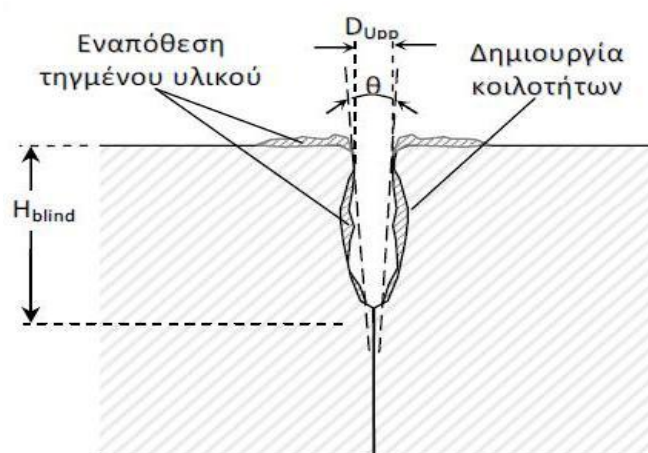
## 2.5 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι διεργασίες με δέσμη *Laser* (δυνατότητα επεξεργασίας ποικιλίας υλικών, απουσία δονήσεων, φθοράς εργαλείου και μηχανικών παραμορφώσεων, εκτέλεση πληθώρας διεργασιών χωρίς την ανάγκη ιδιαίτερων αλλαγών στο σύστημα κατεργασίας), το αποτέλεσμα της διεργασίας μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από μια πληθώρα παραγόντων, όπως ακαθαρσίες στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού, ατέλειες στην δομή του υλικού, μη αποτελεσματική συγκράτηση του κομματιού, ανεπιθύμητη μεταβολή των παραμέτρων της διεργασίας, κτλ. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα των βασικότερων διεργασιών με δέσμη *Laser*, της διάτρησης, της συγκόλλησης και της κοπής.

Στη βιομηχανία αεροσκαφών και άλλων μέσων μεταφοράς, ορισμένες από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* είναι η διάνοιξη ψυκτικών καναλιών σε τμήματα κινητήρων αεροσκαφών ή και αυτοκινήτων, σε φίλτρα καθώς και σε εγχυτήρες καυσίμων. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις οι διαστάσεις της οπής πρέπει να βρίσκονται **εντός συγκεκριμένων προδιαγραφών** και συνήθως εντός πολύ «**αυστηρών**» **πεδίων ανοχών**, καθώς η γεωμετρία της οπής επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του προϊόντος, π.χ. την ροή του αερίου ή υγρού. Επίσης, κατά την διεργασία της διάτρησης με δέσμη *Laser*, εκτός από την απόκλιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών από τις επιθυμητές τιμές, διάφορες μορφές ατελειών μπορούν να εμφανιστούν οι οποίες περιλαμβάνουν την εναπόθεση τηγμένου υλικού γύρω από την περιοχή της οπής καθώς και στο κάτω μέρος της, την δημιουργία εσωτερικών κοιλοτήτων και την κωνικότητα της οπής.



**Σχήμα 2-5:** Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας διάτρησης σε διαμπερή οπή με δέσμη laser.



### «Τυφλή» διάτρηση

**Σχήμα 2-6:** Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας διάτρησης σε τυφλή οπή με δέσμη laser.

Στην περίπτωση της συγκόλλησης το αποτέλεσμα της διεργασίας μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες δημιουργώντας ανεπιθύμητες ατέλειες στην περιοχή της συγκόλλησης.

Οι ατέλειες αυτές περιλαμβάνουν την εμφάνιση πόρων, απώλεια συγκόλλησης σε όλο το πάχος και την εμφάνιση ρωγμών. Όλα τα παραπάνω διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αντοχή και την δομική ακεραιότητα καθώς και την διάρκεια ζωής της συγκόλλησης. Η διεργασία χρησιμοποιείται για μαζική παραγωγή.

Έλεγχος μιας διεργασίας με δέσμη Laser μπορεί να επιτευχθεί διατηρώντας τις παραμέτρους τις διεργασίας εντός συγκεκριμένων προδιαγραφών, αφού πρώτα έχει διασφαλιστεί το αποτέλεσμα της επίδρασης της δέσμης στο υλικό καθώς και η επαναληψιμότητα του αποτελέσματος, κάτι το οποίο είναι πολύ δύσκολο δεδομένου του δυναμικού χαρακτήρα της διεργασίας και της κατά την διεργασία κοπής με δέσμη Laser, η ποιότητα της κοπής μπορεί να καθοριστεί και να ποσοτικοποιηθεί με βάση διάφορα χαρακτηριστικά, όπως είναι η εναπόθεση τηγμένου υλικού (*dross attachment*), το μέγεθος της ζώνης θερμικής επιρροής (*Heat Affected Zone-HAZ*), τραχύτητα της επιφάνειας κοπής (*cutting edge surface roughness*), το μέγεθος (*kerf width*) και η κωνικότητα της τομής (*tapering*).

Είναι εύκολα κατανοητό, λοιπόν, ότι σε εφαρμογές όπως η κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτων, αεροσκαφών, πλοίων κτλ., η ποιότητα του προϊόντος της διεργασίας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο εξαιτίας της μεγάλης απαίτησης για ακρίβεια, αντοχή, μείωση των ατελειών, κτλ. Για αυτό τον λόγο ο έλεγχος της διεργασίας είναι πολύ σημαντικός προκειμένου να εξασφαλιστεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, τόσο από άποψη ποιότητας όσο και αποδοτικότητας, ειδικά όταν πληθώρας των παραμέτρων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Ένας άλλος τρόπος είναι η μέτρηση, ο χαρακτηρισμός και η συσχέτιση διαφόρων μεγεθών με την ίδια την διεργασία. Επίσης, η δυνατότητα εντοπισμού ατελειών που δημιουργούνται κατά την



διάρκεια της διεργασίας και η έγκυρη μεταβολή των παραμέτρων της,παίζουν σημαντικό ρόλο προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

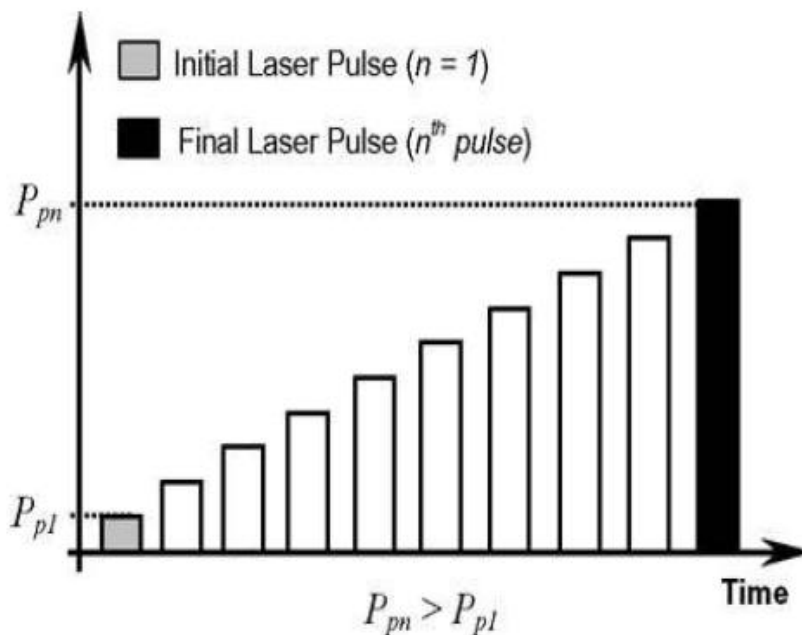
Αυτή η ανάγκη για αποτελεσματικό και άμεσο έλεγχο των διεργασιών έχει ωθήσει στην ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης (γίνεται αναφορά παρακάτω) του συστήματος κατεργασίας αλλά και της Ζώνης θερμικής επιρροής.

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν διάφορους αισθητήρες,ικανούς να μετρήσουν ανάλογες μεταβολές των παραμέτρων της διεργασίας αλλά και μεταβολές των σημάτων που λαμβάνονται κατά την διάρκεια της διεργασίας.Τα σήματα αυτά σχετίζονται με τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της διεργασίας και κατά συνέπεια με το αποτέλεσμα της,π.χ. βάθος κοπής,βάθος και διάμετρος διάτρησης,ατέλειες (π.χ. εμφάνιση πόρων,εναπόθεση τηγμένου υλικού),κτλ.

### 3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

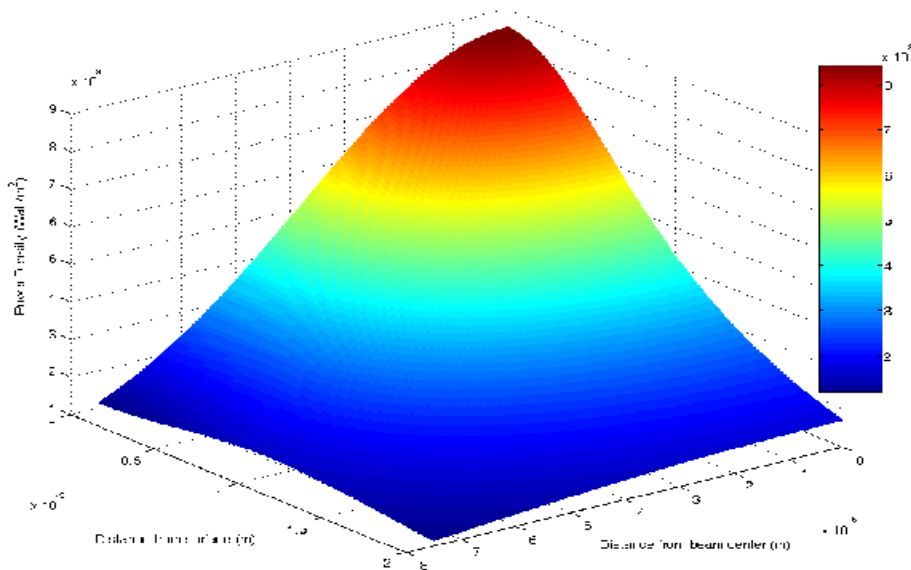
#### 3.1 ΙΣΧΥΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Η ισχύς της δέσμης αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην διεργασία διάτρησης, στο βάθος της διάτρησης και στην πρόκληση τήξης του υλικού. Μια από τις πρώτες μελέτες σχετικά με την μοντελοποίηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* που έχουν παρουσιαστεί [20], όπου με βάση την ισχύ της δέσμης και την ενεργειακή ισορροπία στην περιοχή κατεργασίας (*erosion front*) υπολογίζεται η κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού και στην συνέχεια το βάθος διάτρησης. Θεωρήθηκε ότι η διεργασία διάτρησης διαχωρίζεται σε δύο στάδια, το στάδιο θέρμανσης όπου η θερμοκρασία του υλικού αυξάνει έως το σημείο τήξης και το στάδιο διάτρησης όπου λαμβάνει χώρα η αφαίρεση του τηγμένου υλικού.



Σχήμα 3-1: Σχηματικό διάγραμμα αύξησης ισχύος κατά την διάτρηση.

Επίσης, ένα μονοδιάστατο αναλυτικό μοντέλο για την διερεύνηση του μέγιστου βάθους διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* παρουσιάστηκε από τους Salonitis et al[18], το οποίο λαμβάνει υπόψη τον απαιτούμενο χρόνο για την τήξη του υλικού, τον μηχανισμό τήξης καθώς και αφαίρεσης του υλικού όπως επίσης και την κρίσιμη τιμή πυκνότητας ισχύος ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βάθος διάτρησης δεν επηρεάζεται σημαντικά από την συχνότητα των παλμών αλλά εξαρτάται κυρίως από την ισχύ της δέσμης.



**Σχήμα 3-2:** Κατανομή πυκνότητας ισχύος TEM<sub>00</sub> (κατανομή Gauss).

Η κατανομή πυκνότητας ισχύος χαμηλότερης τάξης TEM<sub>00</sub> (TEM: Transverse Electromagnetic Modes) ή αλλιώς κατανομή Gauss περιγράφεται από την εξίσωση

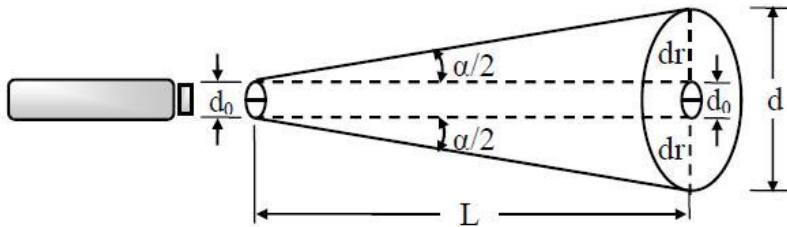
$$I = I_0 * e^{-\left(\frac{r^2}{R_f^2}\right)}$$

$I_0 = 2LP/R_{f0}^2$  είναι η μέγιστη πυκνότητα ισχύος της δέσμης στο κέντρο της ( $x=y=0$ ) στο εστιακό επίπεδο, LP είναι η συνολική παρεχόμενη ισχύς της δέσμης,  $R_{f0}$  είναι η διάμετρος της δέσμης στο εστιακό επίπεδο και  $R_f$  είναι η διάμετρος της δέσμης σε απόσταση z από την επιφάνεια του δοκιμίου

### 3.2 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Η διάμετρος της δέσμης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες σε αυτή τη διεργασία, με αυτό τον παράγοντα ρυθμίζουμε την μηχανή laser, την ισχύ, ακόμη μπορεί να επηρεάσει και τον σχεδιασμό του τεμαχίου. Ένα από τα διάφορα τύπου laser που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία είναι το laser

CO<sub>2</sub>, έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης και υψηλή ισχύ που μπορεί να είναι και έως 15 KW. Η αρχική δέσμη που παράγεται είναι διαμέτρου 13mm. Αυτή η δέσμη εστιάζεται μέσω συστημάτων φακών, σε κηλίδα διαμέτρου 0,2 mm με συνέπεια να έχει μεγάλη πυκνότητα ενέργειας έως  $10^9 \text{ W/cm}^2$ . Το φως που εκπέμπεται από ένα laser είναι περιορισμένο σε μια στενή δέσμη η οποία σταδιακά διευρύνεται (αποκλίνει) καθώς απομακρύνεται από την έξοδο του laser.



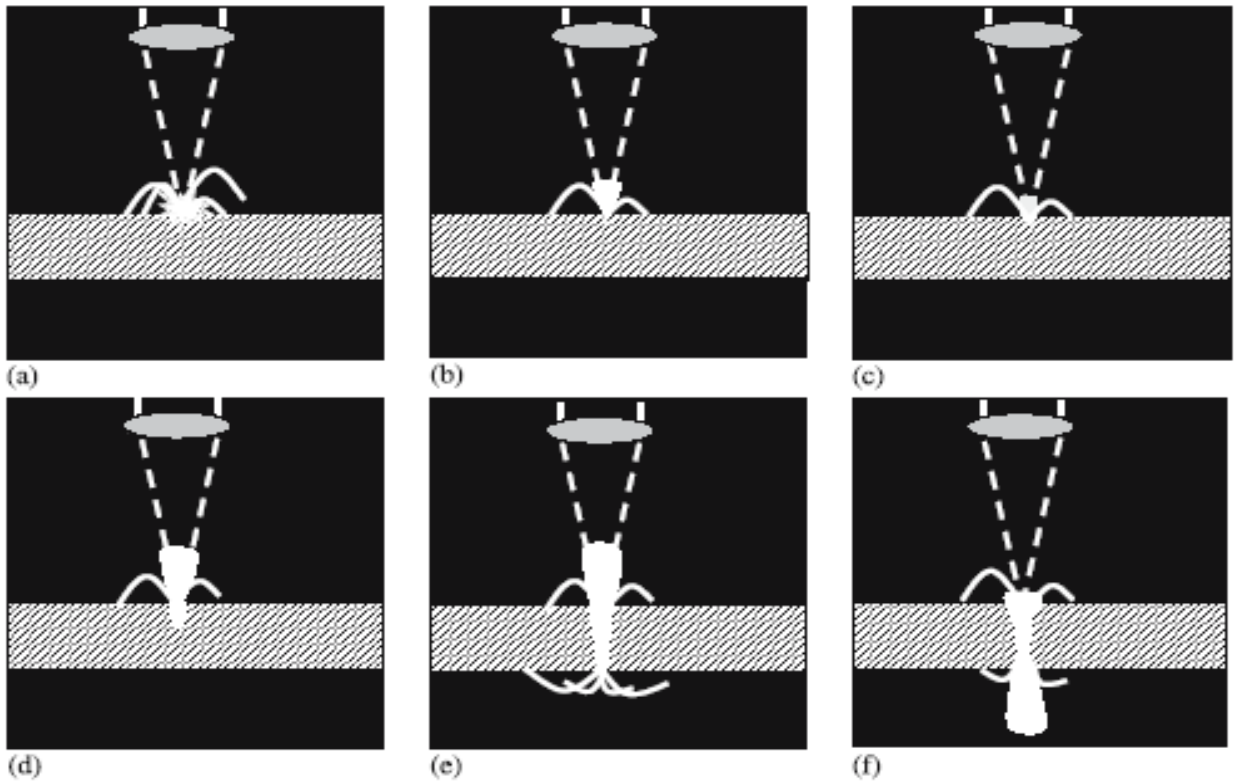
**Σχήμα 3-3:** Απόκλιση της δέσμης laser.

Αν θεωρήσουμε ως  $d_0$  τη διάμετρο της δέσμης κατά την έξοδο της από το Laser και  $d$  σε απόσταση  $L$ , τότε η **γωνία απόκλισης της δέσμης που είναι  $\alpha$**  υπολογίζεται από τη γεωμετρία του παραπάνω σχήματος :

$$\epsilon\phi(\alpha/2) = dr/L \text{ όμως για μικρές γωνίες } \alpha/2 = dr/L$$

$$\text{όπου } dr = d - d_0$$

$dr = (d - d_0)/2$  και επομένως  $\alpha = d - d_0 / L = d^* / L$  (**mrad**) (ολική γωνία απόκλισης). Μια τυπική τιμή της γωνίας απόκλισης  $\alpha$  για Laser He-Ne είναι  $\alpha = 1.5 \text{ mrad}$ .



**Σχήμα 3-4:** Σχηματική αναπαράσταση του πλάσματος για τα διάφορα στάδια της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser σταθερής διαμέτρου, κράματος SUPERel

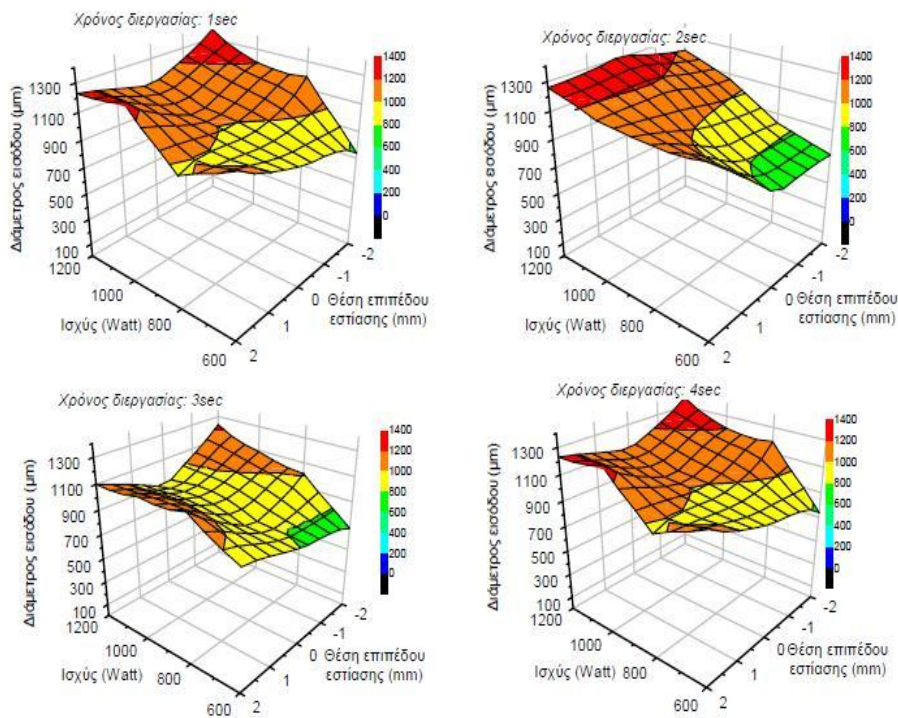
Η διάμετρος της δέσμης εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων όπως η ισχύ της δέσμης, ο τύπος του laser, το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα και προσδιορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$R_f = R_{f0} \left[ 1 + \left( M^2 \frac{\lambda (z + \delta_f)}{\pi * R_{f0}^2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

όπου  $M^2$  είναι ο συντελεστής ποιότητας της δέσμης,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της δέσμης και  $\delta_f$  είναι η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου.

## Διάμετρος εισόδου στο επεξεργαζόμενο δοκίμιο

Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή της διαμέτρου εισόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας για την περίπτωση διαμπερών οπών.



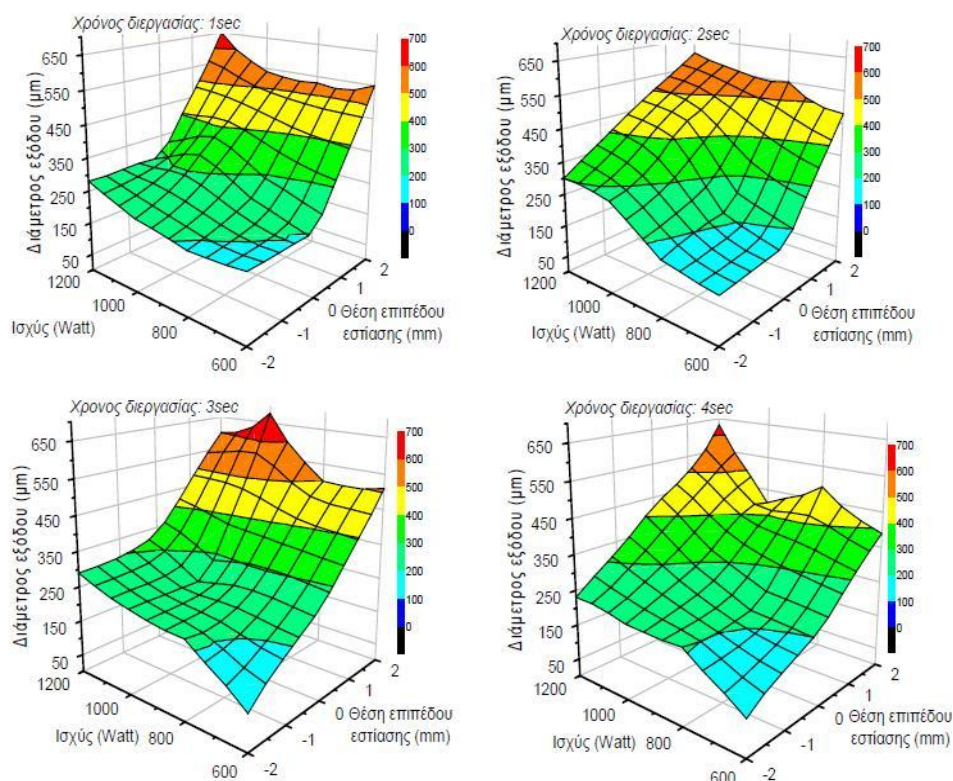
**Σχήμα 3-5:** Διάμετρος εισόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η διάμετρος εισόδου αυξάνει με την αύξηση της ισχύος, γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι μεγαλύτερη ισχύς έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας που επηρεάζεται θερμικά. Επίσης, παρατηρείται ότι για θέση του επιπέδου εστίασης στην επιφάνεια του δοκιμίου, η διάμετρος εισόδου έχει την μικρότερη τιμή, συγκρινόμενη με αυτές για θέσεις του επιπέδου εστίασης επάνω και κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δέσμη έχει την μικρότερη διάμετρο στο επίπεδο εστίασης και κατά συνέπεια όταν αυτό τοποθετείται στην επιφάνεια του δοκιμίου έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της διαμέτρου εισόδου.

Επίσης, παρατηρείται, όπως και στην περίπτωση της διαμέτρου εισόδου των τυφλών οπών, ότι ο χρόνος δράσης της δέσμης έχει πολύ μικρή επίδραση. Όπως προαναφέρθηκε αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μορφή της ενεργειακής κατανομής της δέσμης και την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ισχύος της δέσμης ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού.

## Διάμετρος εξόδου στο επεξεργαζόμενο δοκίμιο

Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται αντίστοιχα η μεταβολή της διαμέτρου εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας για την περίπτωση διαμπερών οπών.



**Σχήμα 3-6:** Διάμετρος εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

Και σε αυτή την περίπτωση, η διάμετρος εξόδου αυξάνει με την αύξηση της ισχύος εξαιτίας της μεγαλύτερης θερμικά επηρεαζόμενης περιοχής. Επίσης, παρατηρείται ότι η διάμετρος εξόδου αυξάνει καθώς η θέση του επιπέδου εστίασης μεταβαίνει από αρνητικές σε θετικές τιμές, γεγονός που οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνει η διάμετρος της δέσμης που αντιστοιχεί στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Και σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος δράσης της δέσμης δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της διαμέτρου εξόδου της οπής.

### 3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Όλα τα υλικά που δέχονται επεξεργασία με δέσμη laser έχουν κάποιες ιδιότητες που επηρεάζουν την κατεργασία. Οι φυσικές ιδιότητες όπως ανακλαστικότητα της επιφάνειας, πυκνότητα, ειδική θερμότητα και σημείο βρασμού, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Η ανακλαστικότητα της επιφάνειας καθορίζει το μέρος της ενέργειας του laser που μπορεί να απορροφηθεί από το υλικό και επομένως επιδρά στην ποσότητα του υλικού που ατμοποιείται. Μελέτες έχουν δείξει πως αν η ενέργεια βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, η δέσμη του laser αλληλεπιδρά με το υλικό ακόμη και αν η ανακλαστικότητα είναι πολύ έντονη. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την διάρκεια του παλμού του laser, η ενέργεια προκαλεί απότομη θέρμανση του υλικού, με αποτέλεσμα την αλλαγή φάσης του και την μείωση της ανακλαστικότητας.

Είναι επίσης χρήσιμο να αναφερθεί η σχέση που υπάρχει μεταξύ ανακλαστικότητας και πόλωσης. Η τιμή της ανακλαστικότητας είναι συναρτήση του προσανατολισμού του ηλεκτρικού πεδίου της δέσμης laser σχετικά με το επίπεδο πρόσπτωσης. Για μια δέσμη π.χ. S-πόλωσης (σε αυτή τη δέσμη το επίπεδο πόλωσης είναι ορθογώνιο προς το επίπεδο πρόσπτωσης του υλικού), η ανακλαστικότητα είναι πάντοτε υψηλή, οποιαδήποτε και να είναι η γωνία πρόσπτωσης. Όταν η πόλωση είναι τύπου P (παράλληλη προς το επίπεδο πρόσπτωσης), η ανακλαστικότητα μειώνεται εφόσον η γωνία πρόσπτωσης αυξάνει. Σε τέτοιου είδους συνθήκες, η σχέση δέσμης και υλικού ισχυροποιείται, δηλαδή η απορρόφηση της ακτινοβολίας αυξάνει. Το φαινόμενο αυτό έχει σημαντικές συνέπειες για την διάτρηση αλλά και για την υπόλοιπη οικογένεια κατεργασιών με laser επειδή η αποτελεσματικότητα του εξαρτάται από την σχετική θέση της διεύθυνσης της πόλωσης και αυτής της μετακίνησης του υπό κατεργασία υλικού εάν υπάρχει. Την σημαντική αυτή ιδιότητα εκμεταλλεύονται κυρίως οι διατάξεις με κοπή υλικών, για τα οποία η χρησιμοποίηση δέσμης laser P-πόλωσης παράλληλης προς την διεύθυνση επεξεργασίας, αυξάνει την ταχύτητα εργασίας καθώς και την ποιότητα του υλικού.

Γενικά η επεξεργασία των μεταλλικών υλικών συνίσταται στον έλεγχο της διαδικασίας αποκατάστασης μιας θερμικής ισορροπίας όταν κάποιο τμήμα του υλικού υφίσταται την επίδραση μιας θερμής πηγής. Στη διάτρηση παράδειγμα η τηγμένη ζώνη η οποία προκλήθηκε από ακτινοβολία laser εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο διαχέεται η θερμότητα μέσα στο υλικό.

Ένα nanasecond laser καθώς ακτινοβολεί την επιφάνεια του υλικού, προκαλεί την εξάτμιση του υλικού. Η ποσότητα του που εξατμίζεται εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες του υλικού (αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα, σημείο βρασμού). Για χαμηλές πυκνότητες ισχύος του laser, η θερμική αγωγιμότητα αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο για την εξάτμιση του υλικού. Αν το υλικό έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, η θερμότητα που απορροφάται από την δέσμη του laser, άγεται γρήγορα και μακριά με αποτέλεσμα ένα μικρό σχετικά μέρος του υλικού να εξατμίζεται [20].

#### Απορρόφηση

Τα άτομα μπορούν να αλληλεπιδρούν με το φως με τρεις τρόπους: απορρόφηση, αυθόρμητη εκπομπή, εξαναγκασμένη εκπομπή.

Ένα άτομο μπορεί ν'απορροφήσει ένα φωτόνιο και να μεταβεί από μια στάθμη χαμηλότερης ενέργειας  $E_1$  σε στάθμη υψηλότερης ενέργειας  $E_2$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7. Αυτό μπορεί να γίνει αν η ενέργεια που θα προσλάβει το άτομο κατά την αλληλεπίδρασή του με το φωτόνιο είναι:



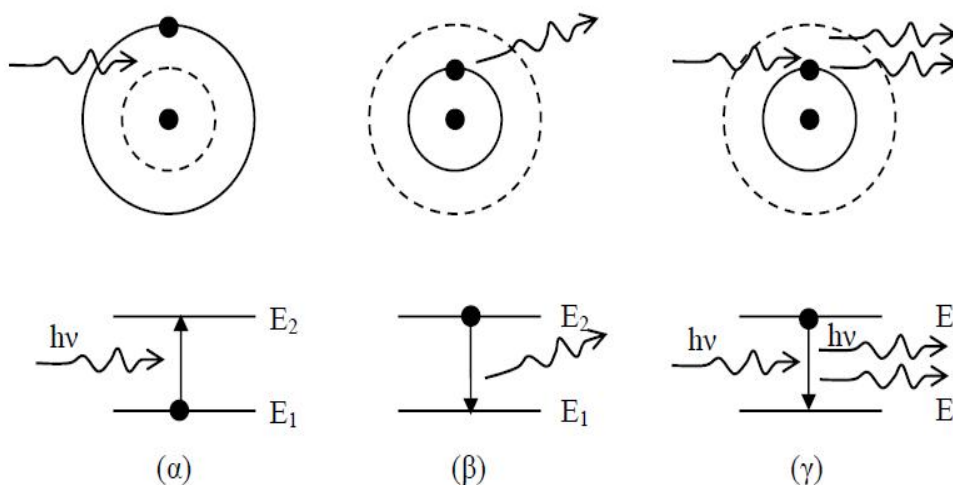
$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck και  $\nu$  η συχνότητα του φωτονίου.

Από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι το φωτόνιο θα πρέπει να έχει κατάλληλη συχνότητα ή μήκος κύματος για να προσδώσει στο άτομο την ενέργεια που χρειάζεται ώστε να διεγερθεί σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Αυτή η διαδικασία καλείται **εξαναγκασμένη απορρόφηση**.

### Αυθόρμητη εκπομπή

Το άτομο δεν θα παραμείνει σ' αυτή την κατάσταση (κατάσταση διεγερσης), αλλά θα επανέλθει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα στην προηγούμενη.



**Σχήμα 3-7:** (α) Εξαναγκασμένη απορρόφηση, (β) αυθόρμητη εκπομπή, (γ) εξαναγκασμένη εκπομπή (παραγωγή laser).

Αυτή η διαδικασία αποδιέγερσης, που συνοδεύεται από την αυθόρμητη εκπομπή (σε τυχαία διεύθυνση) ενός φωτονίου συχνότητας:

$$\nu = \Delta E/h$$

ή μήκους κύματος

$$\lambda = hc/\Delta E.$$

Στο Σχήμα 3-7β παρατηρούμε τη διαδικασία της αποδιέγερσης.

### Εξαναγκασμένη εκπομπή

Κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή, ένα προσπίπτον φωτόνιο  $h\nu = E_2 - E_1$ , προκαλεί αποδιέγερση του ατόμου (από την  $E_2$  στην  $E_1$ ). Από την αποδιέγερση αυτή του ατόμου παράγεται ένα ακόμη φωτόνιο ενέργειας  $E_2 - E_1$ , έτσι που τελικά έχουμε ταυτόχρονη εκπομπή δύο φωτονίων. Η εκπνευόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει την ίδια φάση με την προσπίπτουσα, έχει την ίδια φορά διεύθυνσης καθώς και το ίδιο

μήκος κύματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-γ. Η εξαναγκασμένη εκπομπή είναι η διαδικασία που εξασφαλίζει οπτική ενίσχυση στα περισσότερα Lasers, επειδή ακριβώς ένα προσπίπτον φωτόνιο προκαλεί την εκπομπή δυο φωτονίων που βρίσκονται στην ίδια φάση. Πως όμως μπορούμε πρακτικά να δημιουργήσουμε μια διάταξη οπτικής ενίσχυσης που βασίζεται στο παραπάνω φαινόμενο. Από το Σχήμα 3-7γ είναι φανερό ότι για να υπάρξει εξαναγκασμένη εκπομπή, θα πρέπει το προσπίπτον φωτόνιο να μην απορροφηθεί από άλλο άτομο στη στάθμη  $E_1$ . Όταν θεωρούμε μια σειρά από άτομα που παίρνουν μέρος στη διαδικασία ενίσχυσης του φωτός, θα πρέπει να έχουμε εξασφαλίσει την παρουσία των περισσότερων από αυτά στη στάθμη  $E_2$ . Σε αντίθετη περίπτωση το προσπίπτον φωτόνιο θ' απορροφηθεί από τα άτομα της στάθμης  $E_1$ . Το φαινόμενο όπου τα άτομα της στάθμης  $E_2$  είναι περισσότερα από τα άτομα της στάθμης  $E_1$ , καλείται **αντιστροφή πληθυσμών**. Είναι φανερό ότι με δυο μόνο ενεργειακές στάθμες δεν μπορούμε να έχουμε πληθυσμό ατόμων στη στάθμη  $E_2$  μεγαλύτερο από αυτόν της στάθμης  $E_1$ , γιατί σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας η προσπίπτουσα φωτεινή ακτινοβολία (ροή φωτονίων) θα προκαλέσει τόσες διεγέρσεις, όσες και εξαναγκασμένες αποδιεγέρσεις.

### 3.4 ΕΣΤΙΑΣΗ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Η εστίαση της ενεργειακής δέσμης βρίσκει εφαρμογή στην τεχνολογία των υλικών και συγκεκριμένα στην σκλήρυνση, την κραμάτωση, την ανόπτηση, την κοπή, την συγκόλληση, την διάτρηση και σε πλήθος άλλες επεξεργασίες. Η επιλογή της διαμέτρου της εστίασης της δέσμης εξαρτάται από τι ακριβώς θέλουμε να κάνουμε, τις συνθήκες περιβάλλοντος κ.λ.π.. Η δέσμη laser εστιάζεται από φακούς ή από σύστημα φακών των οποίων η εστιακή απόσταση κυμαίνεται από 25 έως 300 mm και με διάμετρο εργασίας από 10-20 ως 60 mm και άνω.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα το σήμα του εκπεμπόμενου πλάσματος είναι ανάλογο της ενέργειας της δέσμης του laser. Πολλές φορές το μέγεθος που ενδιαφέρει στα πειράματα είναι η πυκνότητα ισχύος (fluence) που προσπίπτει στο υλικό, η οποία είναι ανάλογη της ενέργειας του laser και δίνεται από τον τύπο:

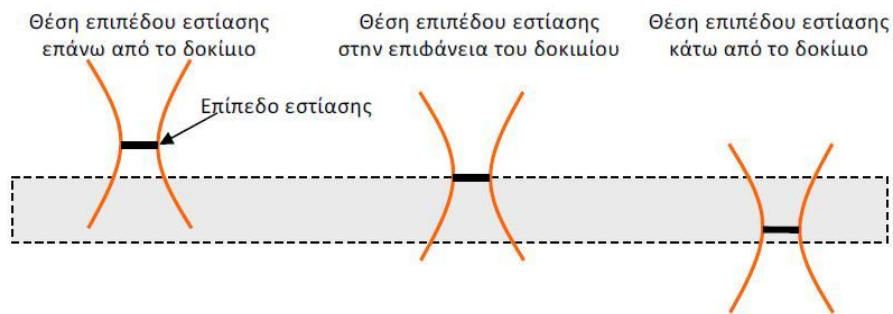
$$\frac{P}{S} = \frac{E_{laser}}{S \tau}, \quad (\text{W/cm}^2)$$

όπου  $\tau$  ο χρόνος διάρκειας του παλμού (s),  $E_{laser}$  η ενέργεια του παλμού (J) και  $S$  το εμβαδόν της δέσμης όταν έχει εστιαστεί πάνω στο δείγμα. Παρατηρείται ότι όσο πιο μικρό είναι το εμβαδόν της εστιασμένης δέσμης τόσο αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος. Για μία Gaussian δέσμη laser, η διάμετρος της εστιασμένης δέσμης δίνεται από τον τύπο:

$$w_0 = \frac{\lambda f}{\pi D}$$

όπου  $D$  η ακτίνα της μη εστιασμένης δέσμης,  $f$  η εστιακή απόσταση του φακού και  $\lambda$  το μήκος κύματος του laser.

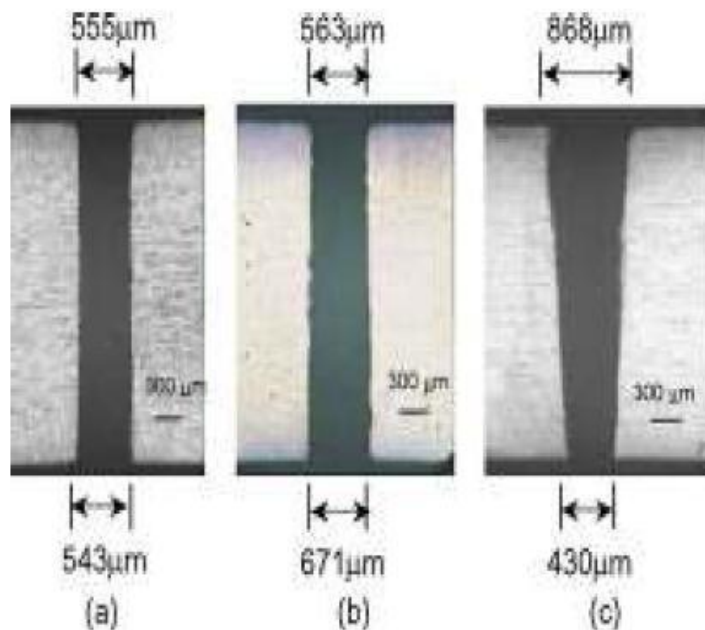
Μετρώντας την ισχύ της ακτινοβολίας για δύο διαφορετικά μήκη κύματος (ορατή και υπέρυθρη) από την διαφορά των δύο σημάτων, προσδιορίζεται η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του κατεργαζόμενου υλικού και κατά συνέπεια μπορούν να πραγματοποιηθούν ενέργειες διόρθωσης της θέσης του επιπέδου εστίασης [19].



**Σχήμα 3-8:** Θέσεις επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου.

### 3.5 ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

Ένας από τους κύριους στόχους κατά την διάτρηση με δέσμη Laser είναι η παραλληλότητα της οπής, δηλαδή η μείωση της κωνικότητας η οποία σχηματίζεται κυρίως εξαιτίας της μεταβολή της διαμέτρου της δέσμης συναρτήσει της απόστασης από το επίπεδο εστίασης (που έχει ως συνέπεια την μεταβολή της πυκνότητας ισχύος) αλλά και εξαιτίας της ροής τους βοηθητικού αερίου και του μηχανισμού αφαίρεσης τους τήγματος από την κοιλότητα της οπής.



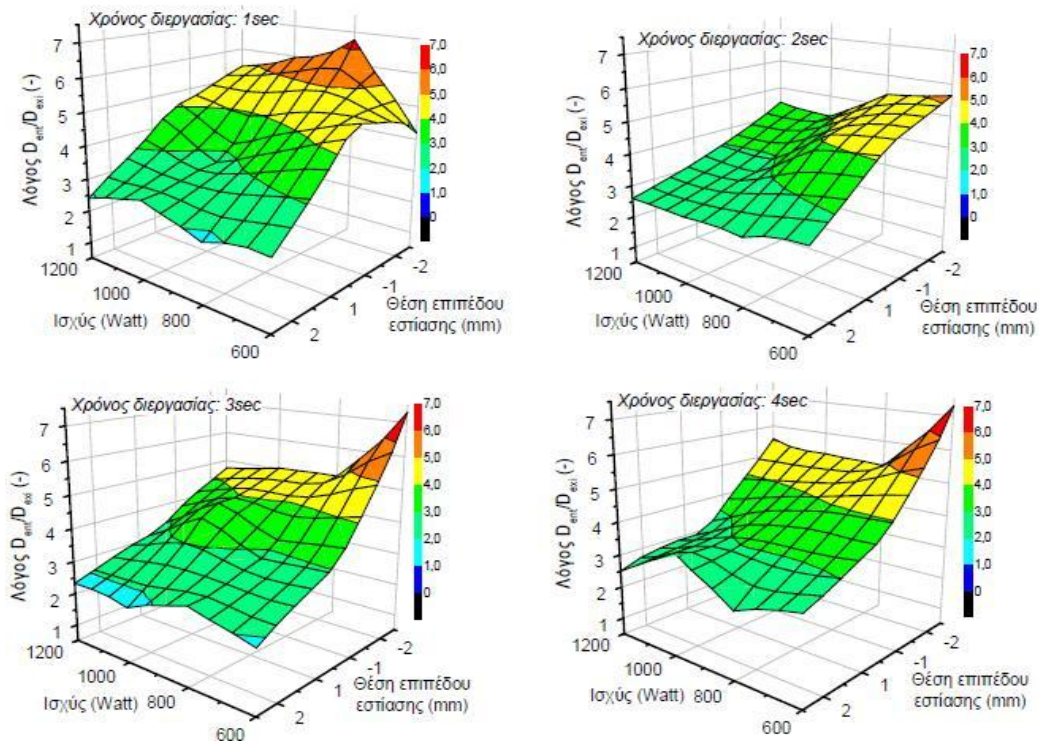
**Σχήμα 3-9:** Εφαρμογές διαφορετικής κωνικότητας.

Ένας τρόπος για την μείωση της κωνικότητας είναι η δημιουργία οπών χρησιμοποιώντας την τεχνική της διάτρησης με κοπή (*trepanning drilling*). Αλλά αυτή η τεχνική είναι πολύ πιο αργή σε σχέση με την κρουστική διάτρηση και χρησιμοποιείται για οπές αρκετά μεγάλης διαμέτρου[9].

Είναι φανερό ότι στόχος κατά την διάτρηση με δέσμη Laser, εκτός της επίτευξης της επιθυμητής διαμέτρου, είναι η διατήρηση της κωνικότητας σε όσο το δυνατόν πιο χαμηλά επίπεδα, δηλαδή η δημιουργία οπών με ισοδύναμες διαμέτρους εισόδου και εξόδου.

Ένα μέτρο της κωνικότητας είναι ο λόγος της διαμέτρου εισόδου προς την διάμετρο εξόδου (*Dent. / Dexi.*). Όσο αυτός ο λόγος πλησιάζει την μονάδα, τόσο μικρότερη είναι η κωνικότητα καθώς η διάμετρος εισόδου και εξόδου τείνουν να γίνουν ίσες. Επίσης, ο λόγος των δύο διαμέτρων είναι ένα πιο γενικευμένο μέτρο της κωνικότητας σε σχέση με την γωνία κωνικότητας καθώς η τελευταία εξαρτάται τόσο από τις διαμέτρους, όσο και από το πάχος του υλικού. Για αυτό τον λόγο, στην παρούσα εργασία ως μέτρο αξιολόγησης της κωνικότητας των διαμπερών οπών χρησιμοποιήθηκε ο λόγος των διαμέτρων.

Στα γραφήματα που ακολουθούν, απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου των διαμέτρων συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας. Σχετικά με τη κωνικότητα της οπής, παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές κωνικότητας, δηλαδή μεγάλος λόγος διαμέτρου εισόδου προς διάμετρο εξόδου, εμφανίζονται με το συνδυασμό του αρνητικού επιπέδου εστίασης και της υψηλής ισχύος (Stournaras et al). Όπως έχει αναφερθεί, με χρήση αρνητικού επιπέδου εστίασης μειώνεται η διάμετρος της δέσμης που αντιστοιχεί στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και με ταυτόχρονη αύξηση ισχύος αυξάνεται η διάμετρος εισόδου της οπής σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι αυξάνεται η διάμετρος εξόδου. Η μικρότερη κωνικότητα παρατηρείται για θετικές τιμές της θέσης του επιπέδου εστίασης καθώς η διάμετρος εξόδου αυξάνει σημαντικά σε σχέση με την διάμετρο εισόδου.



**Σχήμα 3-10:** Αναλογία διαμέτρων εισόδου και εξόδου συναρτήσεσι των παραμέτρων της διεργασίας.

Μικρή κωνικότητα παρουσιάζουν επίσης ο συνδυασμός μικρής τιμής ισχύος και αρνητικού επιπέδου εστίασης, διότι σε αυτές τις συνθήκες είναι μικρότερη η διάμετρος εισόδου και μεγαλύτερη η διάμετρος εξόδου της οπής, όπως εξηγήθηκε προηγούμενα.

### 3.6 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ

Εντός των τελευταίων 10 ετών, η κατεργασία με την βοήθεια laser θεωρείται μια υποσχόμενη μέθοδος που μπορεί να επιτύχει υψηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού και επιθυμητή ποιότητα επιφάνειας στις κατεργασίες διάφορων υλικών. Χρησιμοποιεί αρχικά την ενέργεια του laser, για να θερμάνει την κατεργαζόμενη περιοχή, (χωρίς απαραίτητως να λιώνει ή να ατμοποιεί την περιοχή), πριν από την αφαίρεση υλικού. Δεν είναι αποδοτική, μόνο για το γεγονός ότι μειώνεται ο χρόνος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, αλλά επίσης βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Η έντονη, σημειακή θερμότητα της δέσμης του laser παρέχει μια εξαιρετικά αποδοτική μέθοδο για την αύξηση της θερμοκρασίας του τεμαχίου, ακριβώς μπροστά από την κατεργαζόμενη περιοχή. Μέσω αυτού του είδους την θέρμανση, η δέσμη laser μπορεί να μετατρέψει την συμπεριφορά παραμόρφωσης του (π.χ. για κεραμικά υλικά) από ψαθυρή σε εύπλαστη, πριν την αφαίρεση του υλικού. Επίσης, μειώνει την αναπτυσσόμενη δύναμη, σε τιμές κάτω από την δύναμη θραύσης και εξαλείφει

επιπλέον την τήξη ή την εξάχνωση της κατεργαζόμενης επιφάνειας και την καταστροφή των υποστρωμάτων [Μάμαλης Α.Μ. Κατεργασίες Υλικών].

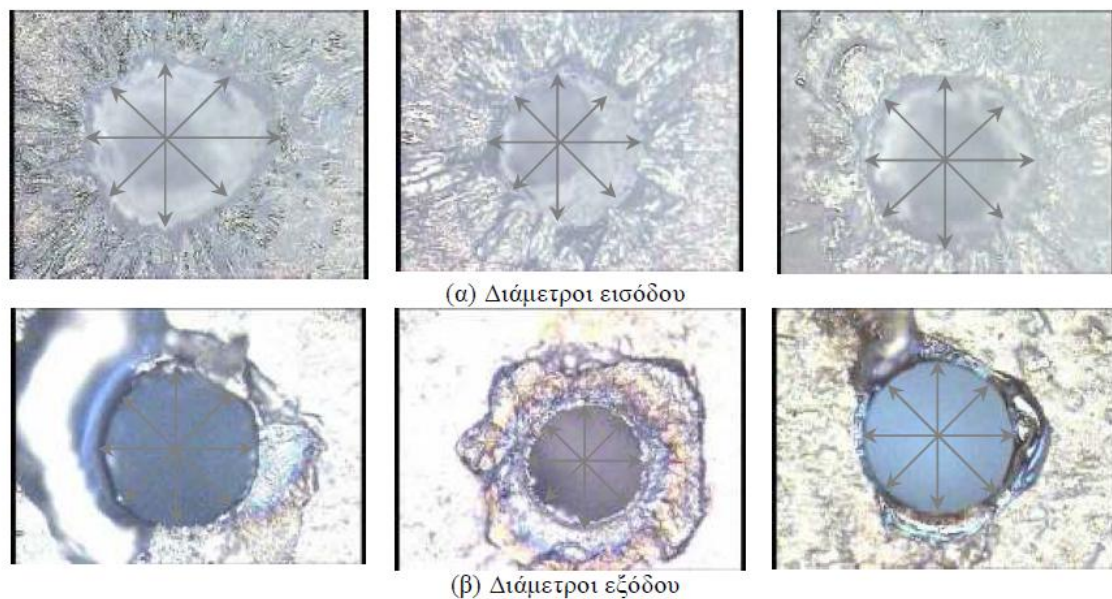
Η γενικότερη φιλοσοφία της κατεργασίας, είναι η εξής: η δέσμη laser εφαρμόζεται είτε κατακόρυφα, είτε υπό γωνία, στην περιοχή ακριβώς μπροστά από το υλικό. Η επίδραση της δέσμης σε μηδενικό σχεδόν χρόνο προετοιμάζει αρχικά κατά κάποιο τρόπο το δοκίμιο, βελτιώνοντας την κατεργασιμότητα του (την τήξη και διάτρηση). Το τελικό αποτέλεσμα μας παρέχει ένα λιγότερο καταπονημένο θερμικά τεμάχιο με καλύτερη ποιότητα επιφανείας, σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει διάφορα υλικά όπως είναι τα μέταλλα, τα πλαστικά σύνθετα υλικά, τα προηγμένα κεραμικά σε θερμικά υποβοηθούμενες κατεργασίες. Για παράδειγμα, ο Corpley, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αντοχή του νιτρίδιου του πυριτίου μετά την κατεργασία με laser είναι περίπου κατά 30% μεγαλύτερη απ' ό,τι κατά την συμβατική λείανση με διαμάντι [Μάμαλης Α.Μ. Κατεργασίες Υλικών]. Ο ίδιος πρότεινε την εφαρμογή της διαγώνιας δέσμης laser για την θέρμανση του υλικού, παράλληλα, ενώ το κοπτικό εργαλείο αφαιρεί υλικό στον τόρνο. Η παραπάνω μέθοδος, πράγματι αύξησε τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού και τον χρόνο ζωής του εργαλείου, όμως αρχικά θεωρείτο ότι ήταν κατάλληλη μόνο για μεταλλικά υλικά.

Ο Uehara και ο Takeshita, [23], σε μια έρευνα για νέες τεχνικές κοπής, χρησιμοποίησαν κατεργασία εν θερμώ για την κοπή μουλίτη και νιτρίδιο του πυριτίου. Πάντως, η πρώτη επιτυχής χρήση της κατεργασίας κεραμικών με την βοήθεια laser έγινε από τον Konig, ο οποίος παρατήρησε το συνεχές θρυμματισμα του νιτρίδιου του πυριτίου όταν η θερμοκρασία του υπερβαίνει τους 1200°C. Ο Konig και ο Zaboklicki, εφάρμοσαν την KBL για κατεργασία σε τόρνο και σε φρέζα και ανέφεραν χαμηλή δύναμη κοπής, μικρή φθορά του εργαλείου και υψηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού, καθώς και τιμές επιφανειακής σκληρότητας Ra μικρότερες από 0,5 μm. Πάντως, με το να μην μελετήσουν τους μηχανισμούς αφαίρεσης υλικού και την καταστροφή των υποστρωμάτων, με το παραπάνω πείραμα, αμέλησαν σημαντικές παραμέτρους της συγκεκριμένης διαδικασίας, όπως τις επιρροές της ενέργειας του laser στη συνολική θερμοκρασία του τεμαχίου και την επίδραση της θερμοκρασίας στην φθορά του εργαλείου.

Ο Χρυσσολούρης [18], εξέτασε την εφαρμογή της KBL στα μέταλλα, θερμαίνοντας την κατεργαζόμενη επιφάνεια με συνεχή ακτινοβολία laser πριν την αφαίρεση υλικού με κοπτικό εργαλείο. Σε αυτό το πείραμα παρατηρήθηκε μείωση στην φθορά του εργαλείου με μείωση κόστους της τάξης του 60-80%, σε σχέση με την συμβατική κατεργασία λείανσης. Επιπλέον, το τρισδιάστατο θερμικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Rozzi, [22], προέβλεψε με ακρίβεια τα θερμοκρασιακά πεδία της KBL του N3S4. Το μοντέλο αυτό εξήγησε την επιρροή των παραμέτρων κατεργασίας στις θερμικές συνθήκες εντός του τεμαχίου αποκαλύπτοντας ότι η παραγωγή της θερμικής ενέργειας στην εξωτερική ζώνη κατεργασίας έχει σημαντική επίδραση στην κατανομή της θερμότητας στο εσωτερικό του τεμαχίου. Την ίδια χρονιά, ο Rozzi διεξήγαγε μια μελέτη ως προς την ενέργεια που απαιτείται για μια επιτυχημένη κατεργασία. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδωσαν επιφανειακή σκληρότητα Ra = 0,39 μm, για το νιτρίδιο του πυριτίου. Σε μια επιπλέον μελέτη της κατεργασμένης επιφάνειας, δεν παρατηρήθηκαν ούτε ρωγματώσεις στο υπόστρωμα, ούτε σημαντικές αλλαγές στην μικροδομή. Σε σχέση με την λείανση, το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της KBL είναι η ικανότητα να επιτύχει πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού με πολύ καλή ποιότητα επιφανείας και λογικά επίπεδα φθοράς του εργαλείου. Όσον αφορά στην θερμοκρασιακή προσομοίωση, ένα αριθμητικό μοντέλο μέτρησης της θερμοκρασίας μπορεί να καθορίσει την δημιουργία ή όχι ρωγμών.

Σχετικά με την φθορά και τον χρόνο ζωής του εργαλείου,ο Pfefferkorn ανακάλυψε την χρήση της KBL για την μερικώς σταθεροποιημένη ζirkονία (PSZ),για να καθορίσει την επίδραση της θερμότητας σε παράμετρους όπως η φθορά του εργαλείου,η ενέργεια κοπής,η επιφανειακή τραχύτητα και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού.Τα αποτελέσματα του έδειξαν ότι η PSZ μπορεί να κατεργασθεί επιτυχώς με κοπτικό εργαλείο από πολυκρυσταλλικό νιτρίδιο του βορίου και η ζωή του εργαλείου αυξάνεται,με θερμοκρασίες έως και 1210oC.Ο Taguchi καθορίζοντας τις βέλτιστες παραμέτρους για την κατεργασία σε τόρνο, εξέλιξε ένα σύστημα υψηλής ποιότητας που παρέχει απλή,αποδοτική και συστηματική προσέγγιση στην βελτιστοποίηση της εφαρμογής,της ποιότητας και του κόστους της KBL [Μάμαλης Α.Μ. Κατεργασίες Υλικών].



**Σχήμα 3-11:** Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου επιφανειών (α) εισόδου και (β) εξόδου διαμπερών οπών.

Εξαιτίας της επαναδιευθέτησης της κρυσταλλικής δομής η οποία προκαλείται από τις υψηλές θερμοκρασίες που συνοδεύουν την δύναμη του laser,το υλικό μετετρέπεται από ψαθυρό σε εύπλαστο.Όταν η επιφανειακή θερμοκρασία του τεμαχίου υπερβεί ένα κρίσιμο όριο,η σκληρότητα του μειώνεται ραγδαία και η αντίσταση του στην κοπή γίνεται μικρότερη.Επομένως,η δύναμη κοπής επίσης μειώνεται,και η συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρουσιάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα ως προς την κατεργασία.Είναι φανερό ότι οι δυνάμεις κοπής έχουν μειωθεί περίπου κατά 10N με την επίδραση του laser,σε σχέση με την συμβατική κοπή.Επιπλέον,οι τιμές της δύναμης κοπής είναι σχεδόν σταθερές,υποδηλώνοντας ότι και η θερμοκρασία παραμένει σταθερή.Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι,με μια κατάλληλη διαδικασία προθέρμανσης και με τις κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας,μπορούμε να επιτύχουμε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία κοπής.

### 3.7 ΖΩΝΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ

Κατά την διεργασία διάτρησης ένα μέρος από την προσπίπτουσα δέσμη σε ένα υλικό ανακλάται, ένα άλλο μέρος της απορροφάται σ' ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα. Η ενέργεια που έχει απορροφηθεί αρχίζει να ανεβάζει την θερμοκρασία της επιφάνειας, προκαλώντας την τήξη ή και την ατμοποίηση του υλικού, αυτό βέβαια εξαρτάται από τις συνθήκες που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο. Μετά από ένα ορισμένο χρόνο απορρόφησης, η ενεργειακή ροή δημιουργεί τοπικές θερμικές πηγές, που είναι κατανομημένες σε χρόνο και σε χώρο στην επιφάνεια ή στον κύριο όγκο του υλικού.

Ας εξετάσουμε πως γίνεται η αλληλοσυσχέτιση της ενέργειας μεταξύ της δέσμης (laser) και του υλικού. Η ενέργεια που απορροφάται υπόκειται σε συγκρούσεις με τα ηλεκτρόνια, με τον πυρήνα των ατόμων, όπως επίσης και με τις κρυσταλλικές ατέλειες του στερεού. Οι συγκρούσεις προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας των ηλεκτρονίων, η θερμοκρασία όμως του κρυσταλλικού πλέγματος παραμένει για κάποιο χρόνο σταθερή, αυτό εξηγείται με την διαφορά μάζας που υπάρχει μεταξύ των ηλεκτρονίων και των ιόντων. Εκτιμάται ότι απαιτείται περίπου  $10^{-13}$ - $10^{-14}$ s για να εξισορροπηθεί η θερμοκρασία μεταξύ των ηλεκτρονίων και των ιόντων. Η μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρόνια στα ιόντα αντιστοιχεί στην αλληλοσυσχέτιση της ενέργειας μεταξύ ηλεκτρονίων και φωτονίων, η οποία τείνει να εξισορροπήσει την θερμοκρασία του ηλεκτρονιακού νέφους του κρυσταλλικού πλέγματος.

Αν έχουμε επεξεργασία υλικού με παλμούς δέσμης laser και ο παλμός έχει τριγωνική μορφή μπορούμε με την παρακάτω σχέση να υπολογίσουμε τη μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ηλεκτρονίων και του κρυσταλλικού πλέγματος:

$$T_e - T_i = 2q/a \quad (3-1)$$

Όπου  $T_e$  είναι η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων,  $T_i$  η θερμοκρασία του πλέγματος (ιόντων),  $q$  η ισχύς (ενεργειακή ροή),  $a$  ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας (ειδική θερμική αγωγιμότητα) από τα ηλεκτρόνια στο πλέγμα και  $t$  ο χρόνος διάρκειας παλμού. Στην επεξεργασία των υλικών με δέσμη laser η διάρκεια του παλμού συνήθως είναι μεγαλύτερη από  $10^{-9}$ s και η ισχύς γενικώς είναι μικρότερη από  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>. Είμαστε λοιπόν σε θέση να πούμε ότι, όσον αφορά την συγκεντρωμένη ενεργειακή ροή στην θέρμανση ενός υλικού για παλμό διάρκειας  $10^{-9}$ s και πυκνότητα ισχύος όχι μεγαλύτερη από  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>, έχουμε τους μηχανισμούς για την θερμική αγωγιμότητα, τόσο γραμμική ή μη γραμμική.

#### Κατανομή της ακτινοβολίας laser σ' ένα υλικό.

Η πυκνότητα κατανομής της ακτινοβολίας laser  $q$ , τόσο στην περίπτωση της παλμικής ακτινοβολίας όσο και σε εκείνη της συνεχούς, δεν είναι συνήθως σταθερή στο χρόνο, γενικώς μπορούμε να την εκφράσουμε με τη σχέση:

$$q = q(x, y, z, t) \quad (3-2)$$

όπου  $x, y$  και  $z$  είναι οι συντεταγμένες στο χώρο, και  $t$  είναι ο χρόνος.



Οι θερμικές πηγές που παράγονται από διάφορες συσκευές laser παρουσιάζουν πολύ διαφορετικές «χώρο-χρόνο» χαρακτηριστικές. Η ικανότητα διείσδυσης της δέσμης σ' ένα υλικό εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού και από το μήκος κύματος της δέσμης. Ο υπολογισμός του θερμικού πεδίου στο υλικό διευκολύνεται αν υποθέσουμε ότι η θερμική πηγή έχει ιδανικές χαρακτηριστικές, αυτό όμως μπορεί να μας οδηγήσει σε διαφορετικές εκτιμήσεις από εκείνες που προκύπτουν από τα πειραματικά αποτελέσματα. Η λύση του προβλήματος της θέρμανσης του υλικού απαιτεί μια γενική ανάλυση των συνθηκών της λειτουργίας του laser και την πειραματική εκτίμηση της χωρικής-χρονικής συμπεριφοράς της θερμικής πηγής, της δέσμης laser στην ουσία.

Στα αδιαφανή υλικά, όπως είναι τα περισσότερα μέταλλα και ένας μεγάλος αριθμός διηλεκτρικών υλικών, η απορρόφηση της ακτινοβολίας laser, λαμβάνει χώρα σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα. Για τα μέταλλα η απορρόφηση δεν ξεπερνά μερικά κλάσματα του μικρομέτρου, για ένα laser με μήκος κύματος 1 μm. Οπότε στις περισσότερες περιπτώσεις οι θερμικές πηγές μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι επίπεδες και κατανεμημένες πάνω στην θερμαινόμενη επιφάνεια.

### **Οι μηχανισμοί της αποκόλλησης με laser.**

Οι τρεις πιο σημαντικοί παράγοντες που ελέγχουν την διαδικασία αποκόλλησης με laser είναι :

- 5.1  $t_e$  – χρόνος ψύξης των ηλεκτρονίων
- 5.2  $t_i$  – χρόνος θέρμανσης του πλέγματος
- 5.3  $t_L$  – διάρκεια του παλμού του laser.

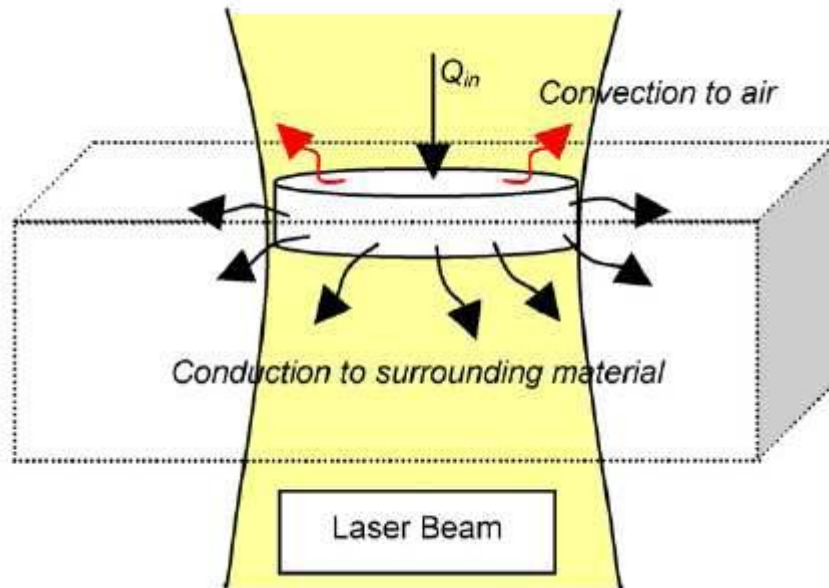
Κατά κανόνα  $t_e \ll t_i$  και για τα περισσότερα υλικά ο χρόνος  $t_i$  είναι της τάξης των picosecond.

Υπάρχουν 3 διαφορετικά καθεστάτα ως προς την αποκόλληση, εξαρτώμενα από το μήκος παλμού του laser.

- παλμοί femtosecond όπου  $t_L < t_e < t_i$ ,
- παλμοί picosecond όπου  $t_e < t_L < t_i$ ,
- παλμοί nanosecond και μακρύτεροι όπου  $t_e < t_i < t_L$ .

Η απορροφούμενη ενέργεια λιώνει το υλικό και το θερμαίνει μέχρι τη θερμοκρασία ατμοποίησης, όμως υπάρχει μια σημαντική χρονική καθυστέρηση όπου το θερμικό κύμα μεταδίδεται μέσα στο υλικό. Η εξάτμιση συμβαίνει από το υγρό υλικό. Οι δευτερεύουσες παρενέργειες συμπεριλαμβάνουν μια ζώνη επίδρασης της θερμότητας, ένα στρώμα ανάπλασης, μικρορωγμές, επιφανειακή καταστροφή και θραύσματα από εκβαλλόμενο υλικό.

Επιπροσθέτως, το ατμοποιημένο υλικό δημιουργεί ένα θερμό τήγμα το οποίο απορροφά και αντανάκλα την παλμική ενέργεια και επομένως δημιουργούνται απαιτήσεις για υψηλότερη ακτινοβολία και μεγαλύτερη διείσδυση.



**Σχήμα 3-12:** Ενεργειακή ισορροπία στην περιοχή τήξης κατά την διάτρηση με παλμούς δέσμης laser.

### 3.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΕΛΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

Οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται όταν εκλέγουμε τις τιμές των παραμέτρων κατεργασίας είναι:

- σταθερότητα στη διαδικασία,
- καθορισμένη ακρίβεια διαστάσεων,
- αποδεκτή ποιότητα επιφανείας,
- λογικούς χρονικούς κύκλους.

Αρκετά πειράματα έχουν γίνει για να καθορίσουμε την επίδραση των παραμέτρων στο τελικό αποτέλεσμα. Αν και δεν παρέχουν μια συνολική εικόνα των διαφορετικών φαινομένων που αναμιγνύονται, για το λόγο ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων δεν μπορούν να εξετασθούν, τα παραπάνω πειράματα δίνουν μια ιδέα του πως οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα της κατεργασίας, διευκολύνοντας την ρύθμιση της διαδικασίας και μειώνοντας το ποσοστό των σφαλμάτων που οφείλονται σε λάθος ρυθμίσεις.

Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η πιο σημαντική παράμετρος της διαδικασίας όσον αφορά στο πάχος των στρωμάτων και στο ρυθμό αφαίρεσης υλικού, είναι το τρέχον ρεύμα στην λάμπα που παράγει την δέσμη του laser. Αυτό συμβαίνει, διότι η ένταση του ρεύματος στην λάμπα επηρεάζει άμεσα το εύρος και τη μέγιστη τιμή των παλμών του laser.

Η επίδραση της διάρκειας του παλμού επίσης σχετίζεται με τη μέγιστη τιμή του. Έχει παρατηρηθεί ότι για μακρότερους παλμούς ( $t_L > 4\mu s$ ), με μικρότερη μέγιστη τιμή, η ποιότητα επιφανείας ήταν φτωχή και υπήρχε μια διαφοροποίηση στο χρώμα

εξωτερικά. Αυτό σημαίνει πως πιθανότατα η χημική δομή να είχε αλλοιωθεί. Επιπροσθέτως, για μακρότερους παλμούς πάνω από 4μs, η διαδικασία παύει να είναι σταθερή με αποτέλεσμα μια μεγάλη διαφοροποίηση στο πάχος των στρωμάτων. Το εύρος της διάρκειας του παλμού βρέθηκε ότι πρέπει να είναι από 2 – 4 μs.

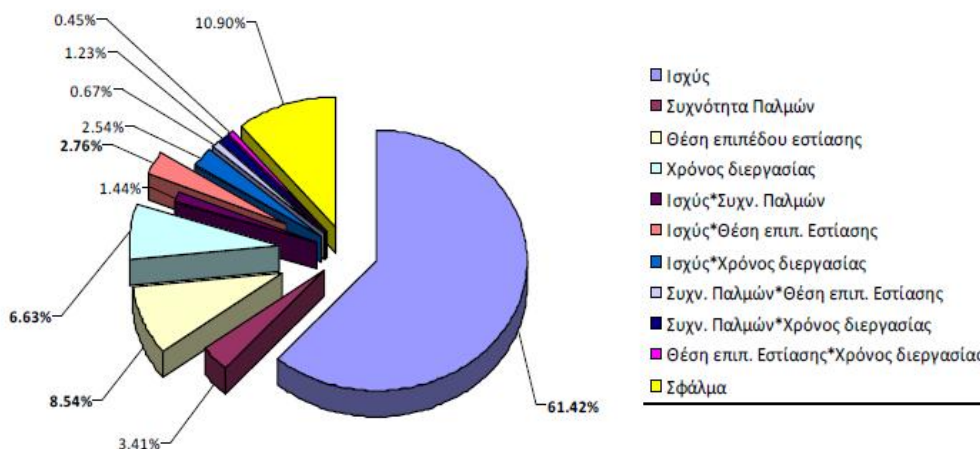
Γενικότερα, βραχύτεροι παλμοί προτιμούνται για τις κατεργασίες των μετάλλων αλλά και των κεραμικών υλικών, επειδή δίνουν υψηλότερες μέγιστες τιμές παλμών με τις άλλες παραμέτρους σταθερές.

Η συχνότητα του παλμού επιδρά κύρια στο τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας. Επηρεάζει άμεσα τον βαθμό επικάλυψης των κρατήρων που δημιουργούνται. Στις κατεργασίες των μετάλλων, οι χαμηλότερες συχνότητες του παλμού είναι πιο αποδοτικές, διότι η απαιτούμενη ενέργεια για την αφαίρεση του υλικού είναι υψηλότερη απ' ό,τι για άλλα υλικά.

Η εγκάρσια ταχύτητα σάρωσης της δέσμης επίσης επηρεάζει την επικάλυψη των κρατήρων. Όσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η επικάλυψη. Όσο αυξάνει η επικάλυψη, αυξάνει το βάθος κάθε στρώματος, διότι περισσότερο υλικό υπόκειται σε πολυπαλμική ακτινοβολία [12,14,15,17,21].

Από τα πειράματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι προκειμένου να επιτύχουμε μια σταθερή διαδικασία για τις κατεργασίες κεραμικών και μετάλλων, θα πρέπει να υιοθετήσουμε τα παρακάτω:

- μικρή διάρκεια παλμών ώστε να έχουμε υψηλότερη μέγιστη τιμή.
- χαμηλή συχνότητα για επαρκή παλμική ενέργεια.
- χαμηλή ταχύτητα σκαναρίσματος για καλύτερη ποιότητα επιφανείας.



**Σχήμα 3-13:** Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στο βάθος διάτρησης.

Γενικά, όσο χαμηλότερη η εγκάρσια ταχύτητα, τόσο καλύτερη η ποιότητα επιφανείας. Πάντως κάτω από ένα όριο ταχυτήτων, μπορεί να παρατηρηθεί το αντίθετο αποτέλεσμα—αύξηση της τραχύτητας με τη μείωση της ταχύτητας σκαναρίσματος. Θα πρέπει να τονισθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις όπως είναι μέταλλα με ειδικές προσμείξεις απαιτείται προκαταρκτική κατεργασία (αφαίρεση κάποιων αρχικών στρωμάτων), προκειμένου να διασφαλίσουμε την ομοιόμορφη απορρόφηση και την σταθερότητα της διαδικασίας.

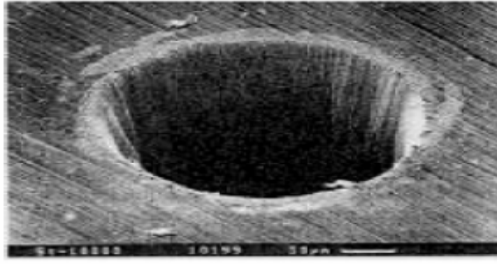
### 3.9 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ LASER

Η διάρκεια του παλμού του laser παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και στις τρεις καταστάσεις της ύλης, λόγω των διαφορετικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην αποδόμηση (ablation) του υλικού. Σε μια χρονική κλίμακα, η ακολουθία των γεγονότων που συμβαίνουν όταν η ακτινοβολία ενός laser προσπίπτει σε ένα στερεό υλικό, είναι η εξής: Το αέριο των ελεύθερων ηλεκτρονίων θερμαίνεται γρήγορα μέσω του φαινομένου Inverse Bremsstrahlung (IB) μέσα σε περίπου 100 femtoseconds. Η μεταφορά της ενέργειας των θερμών ηλεκτρονίων στο πλέγμα (lattice) και η επερχόμενη μείωση της θερμοκρασίας τους διαρκεί μερικά picoseconds. Η θερμική διάχυση στη μάζα του στερεού συμβαίνει σε μια χρονική κλίμακα περίπου των 10 picoseconds και το ξεκίνημα της τήξης και της αποδόμησης συμβαίνει μετά από περίπου 100 picoseconds [22].

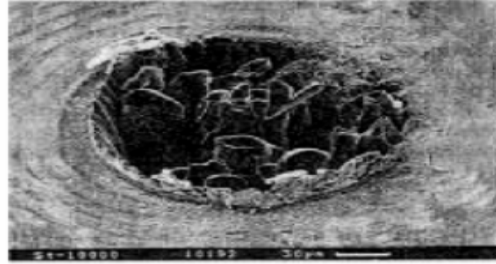
Σύμφωνα με τα παραπάνω ένας παλμός laser διάρκειας μεγαλύτερης από μερικά picoseconds δεν αλληλεπιδρά με το υλικό αποκλειστικά στην αρχική του θερμοδυναμική του κατάσταση, αλλά με διαφορετικές μεταβατικές καταστάσεις του όπως αυτό εξελίσσεται, καθώς και με το πλάσμα που έχει ήδη σχηματιστεί. Αντίθετα για παλμούς διάρκειας 100 femtoseconds ή και λιγότερο, το laser αλληλεπιδρά μόνο με το σύστημα των ηλεκτρονίων του υλικού και όχι με το πλάσμα, αφού ο παλμός έχει ολοκληρωθεί πριν το υλικό υποστεί αλλαγές στη θερμοδυναμική του κατάσταση, ενώ η ενέργεια εναποτίθεται σχεδόν όλη στο δείγμα.

Για femtoseconds παλμούς ο χρόνος αλληλεπίδρασης δέσμης-δείγμα είναι μικρότερος από τον χρόνο που χρειάζεται για να μειωθεί η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων και να μεταφερθεί θερμότητα στο δείγμα. Μετά το πέρας του παλμού, τα ηλεκτρόνια ψύχονται απότομα, λόγω της μεταφοράς της ενέργειας τους στο πλέγμα, που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πλάσματος. Στους picoseconds παλμούς επέρχεται κάποια μείωση της θερμοκρασίας των ηλεκτρονίων λόγω της μεταφοράς θερμότητας στο πλέγμα. Στους nanoseconds παλμούς η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων και του πλέγματος είναι ταυτόσημη λόγω της θερμικής αγωγιμότητας. Η ενέργεια που απορροφάται από την επιφάνεια του δείγματος έχει σαν αποτέλεσμα πρώτα την τήξη του υλικού και ύστερα την εξάτμιση του υγρού που έχει δημιουργηθεί. Η αλληλεπίδραση του παλμού με το αέριο, οδηγεί σε έντονη θέρμανση και ιονισμό του αερίου και στον σχηματισμό του πλάσματος.

Συγκρίνοντας την μορφή των κρατήρων που σχηματίζονται από femtoseconds, picoseconds και nanoseconds παλμούς, Σχήμα 3-14, διαπιστώνει κανείς ότι παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές, λόγω των διαφορετικών μηχανισμών εξαγωγής του υλικού. Έτσι ο κρατήρας που δημιουργείται από picosecond και nanosecond παλμούς (Σχήμα 3-14, a, b) περιέχει λιωμένο υλικό, ενώ στον κρατήρα που δημιουργείται από femtosecond δεν υπάρχει ίχνος λιωμένου υλικού. Κατά την αποδόμηση με παλμούς nanosecond και picosecond η εξαγωγή του υλικού γίνεται τόσο από την αέρια όσο και από την υγρή φάση. Αντίθετα η χρήση παλμών femtosecond μειώνει την σπατάλη θερμότητας των ηλεκτρονίων από τα άτομα του στερεού κι επομένως ελαχιστοποιεί την τήξη στην περιοχή του κρατήρα και την εξάτμιση της υγρής φάσης του υλικού [8].



(a)



(b)



(c)

**Σχήμα 3-14:** Εικόνες οπών πάνω σε λεπτό έλασμα ασάλι από laser 788nm διάρκειας παλμού: α) femtosecond, β) picoseconds, γ) nanosecond.

## 4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΥ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας μεγάλος αριθμός ερευνητικών μελετών μοντελοποίησης και βιομηχανικών εφαρμογών των διεργασιών αφαίρεσης υλικού με laser έχουν αναφερθεί από την αρχή της δεκαετίας του '60, οι πιο σημαντικές από τις οποίες συνοψίζονται παρακάτω.

### 4.2 ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER

Ο απλούστερος τρόπος μοντελοποίησης της διεργασίας διάτρησης με laser είναι με την ανάπτυξη ενός μονοδιάστατου μαθηματικού μοντέλου. Διάφορες μελέτες έχουν παρουσιάσει εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά της διάτρησης με laser όπως το βάθος των οπών, την ταχύτητα διάτρησης, την θερμοκρασιακή κατανομή κτλ. Για την περίπτωση των συνεχούς κύματος και παλμικών πηγών laser ένα τέτοιο μοντέλο αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη της γεωμετρίας της οπής στη μελέτη [17]. Η εξασθένηση της δέσμης laser μέσα στον μεταλλικό ατμό εξετάστηκε μέσω της εφαρμογής ενός μέσου συντελεστή απορρόφησης. Επιπλέον στην μελέτη [24] το προτεινόμενο μοντέλο μελετά την διαδικασία εξαχνωσης όταν το φαινόμενο βρίσκεται σε δυναμική ισορροπία, έτσι ώστε να προβλέψει το αναπτυσσόμενο θερμοκρασιακό πεδίο. Το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπ' όψη τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας με αγωγή και μεταφορά. Επίσης προβλέπονται η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται μέσα στο υλικό, και η αποτελεσματικότητα της διάτρησης. Η ταχύτητα διάτρησης έχει υπολογιστεί θεωρητικά στην μελέτη [19]. Η ακτινοβολία ενός μετάλλου με παλμικό laser με χρονική διάρκεια παλμού, τάξης μεγέθους μερικών nsec, μελετήθηκε αριθμητικά στην μελέτη [7]. Η μετάδοση θερμότητας στο στερεό υπόστρωμα και το τήγμα μοντελοποιήθηκε ως ένα μονοδιάστατο, χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα μετάδοσης θερμότητας με αγωγή, βασιζόμενο στην εφαρμογή της ενθαλπίας για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τα φαινόμενα αλλαγής φάσης. Μια πιο σύνθετη προσέγγιση στο πρόβλημα μετάδοσης θερμότητας στην διεργασία διάτρησης με laser αποτελεί η ανάπτυξη ενός διδιάστατου μοντέλου. Το θερμοκρασιακό πεδίο υπολογίζεται μέσω ενός τέτοιου μοντέλου στη μελέτη (19). Στη μελέτη [14] παρουσιάζεται μία αριθμητική επίλυση για την άμεση εκτίμηση του βάθους των οπών. Πιο σύνθετα μοντέλα έχουν παρουσιαστεί επίσης λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία τριών διαφορετικών φάσεων (στερεό, τήγμα και ατμός) [(5), (26)]. Η στρατηγική αριθμητικής προσομοίωσης και τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται από τον συγκεκριμένο τρόπο μοντελοποίησης παρουσιάζονται στη μελέτη [6]. Επιπλέον, ένα μοντέλο για την εκτίμηση του βάθους των οπών περιγράφεται στη μελέτη [2]. Η μορφή και το μέγεθος των οπών προβλέφθηκαν μέσω ενός μοντέλου ροής θερμότητας πεπερασμένων διαφορών. Στη μελέτη (15) παρουσιάζεται ένα υπολογιστικό μοντέλο για τη διάτρηση με δέσμη laser

που ακολουθεί κατανομή ισχύος Gauss. Στη μελέτη [21] παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό του ποσοστού αφαίρεσης από έναν παλμό laser. Στη μελέτη [11] υπολογίζεται η επίδραση του αερίου στη διεργασία διάτρησης, ενώ στη μελέτη [16] παρουσιάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο στην θεωρία της αντίστροφης επιβράδυνσης της ακτινοβολίας (Inverse Bremsstrahlung) ώστε να προβλεφθεί η απορρόφηση της δέσμης laser από το αναπτυσσόμενο πλάσμα. Η επίδραση του πλάσματος στην θερμοκρασία του τήγματος και στο ποσοστό εξάχνωσης του υλικού διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας την συνθήκη του Stefan στη διεπιφάνεια υγρού-ατμού. Η συμπεριφορά της δημιουργίας απόβλητου λόγω τήξης (spatter) κατά την διάρκεια της διάτρησης με laser ερευνάται για τις διάφορες παραμέτρους της διεργασίας στην μελέτη [12] και μια μέθοδος για τον περιορισμό της δημιουργίας αυτού του απόβλητου διερευνάται στην μελέτη [13], χρησιμοποιώντας μια ειδική επικάλυψη (A.S.S.C.) στο υπό επεξεργασία υλικό. Η ενέργεια laser που απορροφάται από ένα στερεό αυξάνεται καθώς διαμορφώνεται η κοιλότητα της οπής [10]. Στη μελέτη [25] διερευνάται η ποιότητα των οπών μέσω της μελέτης τεσσάρων παραμέτρων (μήκος παλμού, συνθήκες εστίασης, παρεχόμενη ενέργεια και πάχος κομματιού). Η τραχύτητα της επιφάνειας και η εσωτερική δυσμορφία της οπής ερευνώνται για την περίπτωση της διάτρησης μικρών διαμέτρων στην μελέτη [1], με πηγές laser CO<sub>2</sub> και Nd:YAG.

#### 4.3 ΤΥΠΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΑ ΔΕΣΜΗ LASER

Στο Πανεπιστήμιο Πατρών βρίσκεται στο Μηχανουργείο του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, μια μηχανή τύπου CNC κατεργασίας με δέσμη laser TRUMATIC TLF 2530 της εταιρείας TRUMPF<sup>2</sup>, τα κύρια χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στον Πίνακα 4-1.

Για να πραγματοποιηθεί μια κατεργασία σε αυτή την μηχανή είναι αναγκαίο να συνταχθεί κώδικας αριθμητικού ελέγχου (CNC) σε γλώσσα M και G. Ο κώδικας αποτελείται από δύο μέρη, το κυρίως πρόγραμμα (Main Program – MPDRILL1) και το υποπρόγραμμα (Sub-Program – SPDRILL1).

Το κυρίως πρόγραμμα περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την μηχανή, τις διαστάσεις του υλικού, τις συντεταγμένες του σημείου διάτρησης, και το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει εντολές για την έναρξη της διεργασίας, την διάρκεια της και τις τιμές των παραμέτρων.

Η αρχή λειτουργίας των μηχανών κατεργασίας με δέσμη laser για βιομηχανικές εφαρμογές είναι περίπου όμοια με την παραπάνω, διαφέρουν όμως από εταιρεία σε εταιρεία σε ότι αφορά θέματα κατασκευής και διεργασιών.

Χαρακτηριστικά μηχανής κατεργασίας με δέσμη Laser TRUMPF TRUMATIC TLF 2530	
Τύπος	Διοξειδίου του άνθρακα
Μήκος κύματος $\lambda$	10.6 $\mu\text{m}$
Διάμετρος δέσμης στο επίπεδο εστίασης $D_{f0}$ (για εστιακό φακό με μήκος εστίασης 5")	$\approx 0.16 \text{ mm}$
Ενεργός διάρκεια παλμού $t_{on}$ (χρόνος που η δέσμη είναι «ανοιχτή»)	10 $\mu\text{sec}$
Ισχύς εξόδου $LP$	100 – 1800 W
Σταθερότητα εξόδου	$\pm 2\%$
Συχνότητα παλμών $PF$	100 - 10000 Hz
Κατανομή ισχύος	$TEM_{00}$

**Πίνακας 4-1:** Χαρακτηριστικά μηχανής κατεργασίας με δέσμη Laser TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.



**Σχήμα 4-1:** Μηχανή κατεργασίας με δέσμη Laser TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.



```

DRILL1.txt - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
N10 MSG("MAIN PROGRAM NO.. MPDRILL1")
N20 MSG("TOPS100 V4.01 - L2530 - SIEMENS - TOPS 100 VERSION: 4.01 99/08/06")
N30 MSG("SHEET DIMENSIONS 2900.00X815.00X1177.00")
N40G71
N50F8400
N60;(FILENAME: C:\TRUMPF\TEILE\USER1\DRILL_1.LST)
N70;(TRANSFERNAME: DRILL_1.LST PROGRAMME RUNS:0)
N80;(MACHINE:L2530 TYPE:1)
N90;(CONTROL: SIN840D VERSIO;)
N110 TC_SHEET_TECH("SHL-1")BLECHLAGE
N120TC_SHEET_LOAD("SHL-1")
N130;GÖTOF ENTRY_LASER
N140;ENTRY_LASER:
N150;(PART NUMBER:1 CONCECUTIVE NUMBER:1)
N160G01 X2250 Y10
N170SP1DRILL1
N263TC_LASER_OFF(2)
N270M30

```

(α)

```

SP1DRILL1.txt - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
N10 MSG("SUB_PROGRAM NO.. SP1DRILL1")
N20G91
N30;(PART NUMBER:1)
N40TC_POS_LEVEL(115)
N50TC_LASER_ON(5."9120" 0.100);
N60G04 F8
N80TC_LASER_OFF(1);
N170G90
N130M17
N190M02

```

(β)

**Σχήμα 4-2:** (α) Κυρίως πρόγραμμα και (β) υποπρόγραμμα για τον προγραμματισμό διάτρησης με δέσμη Laser στην μηχανή κατεργασίας TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.

### Τρόπος λειτουργίας μηχανής laser

Στις μηχανές κατεργασίας με δέσμη laser, μπορούμε να κάνουμε πολλές διεργασίες όπως είναι η κοπή, η χάραξη και η διάτρηση. Για να γίνει μία ή περισσότερες διεργασίες για ένα τεμάχιο στην μηχανή πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω στάδια:

1) Γίνεται σχεδιασμός του τεμαχίου που θέλουμε σε κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα, συνήθως στο Autocad, όπου στο σχέδιο είναι εμφανείς όλες οι απαραίτητες διαστάσεις που χρειαζόμαστε.

2) Αν η μηχανή διαθέτει πρόγραμμα CAM, τότε το σχέδιο από τον υπολογιστή το στέλνουμε στην κεντρική μονάδα της μηχανής, αν δεν διαθέτει τέτοιο πρόγραμμα, τότε γίνεται αποθήκευση του σχεδίου σε δισκέτα σε μορφή αρχείου dxf και το περνάμε μέσω της δισκέτας στην κεντρική μονάδα της μηχανής.

3) Η συγκεκριμένη μηχανή διαβάζει αρχεία geo. Είναι προγραμματισμένη από την εταιρία κατασκευής της, να μετατρέπει αρχεία dxf σε geo (όπως οι περισσότερες

μηχανές laser), Φορτώνουμε το αρχείο dxf στο πρόγραμμα και το μετατρέπει σε αρχείο geo.

4) Τοποθετούμε το υλικό (λαμαρίνα, έλασμα) στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και το δένουμε με φουρκέτες ή οποιοδήποτε άλλο τρόπο πρόσδεσης που είναι δυνατόν.

5) Ορίζουμε το σύστημα συντεταγμένων και την αρχή του, δηλαδή τους άξονες  $(X_0, Y_0, Z_0)$  επάνω στο κομμάτι, όπου νομίζουμε ότι θα είναι ευκολότερος ο υπολογισμός των συντεταγμένων των σημείων (γενικά προσέχουμε το σημείο αρχής να ευρίσκεται επάνω στο περίγραμμα του τελικού τεμαχίου).

6) Δίνουμε το σημείο αρχής στο πρόγραμμα geo και αυτό μετατρέπει όλα τα σημεία διαδρομής του laser με αρχή το σημείο που του έχουμε ορίσει εμείς το σημείο αρχής, σε γλώσσα M και G.

7) Δίνουμε τις παραμέτρους που χρειάζεται (διαστάσεις, πάχος, τύπος λαμαρίνας) και το πρόγραμμα της μηχανής φορτώνει τις ιδιότητες, ρυθμίζει την ισχύ κοπής.

8) Ελέγχονται τα μέτρα ασφάλειας (πόρτες εάν είναι κλειστές, κάποιες επιπλέον ειδικές προφυλάξεις, το σύστημα με τους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένο περιμετρικά από την μηχανή, που αν παραβιαστεί διακόπτεται αυτόματα η λειτουργία της μηχανής) και θέτουμε σε λειτουργία την κατεργασία.

Τα παραπάνω στάδια πρέπει να τηρηθούν απόλυτα εάν θέλουμε να επιτύχουμε μια διεργασία και να έχουμε ένα επιθυμητό αποτέλεσμα, χωρίς κάποιες επιπλοκές και το σημαντικότερο χωρίς κάποιο ατύχημα (θα αναφερθούμε παρακάτω για τα μέτρα και τους κανόνες ασφαλείας). Οι μηχανές που υπάρχουν στις βιομηχανικές μονάδες είναι είτε συνδεδεμένες με σύστημα CAM/CAD, είτε η μεταφορά των σχεδιαστικών δεδομένων γίνεται με δισκέτες και άλλους τρόπους όπως γίνεται και στην συγκεκριμένη μηχανή. Ο παραπάνω τρόπος είναι χρονοβόρος σε σχέση με το σύστημα CAM/CAD και είναι πολύ σημαντικός παράγοντας ο χρόνος στην βιομηχανική παραγωγή.

## **5 ΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ LASER**

### **5.1 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ LASER**

#### **5.1.1 Βιολογική επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς**

Η ακτινοβολία laser δοσμένης έντασης και χρόνου έκθεσης μπορεί να προκαλέσει βιολογική καταστροφή στους ιστούς, κυρίως των οφθαλμών και του δέρματος. Η επίδραση στους ιστούς γίνεται με δύο τρόπους: με θερμική και με φωτοχημική αλληλεπίδραση. Τα θερμικά φαινόμενα έχουν να κάνουν με τον εκφυλισμό των πρωτεϊνών, που προξενείται από την αύξηση της θερμοκρασίας σαν επακόλουθο της απορρόφησης της ενέργειας από τον ιστό. Αντίθετα, φωτοχημικές αντιδράσεις έχουμε όταν ένα φωτόνιο μετατρέπει ένα μόριο σε άλλο διαφορετικών χαρακτηριστικών και αυτό επιδρά στον ιστό και έχει σαν συνέπεια εγκαύματα των ιστών και ανεπανόρθωτη βιολογική ζημιά. Μπορεί να προκληθούν βιολογικές βλάβες και από άλλες, επίσης, αιτίες, όπως είναι, παραδείγματος χάριν, ακουστικά υψικά κύματα, που προέρχονται από θερμική επαγωγή, η οποία προξενείται από έκθεση σε ακτινοβολία laser ελάχιστης χρονικής διάρκειας ή πολύ μικρής ισχύος και χρονικής διάρκειας.

Ο οφθαλμός λόγω των ιδιοτήτων του να εκπέμπει και να απορροφά ακτινοβολία, παρουσιάζει ιδιαίτερο πρόβλημα, εάν παρακολουθεί δέσμη laser από μικρή απόσταση χωρίς κάποιο είδος προστασίας. Ο κίνδυνος από τη φωτεινότητα της δέσμης είναι εμφανής και επηρεάζει ανεπανόρθωτα τα οπτικά συστήματα του οφθαλμού, με καταστροφικές συνέπειες. Η έκθεση του οφθαλμού ακόμη και σε μικρής ισχύος δέσμη laser και από μεγάλη απόσταση είναι πολύ επικίνδυνη.

Οι βλάβες του δέρματος, οι οποίες μπορεί να προκληθούν από την ακτινοβολία, παρουσιάζουν μικρότερο ενδιαφέρον από αυτές του οφθαλμού. Παρ' όλα αυτά, όμως, αν δε ληφθούν κατάλληλα μέτρα προστασίας, οι βλάβες που θα προκληθούν μπορεί να είναι πολύ σοβαρές, όπως είναι η ταχεία γήρανση, τα εγκαύματα και ο καρκίνος.

#### **5.1.2 Κίνδυνοι από την ανακλώμενη και διάχυτη ακτινοβολία**

Όταν η δέσμη laser προσπίπτει επάνω σε μια μεταλλική επιφάνεια, στα αρχικά στάδια μέχρι η ενέργεια της δέσμης να θερμάνει και να τήξει ή ατμοποιήσει το υλικό και να εισχωρήσει στα πιο βαθιά επίπεδα, η ανακλώμενη ακτινοβολία laser, αν και μπορεί να έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από την αρχική που προσπίπτει στο υλικό, μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για τους ανθρώπους που είναι παρόντες. Ανάλογα με τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού και της δέσμης, η ανακλώμενη δέσμη στις αρχικές χρονικές στιγμές μπορεί να είναι άμεση ή διάχυτη. Άμεση συνήθως παρουσιάζεται σε υλικά που η επιφάνειά τους είναι λεία και

στιλπνή και έχουν μεγάλη σκληρότητα. Διάχυτη ονομάζεται η ακτινοβολία, όταν η επιφάνεια του υλικού, όπου αυτή προσπίπτει, παρουσιάζει μεγάλο βαθμό τραχύτητας. Όλη αυτή η ακτινοβολία παρουσιάζεται σε κλάσματα nanoseconds, αλλά είναι αρκετή να προκαλέσει κίνδυνο στον ανθρώπινο οργανισμό, αν δεν υπάρχουν συστήματα προφύλαξης.

## 5.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΛΗΨΗΣ

### 5.2.1 Εισαγωγή

Για να περιοριστεί ο κίνδυνος από την ακτινοβολία της δέσμης laser, θα πρέπει να πληρούνται κάποια τεχνητά και διοικητικά μέτρα, όπως:

- 1) Τεχνικά συστήματα
- 2) Κατάλληλος εξοπλισμός

### 5.2.2. Τεχνητά συστήματα

Ειδικά διαμορφωμένοι χώροι: Οι ειδικά διαμορφωμένοι χώροι για τις εργαλειομηχανές laser είναι απαραίτητοι. Δεν πρέπει να επιτρέπεται η είσοδος στο μη εξειδικευμένο προσωπικό, για την πρόληψη τυχόν ατυχημάτων.

Διαχωριστικά ασφαλείας: Όλα τα συστήματα laser θα πρέπει να διαθέτουν διακόπτες και κλειδιά, τα οποία θα πρέπει να χρησιμοποιεί μόνο εξειδικευμένο προσωπικό.

Προστατευτικά δέσμης: Ο χώρος κατεργασίας πρέπει να είναι ειδικά προστατευμένος από υλικά με μεγάλη απορροφητικότητα και μηδενική ανακλαστικότητα, για να θωρακίζουν την ασφάλεια των εργαζομένων.

Συστήματα συναγερμού: Προβλέπονται οπτικά ή ηχητικά συστήματα συναγερμού που να είναι σε ετοιμότητα καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του laser.

Ελεγχόμενοι χώροι: Για να μειωθεί ο κίνδυνος ατυχήματος, θα πρέπει να είναι καθορισμένος ο χώρος λειτουργίας και επικινδυνότητας. Ο χώρος αυτός, για να είναι ασφαλής, θα πρέπει να είναι:

- α) υπό τον έλεγχο του υπεύθυνου ασφαλείας.
- β) να είναι ελεύθερη η πρόσβαση μόνο στο ειδικευμένο προσωπικό.
- γ) να υπάρχουν γραπτές οδηγίες.
- δ) να υπάρχουν ειδικές πινακίδες (σήμανση).

### 5.2.3. Κατάλληλος εξοπλισμός

Μια άλλη κατηγορία μέτρων ασφαλείας και πρόληψης είναι σχετική με τον εξοπλισμό. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν κατά κύριο λόγο τα ειδικά γυαλιά με κατάλληλη οπτική πυκνότητα, που δεν επιτρέπει στην ακτινοβολία να τα διαπερνά. Επίσης, η ειδική ένδυση των εργαζομένων (στολή εργασίας, ειδικά γάντια εργασίας) είναι πολύ σημαντική για την πρόληψη ατυχημάτων.

Στον εργασιακό χώρο όπου υπάρχουν οι μηχανές laser και άλλες μηχανές, ο χειριστής πρέπει να νοιώθει ότι βρίσκεται σε συνεχή κίνδυνο ατυχήματος, ούτως ώστε να χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και προφύλαξη από κάθε άσκοπη και επιπόλαιη

ενέργεια. Τα ατυχήματα μπορούν να προκληθούν σε μεγάλο βαθμό από απροσεξία των ίδιων των χειριστών. Για αυτό πριν από την εκτέλεση οποιαδήποτε εργασίας πρέπει να δίνουμε μεγάλη προσοχή στην τήρηση των κανόνων ασφαλείας.

Συμπερασματικά, διαπιστώνουμε πως τα προαναφερθέντα τεχνητά και διοικητικά μέτρα μπορούν να εξασφαλίσουν ένα μεγάλο ποσοστό ασφαλείας κατά τη χρήση των μηχανών laser, ωστόσο δε διαθέτουν το πλεονέκτημα της αποτροπής ενός ατυχήματος σε κλάσματα δευτερολέπτου, κάτι που μόνο η κρίση του χειριστή του μηχανήματος μπορεί να εγγυηθεί. Εν ολίγοις, ο εκάστοτε χειριστής μιας εργαλειομηχανής laser είναι απαραίτητο, πέρα από το να ακολουθεί πιστά τις οδηγίες χρήσης της, να διαθέτει την απόλυτη νοητική του προσήλωση στο αντικείμενο εργασίας του, ώστε με μία ανακλαστική κίνηση να μπορέσει να εξαλείψει τις πιθανότητες κάποιου ατυχήματος.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην τεχνική της διεργασίας διάτρησης με δέσμη laser συνεχούς ή παλμικού τύπου, καθώς και σε θέματα τα οποία παραμένουν ανοιχτά για περαιτέρω διερεύνηση. Ο βασικός σκοπός της πτυχιακής, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, ήταν η διερεύνηση της εργασίας διάτρησης σε μεταλλικά υλικά με παλμούς και συνεχή δέσμη laser. Στα πλαίσια της ανάπτυξης της μεθόδου αυτής έγινε εκτενής αναφορά στη δημιουργία και παραγωγή της δέσμης laser, καθώς και στην τεχνολογία των lasers. Στις εφαρμογές που έχουν τα laser σε διάφορους τομείς, όπως η ιατρική, η χημεία, η φυσική, καθώς και στις βιομηχανικές εφαρμογές, που μέρα με τη μέρα αυξάνονται, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του laser, κυρίως στη διάτρηση των μεταλλικών υλικών και αναλύθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία διάτρησης με δέσμη laser. Επίσης, καταγράφονται οι κίνδυνοι από την έκθεση των εργαζομένων στη δέσμη laser και προτείνονται μέτρα ασφαλείας κατά τη λειτουργία των συστημάτων laser. Παρουσιάζονται μελέτες και πειράματα καθώς και μέθοδοι μοντελοποίησης σε ό,τι αφορά τη διεργασία διάτρησης. Ακολουθήθηκε μια όσο το δυνατόν απλοποιημένη παρουσίαση της τεχνολογίας laser και της τεχνικής διάτρησης, για να γίνεται κατανοητό το περιεχόμενο της εργασίας αυτής σε ένα ευρύ φάσμα ανθρώπων.

Ανακεφαλαιώνοντας, τα σημαντικότερα αποτελέσματα της παρούσας πτυχιακής παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- i. Εισαγωγή στην τεχνολογία των lasers: Γίνεται μια ιστορική αναδρομή των laser, γενική ιδέα και πώς αναπτύχθηκε αυτή μέσα στο χρόνο. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες, καθώς και ο μηχανισμός δημιουργίας των laser. Επίσης, αναφέρονται κύριες βιομηχανικές εφαρμογές του laser, όπως η κοπή, η συγκόλληση, η χάραξη και η διάτρηση. Κύριο συμπέρασμα από τα παραπάνω είναι ότι το σύγχρονο αυτό εργαλείο υπερτερεί σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους κατεργασίας υλικών στον χρόνο κατεργασίας, στην θερμική καταπόνηση, στην ποιότητα επιφάνειας και σε πολλούς άλλους παράγοντες που πρέπει να πληρεί το κατεργαζόμενο τεμάχιο για να είναι ανταγωνιστικό.
- ii. Γίνεται μια εισαγωγή στη διεργασία διάνοιξης οπών σε μέταλλα, όπου γίνεται γνωστός ο βαθμός δυσκολίας αυτής της διεργασίας, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα σε ό,τι αφορά αυτή τη διεργασία με δέσμη και είναι φανερό ότι χρήση laser χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση για να εξαλειφθούν κάποιοι σημαντικοί περιορισμοί που υπάρχουν για αυτήν την κατεργασία.
- iii. Παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραπάνω διεργασία. Επίσης παρουσιάζονται μελέτες και μέθοδοι μοντελοποίησης και πειραματισμού που έχουν ασχοληθεί διάφοροι επιστήμονες κατά καιρούς.
- iv. Προτείνονται μέτρα και συστήματα ασφαλείας για ασφαλέστερη και εύκολη χρήση του laser που εάν δεν ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα θα είναι δύσκολος τρόπος εργασίας και κίνδυνος για την ακεραιότητα των εργαζομένων.



## 7 ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται μια σημαντική και συνεχής προσπάθεια προκειμένου να αναπτυχθούν περαιτέρω οι διεργασίες με laser και να αυξηθούν οι βιομηχανικές εφαρμογές τους. Πολλές επιχειρήσεις και εργαστήρια είναι παγκοσμίως ενεργά σε αυτόν τον τομέα, και νέα συστήματα laser ολοένα αναπτύσσονται και εξελίσσονται. Η διεργασία αφαίρεσης υλικού με laser θα συνεχίσουν να προσελκύουν το ενδιαφέρον των ερευνητών για την αναζήτηση περισσότερων επαρκών λύσεων σε θεωρητικό επίπεδο. Παρ' όλ' αυτά, η διεξαγωγή πειραματισμών με την χρονοβόρα μέθοδο της «δοκιμής και λάθους» θα συνεχίσει να κυριαρχεί σε αυτόν τον τομέα.

### 7.2 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στην παρούσα πτυχιακή άσκηση παρουσιάστηκε η διερεύνηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser.

Μια σειρά από θέματα σχετικά με την διεργασία απαιτούν περαιτέρω έρευνα. Συνοπτικά τα θέματα των οποίων η επίλυση θα οδηγήσει σε μια ολοκληρωμένη και πλήρως εφαρμόσιμη μεθοδολογία σε βιομηχανικούς τομείς, συμπεριλαμβάνουν:

- \* Ανάπτυξη πλήρως αυτοματοποιημένου και ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου της διεργασίας χρησιμοποιώντας τα θεωρητικά μοντέλα συσχέτισης των ακουστικών σημάτων και των εκπομπών ακτινοβολίας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οπών.
- \* Διερεύνηση εφαρμογής και επέκτασης της μεθόδου παρακολούθησης και ελέγχου της διεργασίας και σε άλλες διεργασίες με δέσμη Laser, με σκοπό την ανάπτυξη ενός ευέλικτου συστήματος παρακολούθησης ικανό να χρησιμοποιηθεί για πολλές εφαρμογές, όπως κοπή, συγκόλληση, χάραξη, κτλ., χωρίς να είναι απαραίτητες γίνουν σημαντικές αλλαγές του συστήματος.
- \* Βελτίωση εμπειρικών προτύπων για την ακριβέστερη εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τον καλύτερο προγραμματισμό της διεργασίας.
- \* Επέκταση των εμπειρικών προτύπων και σε άλλα μεταλλικά υλικά, όπως είναι κράματα αλουμινίου, ανοξείδωτος χάλυβας, σκληρυμένοι χάλυβες. Κτλ.
- \* Διερεύνηση του μηχανισμού παραγωγής του laser για την μείωση εξόδων αγοράς και χρήσης μιας εργαλειομηχανής laser σε βιομηχανίες ώστε να γίνει πιο ανταγωνιστική αυτή η μέθοδος.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

- $A$ : εμβαδό κάτω επιφάνειας οπής (**m<sup>2</sup>**)  
 $A'$ : εμβαδό επάνω επιφάνειας οπής (**m<sup>2</sup>**)  
 $A_0$ : εμβαδό επιφάνειας εισόδου οπής (**m<sup>2</sup>**)  
 $c$ : ταχύτητα ήχου (**m/sec**)  
 $c_0$ : ταχύτητα φωτός (**m/sec**)  
 $C_p$ : Ειδική θερμότητα (**Joule/Kgr K**)  
 $A' D$ : διάμετρος εισόδου της οπής (**m**)  
 $Dent.$ : διάμετρος εισόδου διαμπερούς οπής (**m**)  
 $Dexi...$ : διάμετρος εξόδου διαμπερούς οπής (**m**)  
FPP: θέση επιπέδου εστίασης (**m**)  
 $h$ : σταθερά *Planck* (**Joule sec**)  
 $I_0$ : Μέγιστη πυκνότητα ισχύος δέσμης *Laser* (**Watt**)  
IT: χρόνος διεργασίας (**sec**)  
 $k$ : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (**Watt/m K**)  
LP: ισχύς δέσμης *Laser* (**Watt**)  
PRe : ισχύς ακτινοβολίας που αντανακλάται (**Watt**)
- $A P'$  : ισχύς ακτινοβολίας που διέρχεται από την επιφάνεια  $A'$  (**Watt**)  
PF: Συχνότητα παλμών δέσμης *Laser* (**Hz**)  
 $R_0$ : ακτίνα οπής στην επιφάνεια του δοκιμίου (**m**)  
 $R_f$ : διάμετρος δέσμης σε απόσταση  $z$  από την επιφάνεια του δοκιμίου (**m**)  
 $R_{f0}$ : διάμετρος δέσμης *Laser* στο εστιακό επίπεδο (**m**)  
 $R_z$ : ακτίνα οπής σε απόσταση  $z$  από την επιφάνεια του δοκιμίου (**m**)  
TEM<sub>00</sub>: κατανομή ισχύος δέσμης *Laser* (-)  
ton: διάρκεια παλμού (χρόνος που η δέσμη ενεργεί στην διάρκεια ενός παλμού) (**sec**)  
 $\xi$ : ανεξάρτητη μεταβλητή (-)  
 $\Upsilon$ : εξαρτημένη μεταβλητή (-)  
 $z$ : απόσταση από την επιφάνεια του δοκιμίου (**m**)

### Ελληνικοί χαρακτήρες και σύμβολα

- $\delta f$ : θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου (**m**)  
 $\lambda$ : μήκος κύματος δέσμης *Laser* ( **$\mu$ m**)  
 $\rho$ : πυκνότητα (**Kgr/m<sup>3</sup>**)  
 $\varphi$ : γωνία κωνικότητας οπής (**rad**)  
 $\omega$ : στερεή γωνία που περιγράφει τον κώνο της οπής (**Sr**)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

**Σχήμα 1-1:** Laser.

**Σχήμα 1-2:** Διαφορά μεταξύ του κοινού φωτός και δέσμη Laser.

**Σχήμα 1-3:** Τυπικός μηχανισμός Laser.

**Σχήμα 1-4:** Διέγερση ηλεκτρονίων.

**Σχήμα 1-5:** Μηχανισμός διέγερσης ηλεκτρονίων.

**Σχήμα 1-6:** Μηχανισμός αναστροφής πληθυσμού.

**Σχήμα 1-7:** Χρονική κατάσταση Laser.

**Σχήμα 1-8:** Χωρική κατάσταση Laser.

**Σχήμα 1-9:** Κατανομή της ενέργειας της δέσμης κατά Gauss.

**Σχήμα 1-10:** Ακτινοβολία του φωτός.

**Σχήμα 1-11:** Τυπικό CO<sub>2</sub> Laser.

**Σχήμα 1-12:** Τυπικό Nd: YAG Laser.

**Σχήμα 1-13:** Σχηματικές αναπαραστάσεις των διεργασιών διάτρησης, κοπής και χάραξης.

**Σχήμα 2-1:** Σχηματική απεικόνιση διεργασίας διάτρησης με δέσμη laser.

**Σχήμα 2-2:** Εφαρμογές διάτρησης με δέσμη laser σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς.

**Σχήμα 2-3:** Διάφορες τεχνικές διάτρησης, (α) κρουστική διάτρηση, (β) διάτρηση μέσω κοπής και (γ) ελικοειδής διάτρηση.

**Σχήμα 2-4:** Ένταση δέσμης laser, (α) συνεχούς κύματος, (β) παλμικού τύπου.

**Σχήμα 2-5:** Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας διάτρησης σε διαμπερή οπή με δέσμη laser.

**Σχήμα 2-6:** Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας διάτρησης σε τυφλή οπή με δέσμη laser.

**Σχήμα 3-1:** Σχηματικό διάγραμμα αύξησης ισχύος κατά την διάτρηση.

**Σχήμα 3-2:** Κατανομή πυκνότητας ισχύος TEM<sub>00</sub> (κατανομή Gauss).

**Σχήμα 3-3:** Απόκλιση της δέσμης laser.

**Σχήμα 3-4:** Σχηματική αναπαράσταση του πλάσματος για τα διάφορα στάδια της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser κράματος SUPERel.

**Σχήμα 3-5:** Διάμετρος εισόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

**Σχήμα 3-6:** Διάμετρος εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

**Σχήμα 3-7:** (α) Εξαναγκασμένη απορρόφηση, (β) αυθόρμητη εκπομπή, (γ) εξαναγκασμένη εκπομπή (παραγωγή laser).

**Σχήμα 3-8:** Θέσεις επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου.

**Σχήμα 3-9:** Εφαρμογές διαφορετικής κωνικότητας.

**Σχήμα 3-10:** Αναλογία διαμέτρων εισόδου και εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

**Σχήμα 3-11:** Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου επιφανειών (α) εισόδου και (β) εξόδου διαμπερών οπών.

**Σχήμα 3-12:** Ενεργειακή ισορροπία στην περιοχή τήξης κατά την διάτρηση με παλμούς δέσμης laser.

**Σχήμα 3-13:** Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στο βάθος διάτρησης.

**Σχήμα 3-14:** Εικόνες οπών πάνω σε λεπτό έλασμα ατσάλι από laser 788nm διάρκειας παλμού: α) femtosecond, β) picoseconds, γ) nanosecond.

**Σχήμα 4-1:** Μηχανή κατεργασίας με δέσμη Laser TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.

**Σχήμα 4-2:** (α) Κυρίως πρόγραμμα και (β) υποπρόγραμμα για τον προγραμματισμό διάτρησης με δέσμη Laser στην μηχανή κατεργασίας TRUMPF TRUMATIC TLF 2530

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

**Πίνακας 4-1:** Χαρακτηριστικά μηχανής κατεργασίας με δέσμη Laser TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### Βιβλία

Καράμπελας Α., Τεχνολογία lasers και βιομηχανικές εφαρμογές. Παν/μιο Πατρών. Πάτρα, 1993.

Καράμπελας Α., Laser Φυσική, Τεχνολογία, Βιομηχανικές Εφαρμογές, Ασφάλεια. Παν/μιο Πατρών. Πάτρα 2007.

Μάμαλης Α. Γ., Κατεργασίες των Υλικών Ι, 1998.

Μάμαλης Α. Γ., Κατεργασίες των Υλικών ΙΙ, 1998.

Μάμαλης Α. Γ., Κατεργασίες των Υλικών ΙV, 1999.

Περσεφόνης Π., Laser Φυσική και Τεχνολογία. Εκδ. Παπασωτηρίου. Αθήνα 2001.

Σπύρου Ν., Τεχνολογία Laser και Εφαρμογές. Παν/μιο Πατρών. Πάτρα 1999.

A. A. Carambelas and G. Baldacchini, "New Laser Technologies and Applications, SPIE, Wa, USA 1997.

### **Επιστημονικά περιοδικά**

1. Aoyama, E., Inoue, H., Hirogaki, T., Nobe, H., Kitahana Y., and Katayama, T., 1995, "Study of a small diameter drilling in GFRP", Composite Structures, 32, pp. 567-573.

2. Cheng, C. F., Tsui, Y. C., and Clyne, T. W., 1998, "Application of a three-dimensional heat flow model to treat laser drilling of carbon fibre composites", Acta Mater., 46(12), pp. 4273-4285.

3. Conde, J. C., Lusquinos, F., Gonzalez, P., Leon, B., and Perez-Amor, M., 2001, "Temperature distribution in laser marking", Journal of Laser Applications, 13(3), pp. 105-110.

4. Fang-Yu Yueh, Jagdish P. Singh, and Hansheng Zhang 'Laser-induced Breakdown Spectroscopy, Elemental Analysis' (2000), p 2066-2087.

5. Ganesh, R. K, Faghiri, A.,and Hahn, Y., 1997, "A generalized thermal modeling for laser drilling process—I. Mathematical modeling and numerical methodology", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(14), pp. 3351-3360.
6. Ganesh, R. K, Faghiri, A.,and Hahn, Y., 1997, "A generalized thermal modeling for laser drilling process—II. Numerical simulation and results", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(14), 1997, pp. 3361-3373
7. Ho, J. R., Grigoropoulos, C. P., and Humphrey, J. A. C., 1995, "Computational study of heat transfer and gas dynamics in the pulsed laser evaporation of metals", *Journal of Applied Physics*, 78, pp. 4696-4709.
8. Jose M. Vadillo, J. Javier Laserna. 'Laser-induced plasma spectroscopy: truly a surface analytical tool' (2004) p147-161.
9. Li L., D.K.Y. Low, M. Ghosh, J.R. Crookal, (2002), "Hole taper characterization and control in Laser percussion drilling", *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, Vol. 51/1, pp. 153-156.
10. Li, C., and Shannon, M. A., 1999, "A simplified cavity analysis for estimating energy coupling during laser ablation and drilling of solids—experimental", *Applied Surface Science*, 150, pp. 211-226.
11. Low, D. K. Y, Li, L., and Gorfe, A. G., 2000, "Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NINOMIC 263 alloy", *Applied Surface Science*, 154–155, pp. 689-695.
12. Low, D. K. Y, Li, L., and Byrd, P. J., 2000, "The effects of process parameters on spatter deposition in laser percussion drilling", *Optics and Laser Technology*, 32, pp. 347-354.
13. Low, D. K. Y, Li, L., Gorfe, A. G., and Byrd, P. J., 2001, "Spatter-free laser percussion drilling of closely space array holes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, pp. 361-377
14. Modest, M. F., "Laser through-cutting and drilling models for blating/decomposing materials", 1997, *Journal of Laser Applications*, 9, pp. 137-145.
15. Radley, O. W., and Swope, W. C., 1992, "Laser drilling with focused Gaussian beams", *Journal Applied Physics*, 72, pp. 3686-3696.
16. Sankaranarayanan, S., Eminger, H., and Kar, A., 1999, "Energy loss in the plasma during laser drilling", *Journal Applied Physics*, 32, pp. 1605-1611.
17. Solana, P., Kapadia, P, Dowden, J. M.,and Marsden, P. J., 1999, "An analytical model for the laser drilling of metals with absorption within the vapour", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32, pp. 942-952.

18. Stournaras A., K. Salonitis and G. Chryssolouris, "Optical emissions for monitoring of percussion laser drilling process", submitted to International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2008).
19. Tsoukantas, G., A. Stournaras and G. Chryssolouris, "An experimental investigation of remote welding with CO<sub>2</sub> and Nd: YAG laser-based systems", Journal of Laser Applications, (Vol. 20, No. 1), pp. 50-58, (2008).
20. Tsoukantas, G., K. Salonitis, A. Stournaras, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "On Optimal Design Limitations of Generalized Two-Mirror Remote Beam Delivery Laser Systems: The case of remote Welding", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (Vol. 32, 2007), pp. 932-941.
21. V. Margetic, A. Pakulev, A. Stockhaus, M. Bolshov, K. Niemax, R. Hergenroder 'A comparison of nanosecond and femtosecond laser-induced plasma spectroscopy of brass samples' (2000) p1771-1785.
22. von Allmen, M., et al, 1976, "Laser Drilling Velocity in Metals ", Journal of Applied Physics, 47(12), pp. 5460-5463.
23. W. PERRIE, A. RUSHTON, M. GILL, P. FOX, W. O' NEILL : Femtosecond Laser micro-structuring of Alumina Ceramic, Applied Surface Science 248 (2005).
24. Yilbas, B. S., Sahin, A. Z., and Davies, R., 1995, "Laser heating mechanism including evaporation process initiating laser drilling", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 35(7), pp. 1047-1062.
25. Yilbas, B. S., 1997, "Parametric study to improve laser hole drilling process", Journal of Materials Processing Technology, 70, pp. 264-273.
26. Zhang, Y., and Faghri, A., 1999, "Vaporization, melting and heat conduction in the laser drilling process", International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, pp. 1775-1790.

## **Συνέδρια**

- A. Καράμπελας, Σ. Τσιτομενέας, Ν. Θεοφάνους: "Επικινδυνότητα και Μέτρα Πρόληψης στη Χρήση των Laser". 7<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο, «Laser και Εφαρμογές». Αθήνα 1989.
- A. Καράμπελας, Ι. Δάγλας, Ι. Bagleh. : «Επίδραση της Ακτινοβολίας Laser σε Μεταλλική Επιφάνεια». 9<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο «Laser και Εφαρμογές». Αθήνα 1992.

## **Διδακτορική διατριβή**

Στουρνάρας, Α. Γ., «Διερεύνηση και ανάπτυξη συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου και διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης laser σε πραγματικό χρόνο», Πάτρα, 2009.

## **Μεταπτυχιακή εργασία**

Καστανά, Μ., «Πραγματική μελέτη του πλάσματος που παράγεται από αλληλεπίδραση laser με γραφίτη», Πάτρα, 2007.