

ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: «ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΑΠΟΒΟΛΗ ΥΛΙΚΟΥ»**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

Πανουσάκης Βασίλης

Επιβλέπουσα: Μανιάτη Μισέλ

ΑΘΗΝΑ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρια Μισελ Μανιατη,Εργαστηριακος Συνεργατης του Τμήματος Μηχανολογιας,για την ανάθεση της πτυχιακής εργασίας. Δίχως την αμέριστη συμπαράσταση και τις πολύτιμες συμβουλές της θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και την οικογένειά μου για τη συμπαράστασή της καθ' όλα τα χρόνια των σπουδών μου, καθώς επίσης και τους φίλους μου για τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
SUMMARY	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1' ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ .	7
1.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΈΝΝΟΙΑΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
1.2 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	9
❖ Κατεργασία αποβολής υλικού.	
❖ Επιφανειακές	
❖ Κατεργασίες σύνδεσης	
❖ Συμβατικές	
❖ Μη συμβατικές	
1.3ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΑΠΟΒΟΛΗ ΥΛΙΚΟΥ.....	
....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
❖ Η ΚΟΠΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ – ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ – ΦΘΟΡΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	20
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	20
2.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ	22
2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ	23
2.4 ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ	28
2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ	

ΤΕΜΑΧΙΟΥ	30
2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ EDM.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΒΟΛΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ LASER.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ LASER.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.2 ΒΑΣΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΡΧΗ ΤΟΥ LASER	35
3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΟΥ LASER	36
3.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ LASER	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΒΟΛΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ PLASMA.....	68
4.1 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	68
4.2 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	70
4.3 ΚΟΠΗ ΜΕ ΠΛΑΣΜΑ.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ.....	74
5.1 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΈΝΝΟΙΑΣ	74
5.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΕΣΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ.....	76
5.3 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	84
ΠΙΝΑΚΕΣ.....	85

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή εργασία αφορά τις μη συμβατικές θερμοηλεκτρικές κατεργασίες μετάλλων με αποβολή υλικού με laser, plasma, ηλεκτροδιάβρωση και δέσμη ηλεκτρονίων.

Στο κεφάλαιο 1, θα αναλυθεί η έννοια της κατεργασίας καθώς και η διαφορά μεταξύ των συμβατικών μεθόδων κατεργασίας με τις μη συμβατικές. Ακόμα, θα αναλυθούν οι κατεργασίες αποβολής υλικού.

Στο κεφάλαιο 2, θα αναπτυχθεί η αποβολή υλικού με ηλεκτροδιάβρωση. Θα παρουσιαστεί η έννοια της και όλη η διαδικασία της ηλεκτροδιάβρωση.

Στο κεφάλαιο 3, θα γίνει μια εκτενής αναφορά για το laser και τη χρησιμότητά του στην αποβολή υλικού. Θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες του, οι κατηγορίες του και η προέλευσή του.

Έπειτα στα επόμενα δύο κεφάλαια θα αναλυθεί η αποβολή υλικού με plasma και δέσμη ηλεκτρονίων.

Λέξεις κλειδιά: μη συμβατικές κατεργασίες, laser, αποβολή υλικού, μέταλλα , εφαρμογές laser, ηλεκτροδιάβρωση, δέσμη ηλεκτρονίων, plasma.

SUMMARY

This thesis refer to non-conventional thermoelectrical material removal machining process with laser, plasma,electrodischarge machining and electro.

In Chapter 1, we will analyze the significance of the treatment and the difference between conventional machining methods and non-conventional. Still, we will analyze the material removal machining.

In Chapter 2, we will develop the process of expelling material with electrodischarge machining. We will present the concept and the entire process.

In Chapter 3, there will be a comprehensive reference to the laser and its usefulness in the elimination of material. Will present the properties, categories and the origin.

Then in the next two chapters will analyze the miscarriage material plasma and electron beam.

Keywords: non conventional machining, laser, elimination of material, metal,

laser applications, electro, electron beam, plasma.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΈΝΝΟΙΑΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ως κατεργασία ορίζεται η διαδικασία εκείνη με την οποία τα ακατέργαστα υλικά μετατρέπονται σε τελικά προϊόντα. Αφορά τα σχέδια αλλά και την κατασκευή προϊόντων μέσα από διαδικασίες κατεργασίας και άλλων τεχνικών για την παραγωγή του τελικού υλικού.

Από την προϊστορική ακόμη περίοδο η εξαγωγή μετάλλων έδωσε το έναυσμα για την εντυπωσιακή εξέλιξη των πολιτισμών εκείνων οι οποίοι κατόρθωσαν να εξορύξουν, να καθαρίσουν και να παραλάβουν μέσω κατάλληλων μεταλλουργικών διαδικασιών τα μέταλλα που ήταν διαθέσιμα στην περιοχή τους ή σε κοντινές περιοχές. Τα μέταλλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή εργαλείων και σκευών με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πληθυσμών που τα κατείχαν αλλά, κυρίως, για την κατασκευή όπλων με στόχο την επέκταση των ορίων επικράτειας των ίδιων πληθυσμών. Δεν είναι τυχαία η ονομασία χαρακτηριστικών περιόδων της ανθρώπινης ιστορίας, ως εποχών του μπρούντζου και του σιδήρου αντίστοιχα.

Δεν είναι επίσης άτοπο να θεωρήσει κανείς την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης και το αμέσως επόμενο διάστημα ως την εποχή του χάλυβα ενώ η σύγχρονη εποχή μπορεί οπωσδήποτε να περιγραφεί ως η εποχή του αργιλίου και του πυριτίου λόγω της εξαιρετικά ευρείας χρήσης των ίδιων των μετάλλων ή κραμάτων τους στην αεροπλοΐα και στην πληροφορική. Ακόμη και σήμερα η αναζήτηση νέων πηγών ορυκτών καθώς και η επανεξέταση της χρήσης παλιών ορυχείων είναι σημαντικά, πολύ περισσότερο αφού οι πλουτοπαραγωγικές πηγές του πλανήτη είναι πεπερασμένες και η περιεκτικότητα των αποθεμάτων μειώνεται ενώ δεν είναι πάντοτε απλή, εφικτή ή οικονομική η επανάκτηση των πρώτων υλών, ειδικότερα των μετάλλων από τα κράματά τους. αρχαιομεταλλουργίας έχει αποκτήσει ενδιαφέρον και απασχολεί ολοένα και περισσότερους επιστήμονες διεθνώς.

Επομένως, είναι εμφανές ότι η κατεργασία που εμφανίστηκε το 5000 π.Χ. αποτέλεσε τη βασική διαδικασία παραγωγής προϊόντων από ακατέργαστα υλικά, με διάφορες διαδικασίες και μηχανήματα οι οποίες ακολουθούν ένα οργανωμένο σχέδιο και κάθε βήμα που απαιτείται. Αυτά τα προϊόντα χρησιμοποιούνται ως ανεξάρτητα ή ως βάση για την παραγωγή κάποιου άλλου προϊόντος μέσα από συνεχή επεξεργασία¹.

Η κατεργασία ακολουθεί συγκεκριμένες μεθόδους σύμφωνα με τις οποίες πρέπει να τηρούνται τα παρακάτω:

- Το προϊόν πρέπει να ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις του πλάνου που έχει τεθεί αλλά και να έχει τις απαραίτητες προδιαγραφές.
- Το προϊόν πρέπει να κατασκευαστεί με βάση τις πιο οικονομικές μεθόδους προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής.
- Η ποιότητα θα πρέπει να εξετάζεται σε κάθε στάδιο παραγωγής του προϊόντος, από το σχέδιο έως και το τελικό προϊόν, και όχι απλά να ελέγχεται αφότου κατασκευαστεί αυτό.
- Οι μέθοδοι παραγωγής πρέπει να είναι αρκετά εύκαμπτες για να αποκριθούν στις μεταβαλλόμενες ζητήσεις της αγοράς, στους τύπους των προϊόντων, τα ποσοστά παραγωγής, τις ποσότητες παραγωγής, και στην εντός χρόνου παράδοση στον πελάτη.
- Οι νέες εξελίξεις της τεχνολογίας στα υλικά, τις μεθόδους παραγωγής, τους υπολογιστές, τόσο στις τεχνολογικές όσο και στις διευθυντικές δραστηριότητες σε ένα κατασκευαστικό οργανισμό πρέπει να αξιολογηθούν άμεσα για να επιτευχθεί η έγκαιρη και οικονομική εφαρμογή τους.
- Ο κατασκευαστής πρέπει να εργαστεί με τον πελάτη για να πάρει την έγκαιρη ανατροφοδότηση που απαιτείται για τη συνεχή βελτίωση των παραγόμενων προϊόντων.

¹<http://courseware.mech.ntua.gr>

1.2 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Οι κατεργασίες μετάλλων διακρίνονται στις:

- ❖ Κατεργασία αποβολής υλικού
- ❖ Επιφανειακές
- ❖ Κατεργασίες σύνδεσης
- ❖ Συμβατικές
- ❖ Μη συμβατικές

Κατεργασία αποβολής υλικού: Οι κατεργασίες αυτές ταξινομούνται στις συμβατικές κατεργασίες κοπής και προκαλούν αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια υπό την μορφή αποβλήτου. Επιθυμητός στόχος μπορεί να είναι ακόμη και η βελτίωση των ανοχών και της ποιότητας της επιφάνειας ενός προηγουμένως ήδη κατεργασμένου τεμαχίου, γεγονός που επιτυγχάνεται με την αφαίρεση του υπερβολικού υλικού υπό μορφή αποβλήτου μέσω ενός μεταλλικού κοπτικού εργαλείου εργαλειομηχανής. Η κατεργασία της κοπής είναι ικανή να επιτύχει γεωμετρικές διαμορφώσεις, ανοχές και ποιότητα επιφάνειας που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν από οποιαδήποτε άλλη τεχνική. Εντούτοις, η κοπή αφαιρεί υλικό, για το οποίο έχουν ήδη ξοδευτεί χρήματα, υπό μορφή αποβλήτου που είναι δύσκολο να ανακυκλωθεί.

Οι επιφανειακές κατεργασίες που εφαρμόζονται στα χαλύβδινα αντικείμενα έχουν σκοπό να τα προστατεύσουν (δηλ. να αυξήσουν την αντοχή τους) έναντι:

- Φθοράς, που προκαλείται από την επαφή της επιφάνειας με τις επιφάνειες άλλων αντικειμένων.
- Διάβρωσης, όταν η επιφάνεια φέρεται σε υγρό περιβάλλον που δρα δυσμενώς επ' αυτής.

- Οξειδωσης, όταν η επιφάνεια υπόκειται σε ξηρό περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες που ενεργοποιεί τη χημική δράση των οξειδωτικών αερίων.

- Κόπωσης, η οποία εκδηλώνεται ως αστοχία του υλικού λόγω εναλλασσόμενης μηχανικής ή θερμικής φόρτισης.

Οι επιφανειακές κατεργασίες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

(α) Κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας, με τις οποίες επιτυγχάνεται μεταβολή της κρυσταλλικής δομής ή/και της χημικής σύστασης της επιφάνειας, χωρίς εναπόθεση πρόσθετου υλικού σ' αυτή.

(β) Κατεργασίες με απόθεση υλικού, κατά τις οποίες εναποτίθεται πάνω στην υπό προστασία επιφάνεια στρώμα άλλου υλικού (επίστρωση ή επικάλυψη).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 . ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Υποκατηγορία	Χαρακτηριστικά	Είδος κατεργασίας
Μηχανικές επιφανειακές κατεργασίες	Εισαγωγή «επωφελών» πεδίων παραμενουσών τάσεων στην επιφάνεια του υλικού. Κρυσταλλική δομή και χημική σύσταση της επιφάνειας παραμένουν αμετάβλητες.	1. Σφαιροβολή 2. Επιφανειακή έλαση
Θερμικές επιφανειακές κατεργασίες	Επιβολή συνδυασμένων κύκλων θέρμανσης/ψύξης. Μεταβάλλεται μόνο η κρυσταλλική δομή της επιφάνειας, ενώ η χημική της σύσταση δεν αλλάζει.	1. Φλογοβαφή 2. Επαγωγική βαφή 3. Βαφή με δέσμη laser 4. Βαφή με δέσμη ηλεκτρονίων

Θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες ή εμποτισμοί	Η επιφάνεια εμπλουτίζεται με άτομα άλλου στοιχείου μέσω μηχανισμών διάχυσης, με αποτέλεσμα την αλλαγή της χημικής της σύστασης.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ενανθράκωση 2. Εναζώτωση 3. Ενανθρακαζώτωση 4. Ενδοκυάνωση 5. Εγχρωμίωση 6. Εναργιλίωση 7. Ενσιλίκωση 8. Βορίωση 9. Σεραρδίωση 10. Βαναδίωση 11. Εμφύτευση ιόντων

Κατεργασίες σύνδεσης: Τα διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα παίρνουν την αρχική τους μορφή κατά κανόνα με μεθόδους μορφοποίησης (ιδιαίτερα χύτευση) χωρίς αφαίρεση υλικού, αφήνοντας μικρή ποσότητα υλικού για την τελική κατεργασία. Η τελική κατεργασία στη διαμόρφωση ενός εξαρτήματος μπορεί να επιτευχθεί κυρίως με μεθόδους αφαίρεσης υλικού, μια και προκύπτει με τέτοιες κατεργασίες μεγαλύτερη ακρίβεια στις διαστάσεις και καλύτερη ποιότητα επιφάνειας. Με τη μορφοποίηση με παραμόρφωση επιτυγχάνεται η διαμόρφωση ενός προϊόντος χωρίς μεγάλη απώλεια υλικού. __Διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις (ηλώσεις, κοχλιώσεις κλπ).

Οι συμβατικές κατεργασίες χρησιμοποιούν τη μηχανική ενέργεια και τον συμβατικό εξοπλισμό ενώ οι μη συμβατικές ως βασική ενέργεια κατεργασίας χρησιμοποιούν κάποια άλλη μορφή ενεργείας πέραν της μηχανικής, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός είναι μη συμβατικός, προσαρμοζόμενος στις ιδιαιτερότητες της κατεργασίας όπως η μαγνητική διαμόρφωση, η εκρηκτική συμπίεση, η ηλεκτροδιάβρωση, η κοπή με laser και η εκρηκτική συγκόλληση.

1.3 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΑΠΟΒΟΛΗ ΥΛΙΚΟΥ

Οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού είναι :

- ❖ Κατεργασία
- ❖ Τόρνευση
- ❖ Φρεζάρισμα
- ❖ Διάτρηση
- ❖ Πλάνιση
- ❖ Λείανση

Οι συνήθεις τρόποι κατάταξης των κατεργασιών αυτών είναι :

- ως προς το είδος της κατεργασίας
 - ως προς το είδος της πρωτεύουσας κίνησης: εργαλειομηχανές με περιστροφική πρωτεύουσα κίνηση, εργαλειομηχανές με ευθύγραμμη πρωτεύουσα κίνηση,
 - ως προς τον βαθμό εξειδίκευσεως: εργαλειομηχανές γενικής χρήσεως, ειδικές εργαλειομηχανές, εξειδικευμένες εργαλειομηχανές, εργαλειομηχανές μεταφοράς,
 - ως προς την ακρίβεια κατεργασίας: εργαλειομηχανές συνήθους ακριβείας, εργαλειομηχανές ακριβείας, εργαλειομηχανές μεγάλης ακριβείας, εργαλειομηχανές υψίστης ακριβείας,

- ως προς το βάρος: εργαλειομηχανές ελαφρές (βάρος μικρότερο του 1 tn), εργαλειομηχανές μέσου βάρους (βάρος μικρότερο των 10 tn), εργαλειομηχανές βαριές (βάρος μεγαλύτερο των 10 tn),

- ως προς το βαθμό αυτοματισμού: κοινές εργαλειομηχανές, ημιαυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις γίνονται αυτόματα), αυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις και η τροφοδοσία γίνονται αυτόματα) .

❖ Η ΚΟΠΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ – ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ – ΦΘΟΡΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Η αφαίρεση του υλικού στις εργαλειομηχανές επιτυγχάνεται μέσω της διαφορετικής κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, με καθορισμένο βάθος (το οποίο ονομάζεται βάθος κοπής) και προδιαγεγραμμένη ταχύτητα εισχώρησης. Το υλικό του τεμαχίου που απομακρύνεται λέγεται απόβλιττο (γρέζι) και μπορεί, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες κατεργασίας και το υλικό του τεμαχίου, να έχει διάφορες μορφές.

Ανάλογα με τον βαθμό παραμορφώσεως ϵ και την αντοχή σε διάτμηση τ του κατεργαζόμενου υλικού, το παραγόμενο απόβλιττο μπορεί να είναι συνεχές ή ασυνεχές. Το συνεχές απόβλιττο είναι και το επιθυμητό στην πράξη, μια και σχετίζεται με ευνοϊκές συνθήκες όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, την καταναλισκόμενη ισχύ, την προκύπτουσα τραχύτητα επιφάνειας του τεμαχίου καθώς και την αναπτυσσόμενη φθορά στο κοπτικό εργαλείο. Το συνεχές απόβλιττο δημιουργείται από συνεχή πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται στην περιοχή της ζώνης διάτμησης. Το γεγονός αυτό, έχει σαν συνέπεια την διαρροή του υλικού του και την ροή του σαν ταινία πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου.

Το ασυνεχές απόβλιττο δημιουργείται με την περιοδική θραύση του αποβλίττου κατά την διέλευσή του από την ζώνη διατμήσεως. Τέτοιο απόβλιττο συναντάται σε ψαθυρά υλικά όπως ο χυτοσίδηρος ή σε πολύ χαμηλές ταχύτητες κοπής, σε μεγάλες προώσεις ή σε κοπή με εργαλεία με μικρές γωνίες αποβλίττου.

Έτσι ευνοϊκές συνθήκες κοπής όσον αφορά την δημιουργία του αποβλίττου, γενικά επιτυγχάνονται με τις εξής συνθήκες :

- μεγάλη ταχύτητα κοπής
- μικρή πρόωση
- μεγάλη γωνία αποβλίττου

Σε περιπτώσεις που το συνεχές απόβληττο αποκτά μεγάλο μήκος (ιδίως στην κατεργασία όλκιμων υλικών), με αποτέλεσμα να επιφέρει δυσκολίες αλλά και κινδύνους κατά την ώρα της κατεργασίας, χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου που ονομάζονται γρεζοθραύστες. Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την δημιουργία του συνεχούς αποβλίττου είναι και η δημιουργία της ψευδόκοψης.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλήττου, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδόκοψη. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου.

Η ψευδόκοψη αναπτύσσεται καθώς η κοπή προχωρεί. Όταν η ψευδόκοψη αποκτά ένα ορισμένο μέγεθος, αποχωρίζονται από το σώμα της, λόγω των δυνάμεων κοπής, μικρά κομμάτια τα οποία προσκολλώνται είτε στο απόβληττο που ρέει, είτε στην νεοσχηματισμένη επιφάνεια του τεμαχίου.

Η ύπαρξη της ψευδόκοψης χειροτερεύει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ενώ η συμπεριφορά της ως προς το κοπτικό εργαλείο εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής. Έτσι υπάρχει περίπτωση η σταθερή παρουσία της ψευδόκοψης να προστατεύει το κοπτικό εργαλείο, μια και κόβει αυτή και όχι άμεσα η κοπτική ακμή του, ενώ υπάρχει και η περίπτωση, ανάλογα τις συνθήκες κοπής, η ψευδόκοψη να φθείρει το εργαλείο κυρίως στην επιφάνεια αποβλίττου του, με τον μηχανισμό της απόξεσης. Η δημιουργία ή αποφυγή της ψευδόκοψης μπορεί να ελεγχθεί από την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας.

Έτσι το μέγεθος της ψευδόκοψης μειώνεται αν :

- αυξηθεί η ταχύτητα κοπής,

- χρησιμοποιηθεί εργαλείο με μεγαλύτερη γωνία αποβλίττου,
- μειωθεί η χρησιμοποιούμενη πρόωση,
- χρησιμοποιηθεί κατάλληλο υγρό κοπής.

Κατά την διάρκεια της κοπής, με την υπόθεση πως το κοπτικό εργαλείο κινείται με ταχύτητα v ενάντια στο σταθερό κατεργαζόμενο τεμάχιο, το υλικό του τεμαχίου που κόβεται, σχηματίζεται με συνεχή πλαστική διάτμηση που λαμβάνει χώρα ακριβώς μπροστά στην κόψη του εργαλείου. Το απόβλιττο που παράγεται κινείται πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και απομακρύνεται, ενώ η τελική παραγόμενη επιφάνεια του τεμαχίου δημιουργείται από συνεχή θραύση του υλικού του. Η πλαστική διάτμηση που γίνεται σε μια στενή περιοχή που ονομάζεται ζώνη διατμήσεως, έχει σαν συνέπεια το υλικό του τεμαχίου που περνά από την ζώνη αυτή να εφελκύεται.

Η κατεργασία με αφαίρεση υλικού μπορεί να προσομοιωθεί με την είσοδο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, μιας κοπτικής σφήνας. Η κόψη αυτής της σφήνας έχει σχεδόν πάντα συγκεκριμένη γεωμετρία, επιλεγμένη σχετικά με το προς κατεργασία υλικό και τις συνθήκες κατεργασίας. Τα χαρακτηριστικά αυτής της γεωμετρίας αποτελούν και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε κοπτικού εργαλείου. Το επιλεγόμενο βάθος κοπής για κάθε κατεργασία αποτελεί επίσης σημαντική παράμετρο που ανήκει στις συνθήκες κοπής.

Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η κοπή, καταναλίσκεται σε δύο βασικά περιοχές, στη ζώνη διατμήσεως και στη ζώνη τριβής. Πολύ λιγότερη ενέργεια καταναλίσκεται στη θέση τριβής της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου και της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου. Όλες αυτές οι περιοχές ανάλωσης ενέργειας, αποτελούν και πηγές έκλυσης θερμότητας.

Η παραγόμενη αυτή θερμότητα κατά την κοπή, παράγεται κατά κύριο λόγο στην ζώνη διατμήσεως και κυμαίνεται σε ποσοστό 65% έως 80 %. Η υπόλοιπη θερμότητα παράγεται στην ζώνη τριβής του αποβλίττου, πάνω στο κοπτικό εργαλείο, αλλά και στην θέση που εφάπτεται η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου με το τεμάχιο. Η συνολική θερμότητα που παράγεται, παραλαμβάνεται από το απόβλιττο κατά κύριο λόγο, από το κοπτικό εργαλείο και από το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Οι βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές (αυτές δηλαδή που μπορούν να αλλάξουν άμεσα) στην διαδικασία κοπής είναι οι παρακάτω:

- ✚ Το υλικό του κοπτικού εργαλείου.
- ✚ Το σχήμα του κοπτικού εργαλείου, η ποιότητα της επιφάνειας του, καθώς και η οξύτητα του.
- ✚ Το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου καθώς και η θερμοκρασία.
- ✚ Οι συνθήκες κοπής, όπως η ταχύτητα, το βάθος κοπής και η πρόωση.
- ✚ Η χρήση υγρών κοπής.
- ✚ Τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής, όπως η στιβαρότητα κλπ.
- ✚ Οι μηχανισμοί συγκράτησης του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου.

Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι αυτές που επηρεάζονται από πιθανές αλλαγές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Αυτές είναι:

- ✚ Ο τύπος του αποβλήτου που παράγεται.
- ✚ Οι δυνάμεις και η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διαδικασία της κοπής.
- ✚ Η αύξηση της θερμοκρασίας στο ως προς κατεργασία τεμάχιο, στο απόβλητο, και το κοπτικό εργαλείο.
- ✚ Η φθορά και η καταστροφή του κοπτικού εργαλείου.
- ✚ Η ποιότητα της επιφάνειας που προκύπτει μετά την κατεργασία

Το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή, υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Αυτό έχει σαν συνέπεια το κοπτικό εργαλείο σταδιακά να φθείρεται και τελικά να αστοχεί, που σημαίνει πως είναι πλέον άχρηστο και πρέπει να επανατροχιστεί ή να απορριφθεί. Η φθορά που αναπτύσσεται παρουσιάζεται με τις παρακάτω μορφές :

- φθορά της ελεύθερης επιφάνειας
- φθορά κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίττου
- απολέπιση της κόψης
- μικροθραύσεις, ρωγμές

Οι μηχανισμοί βάσει των οποίων εξελίσσεται η φθορά στα κοπτικά εργαλεία είναι οι εξής :

- σχηματισμός και λύση συγκολλητών δεσμών : Οι δεσμοί αυτοί δημιουργούνται λόγω της τριβής μεταξύ αποβλίττου και εργαλείου ή εργαλείου και τεμαχίου. Ο διαρκής σχηματισμός και καταστροφή των δεσμών αυτών κατά την διάρκεια της κοπής, έχει σαν συνέπεια την απόσπαση μικρών τεμαχίων από το εργαλείο προς το απόβλιττο ή το τεμάχιο αντίστοιχα.

- απόξεση : Σκληρά τεμαχίδια του αποβλίττου κινούμενα και συγχρόνως πιεζόμενα πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, την φθείρουν συνεχώς, εκτελώντας κοπή σε μικρή κλίμακα. Τα τεμαχίδια αυτά μπορεί να προέρχονται και από μικρά κομμάτια της ψευδόκοψης.

- διάχυση στερεάς κατάστασης : Άτομα από το υλικό του κοπτικού εργαλείου, διαχέονται προς το απόβλιττο ή το τεμάχιο, λόγω της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών για διάχυση που προσφέρουν οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η μεταλλική επαφή του εργαλείου με το απόβλιττο ή το τεμάχιο.

Συνολικά η φθορά που αναπτύσσεται στα κοπτικά εργαλεία είναι συνήθως προϊόν και των τριών προαναφερομένων μηχανισμών. Έτσι ενώ σε χαμηλές ταχύτητες κοπής και προώσεις, άρα και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, η φθορά ακολουθεί κυρίως τους μηχανισμούς της απόξεσης (μέσω της ύπαρξης της ψευδόκοψης) και της φθοράς λόγω σχηματισμού και λύσης συγκολλητών δεσμών (μέσω της τριβής εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου), όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής και η πρόωση, άρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες, η φθορά ακολουθεί κυρίως τον μηχανισμό της διάχυσης στερεάς κατάστασης ενώ παρουσιάζεται και οξείδωση του κοπτικού εργαλείου. Σε υψηλές θερμοκρασίες η

φθορά που οφείλεται σε απόξεση είναι ελάχιστη λόγω της ελάττωσης του φαινομένου της ψευδόκοψης στις ταχύτητες αυτές².

Τα κοπτικά εργαλεία θα πρέπει να κατέχουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να παράγουν τεμάχια με επιφάνειες καλής ποιότητας και με όσο το δυνατό μικρότερο τελικό κόστος. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα πρέπει να είναι :

✚ Σκληρότητα: ειδικά στις υψηλές θερμοκρασίες (σκλήρυνση εν θερμώ), ώστε η σκληρότητα και η αντοχή του εργαλείου να διατηρούνται στις υψηλές θερμοκρασίες κατά την κοπή. Το εργαλείο πρέπει να είναι σκληρότερο από το σκληρότερο συστατικό του υλικού που κατεργάζεται, όχι μόνο σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά και στις πραγματικές συνθήκες κοπής. Η υψηλή σκλήρυνση εν θερμώ αποτρέπει την πλαστική παραμόρφωση, εξασφαλίζει την διατήρηση της γεωμετρίας του εργαλείου κοπής κάτω από τις ακραίες συνθήκες κατά τον σχηματισμού αποβλήτου, και βοηθά επίσης στην αντίσταση σε φθορά.

✚ Ανθεκτικότητα: έτσι ώστε οι μεταβαλλόμενες δυνάμεις που δέχεται το εργαλείο σε διακεκομμένες κοπές, να μην προκαλέσουν απότομη θραύση του εργαλείου. Η ανθεκτικότητα είναι απαραίτητη έτσι ώστε το εργαλείο να αντεπεξέρχεται των μηχανικών κλονισμών στις διαδικασίες διακοπτόμενης κοπής. Οι κλονισμοί εμφανίζονται ακόμα και στις διαδικασίες σχηματισμού συνεχούς αποβλήτου, όταν το εργαλείο αντιμετωπίσει κάποιο σκληρό σημείο.

✚ Αντοχή σε φθορά: ώστε η διάρκεια ζωής του να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα προτού το εργαλείο θα πρέπει να αλλαχθεί.

✚ Χημική σταθερότητα: ή χημική αδράνεια, ώστε να αποφεύγονται οι αντιδράσεις μεταξύ των υλικών του εργαλείου και του τεμαχίου οι οποίες συνηγορούν στην φθορά του πρώτου.

² Ελένη Γιαννούλη, Περικλής Ακρίβος , Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Χημείας, Θεσσαλονίκη , ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ,2011

✚ Παραδεκτό κόστος: κτήσεως και διαθεσιμότητα χωρίς να επιβαρύνει σε μεγάλο ποσοστό το συνολικό τελικό κόστος άλλα και να καθιστά την κατεργασία αποδοτική.

Αναλυτικότερα, οι κατηγορίες αποβολή υλικού παρουσιάζονται παρακάτω:

❖ Τόρνευση

Είναι κατεργασία κοπής με κύρια κίνηση την περιστροφική κίνηση της ατράκτου, όπου προσδένεται κατάλληλα το ΤΕ, και δευτερεύουσα τη μεταφορική κίνηση της πρόωσης (κίνηση του ΚΕ), εκτελείται δε με ΚΕ καθορισμένης γεωμετρίας και απλής σημειακής επαφής.

ΕΙΔΗ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ

A. Ανάλογα με τη διάταξη του άξονα τόρνευσης:

- Οριζόντια (οριζόντιος άξονας)
- Κατακόρυφη (κατακόρυφος άξονας).

B. Ανάλογα με τη θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας:

- Εξωτερική
- Εσωτερική.

Γ. Ανάλογα με την αμοιβαία σχέση κύριας και δευτερεύουσας κίνησης:

• Διαμήκης τόρνευση, με κίνηση πρόωσης παράλληλη προς τον άξονα τόρνευσης

• Εγκάρσια τόρνευση, με κίνηση πρόωσης κάθετη προς τον άξονα τόρνευσης., η οποία διακρίνεται με τη σειρά της σε:

- Μετωπική
- Ακτινική (τόρνευση αποκοπής και τόρνευση μορφής

- Κωνική τόννευση, με την διεύθυνση της κίνησης πρόωσης να τέμνει τον άξονα τόννευσης

Δ. Ειδικές τριβές

- Σπειροτόμηση (εξωτερική ή εσωτερική).

- Τόννευση με πολλά ΚΕ, είτε με διαιρούμενη πρόωση, είτε με διαιρούμενο βάθος κοπής.

- ❖ Φρεζάρισμα

- ❖ Διάτρηση

- ❖ Πλάνιση

- ❖ Λείανση

Η λείανση ορίζεται ως η αφαίρεση υλικού με χρήση λειαντικού τροχού από κόκκους σκληρού υλικού που συγκρατούνται από συνδετικό υλικό. Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη διεργασία αποπεράτωσης και χρησιμοποιείται ευρέως όταν:

- □ Το υπό επεξεργασία υλικό παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα
- □ Το υπό επεξεργασία υλικό παρουσιάζει μεγάλη ψαθυρότητα
- □ Η επιθυμητή επιφανειακή ποιότητα είναι υψηλή
- □ Η επιθυμητή διαστασιακή ακρίβεια είναι υψηλή³

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασιών με αποβολή υλικού προέκυψαν από την εξέλιξη της τεχνολογίας στις κατασκευές. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη της

³Ελένη Γιαννούλη, Περικλής Ακρίβος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Χημείας, Θεσσαλονίκη, ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, 2011

αεροναυπηγικής, της βιοιατρικής και της μικροτεχνολογίας συνέβαλλε στην εισαγωγή και χρήση των μη συμβατικών κατεργασιών.

Οι μη συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού χρησιμοποιούν διάφορες μορφές ενέργειας και στηρίζονται σε διάφορους μηχανισμούς αποβολής υλικού.

Ταξινομούνται ως εξής:

- Μηχανικές κατεργασίες

Εδώ περιέχονται:

1. Κοπή με δέσμη ύδα
2. κοπή με επενδυμένα εκρηκτικά
3. κοπή με δέσμη λειαντικών κόκκων
4. κατεργασίες αποπεράτωσης
5. κοπή με υπερήχους

- Θερμικές ή Θερμοηλεκτρικές κατεργασίες

- ✓ Ηλεκτροδιάβρωση
- ✓ Κοπή με Laser
- ✓ Κοπή με δέσμη ηλεκτρονίων
- ✓ Κοπή με δέσμη πλάσματος

- Χημικές ή Ηλεκτροχημικές κατεργασίες

- ✓ Ηλεκτροχημική κοπή
- ✓ Ηλεκτροχημική λείανση
- ✓ Χημική κοπή⁴

⁴ Μαμαλη Γ. Αθανασίου, τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000, Αθήνα

Η αποβολή υλικού αφορά είτε την κοπή είτε τη διάτρηση είτε τη λείανση. Στη συγκεκριμένα εργασία θα παρουσιάσουμε τις μη συμβατικές κατεργασίες μετάλλων με αποβολή υλικού και θα εστιάσουμε στις θερμικές κατεργασίες και στις μεθόδους αποβολής υλικού που περιλαμβάνουν.

2.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) είναι μια διαδικασία ελεγχόμενης αφαίρεσης που χρησιμοποιείται προς απομάκρυνση μετάλλου μέσω ηλεκτρικής διάβρωσης σπινθήρα. Σε αυτή τη διαδικασία ένας ηλεκτρικός σπινθήρας χρησιμοποιείται ως εργαλείο κοπής για να διαβρώσει το τεμάχιο ώστε να παραχθεί το τελικό τμήμα στο επιθυμητό σχήμα.

Η διάβρωση των μετάλλων με ηλεκτρικούς σπινθήρες παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Joseph Priestley το 1768, ενώ πέρασαν περισσότερα από εκατό χρόνια μέχρι να προκύψει κάποια πρακτική χρήση του φαινομένου αυτού. Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις με τη μορφή σπινθήρων άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κάποιων έμμεσων προϊόντων και συγκεκριμένα την παραγωγή κολλοειδών διαλυμάτων μέσω της αποσύνθεσης διαφόρων μετάλλων.

Οι σπινθήρες όμως δεν χρησιμοποιούνταν σε κάποια κατεργασία μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '30, οπότε και εισήχθησαν τα μηχανήματα αφαίρεσης σπασμένων κοπτικών από ηλεκτρικά τρυπάνια και άλλα κοπτικά εργαλεία⁵.

Συνεχίζοντας την έρευνα του Priestley, το 1943 στο πανεπιστήμιο της Μόσχας, δύο Ρώσοι επιστήμονες, το ζεύγος B.R. Lazarenko και N.I. Lazarenko εφηύραν την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση. Ξεκινώντας από τη μελέτη της φθοράς των ηλεκτρικών διακοπών, έφτασαν στο συμπέρασμα ότι οι εφαρμογές ηλεκτρικών εκκενώσεων και του παραγόμενου σπινθήρα, μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την

⁵ Malhotra, N., Rani, S., Singh, H., (2008), ‘‘Improvements in Performance of EDM – A Review’’, IEEE Southeastcon Conference, Conference Publications, pp. 599-603

κατεργασία προσφάτως κατασκευασμένων ,νέων μετάλλων και κραμάτων, τα οποία αποδεικνύονταν δύσκολα στη μορφοποίηση από τις υπάρχουσες μεθόδους.

Ένα χρόνο αργότερα οι Lazarenkos κατάφεραν να παρουσιάσουν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα κατεργασίας μετάλλων με ηλεκτροδιάβρωση, ενώ την δεκαετία του '50 σημειώθηκε πρόοδος στην σταθεροποίηση του φαινομένου της διάβρωσης.

Η πρώτη βρετανική σχετική πατέντα κατατέθηκε από τον Rudoff το 1950 και περίπου την ίδια περίοδο παρουσιάστηκαν αντίστοιχες πατέντες στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ελβετία. Την ίδια χρονιά χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά γεννήτρια τύπου αντίστασης –πυκνωτή στην ηλεκτροδιάβρωση που αργότερα καθιερώθηκε σαν μοντέλο για την επιτυχή εξέλιξη της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση. Το 1952 η κατασκευαστική Charmilles, μια από τις πρωτοπόρους και μεγαλύτερες εταιρείες το χώρου, δημιούργησε την πρώτη εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης που παρουσιάστηκε στην ευρωπαϊκή έκθεση εργαλειομηχανών το 1955.

Στη δεκαετία του '60, η ανάπτυξη των ημιαγωγών έδωσε ώθηση και στην βελτίωση της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση. Σήμερα η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, έχει αναπτυχθεί σε βαθμό που να κατέχει ένα σεβαστό μερίδιο της παραγωγής σε παγκόσμιο επίπεδο. Το μεγάλο ενδιαφέρον των ερευνητών και ολοένα αυξανόμενες ανάγκες για καλύτερα προϊόντα, εξελίσσουν συνεχώς την ηλεκτροδιάβρωση, δημιουργώντας νέες εφαρμογές και παραλλαγές της μεθόδου.

Έτσι αναπτύχθηκε κυρίως η ηλεκτροδιάβρωση σε βυθιζόμενη μήτρα, αλλά παράλληλα η ηλεκτροδιάβρωση με σύρμα και οι εργαλειομηχανές για πιο εξειδικευμένες κατεργασίες, όπως η διάνοιξη μικροοπών⁶.

2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ

Η διαδικασία αφαίρεσης μετάλλου πραγματοποιείται με την εφαρμογή ενός παλλόμενου ηλεκτρικού φορτίου ρεύματος με υψηλή συχνότητα διαμέσου του ηλεκτροδίου στο τεμάχιο. Αυτό αφαιρεί πολύ μικρά τεμάχια μετάλλου από το

⁶<http://www.automationmag.com/images/stories/LWTechfiles/91%20Electrical%20Discharge.pdf>

τεμάχιο εργασίας με ελεγχόμενο ρυθμό. Με τη διαδικασία EDM τόσο το υλικό του τεμαχίου όσο και το ηλεκτρόδιο

πρέπει να είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού.

Η διαδικασία EDM μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

✓ Την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του «εργαλείου»- ηλεκτροδίου στο κατεργάσιμο τεμάχιο. Το διαμορφωμένο ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται κάθετα προς τα κάτω και το αντίστροφο σχήμα του ηλεκτροδίου διαβρώνεται (καίγεται) εντός του στερεού τεμαχίου.

✓ Την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί με μεταλλικό αγωγίμο σύρμα.

Το υλικό του μηχανισμού διάβρωσης κάνει χρήση κυρίως της ηλεκτρικής ενέργειας και την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια μέσα από μια σειρά διακριτών ηλεκτρικών εκκενώσεων που συμβαίνουν μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου. Η θερμική ενέργεια που παράγει ένα κανάλι πλάσματος μεταξύ της καθόδου και ανόδου σε μία θερμοκρασία σε κλίμακα από 8.000 έως 12.000 °C έως 20000 °C, αποτελεί το αρχικό ποσό της θέρμανσης και της τήξης του υλικού στην επιφάνεια κάθε πόλου. Όταν η παλλόμενη θερμοκρασία συνεχούς ρεύματος εμφανίζεται σε ποσοστό περίπου 20.000-30.000 Hz τότε είναι απενεργοποιημένη και το κανάλι πλάσματος καταρρέει. Αυτό προκαλεί μία ξαφνική μείωση της θερμοκρασίας που επιτρέπει να ξεπλύνετε το τηγμένο υλικό από τον πόλο που αντιμετωπίζει τη μορφή μικροσκοπικών θραυσμάτων.

Αυτή η διαδικασία της τήξης και εξάτμισης υλικού από την επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας είναι σε πλήρη αντίθεση με την μη συμβατική μέθοδο κατεργασίας. Ο όγκος του υλικού που απομακρύνεται κυμαίνεται τυπικά στην περιοχή από 10^{-6} - 10^{-4} mm και η απόδοση αφαίρεσης υλικού (MRR) είναι συνήθως και 400 mm / Min ανάλογα με τις ειδικές εφαρμογές κατιόντων.

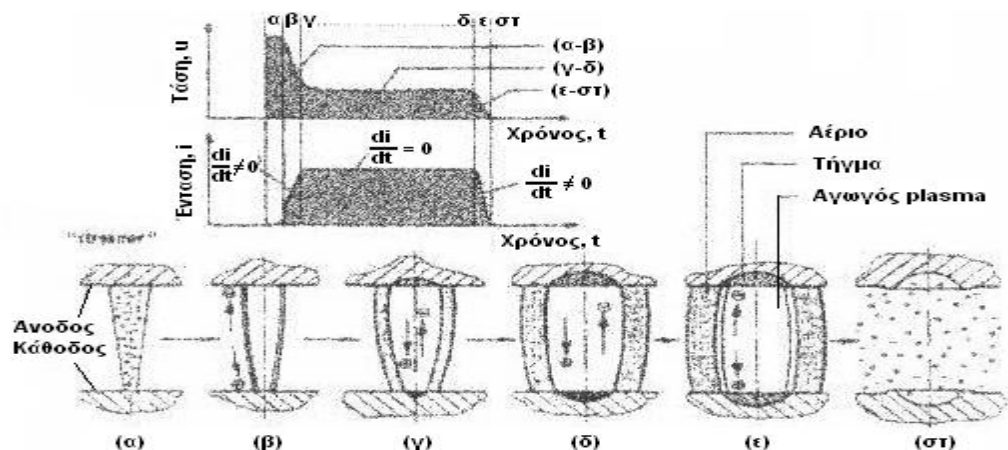
Δεδομένου ότι το διαμορφωμένο ηλεκτρόδιο ορίζει την περιοχή στην οποία θα συμβεί η διάβρωση, η ακρίβεια του μέρους που έχει παραχθεί μετά από την EDM είναι αρκετά υψηλή. Μετά από όλα, EDM είναι μια αναπαραγωγική διαδικασία

μορφοποίησης στην οποία η μορφή του ηλεκτροδίου αντικατοπτρίζεται στο κομμάτι
7.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΤΕΡΑ

Ο ακριβής μηχανισμός αποβολής υλικού με τον οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία είναι ο ακόλουθος. Οι διάφορες φάσεις κατά τις οποίες πραγματοποιείται η εκκένωση και η αποβολή υλικού, φαίνονται σχηματικά στο Σχήμα 2.1, όπου παρουσιάζεται και η μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης και της έντασης του ρεύματος εκκένωσης σε σχέση με τη χρονική διάρκειά τους.

Εικόνα 1: Διαδικασία αποβολής υλικού



Πηγή: Malhotra, N., Rani, S., Singh, H., 2008

Κατά την έναρξη της εκκένωσης υπάρχει μια ταχεία μεταβολή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και δημιουργείται ένας έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης από τη διάσπαση του διηλεκτρικού (βλ. Σχήμα 2.1-α). Με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα του διηλεκτρικού κινούνται προς την κατεύθυνση της αντίθετης πολικότητας ηλεκτροδίων (βλ. Σχήμα 2.1-β). Τα πολύ γρήγορα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με μόρια του διηλεκτρικού, επιταχύνονται, συγκρούονται και πάλι με μόρια και, από την αλυσιδωτή αυτή αντίδραση, δημιουργείται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ο αγωγός εκκένωσης (βλ. Σχήμα 2.1-γ). Σύμφωνα με άλλες θεωρίες, ο μηχανισμός διάσπασης

⁷ Malhotra, N., Rani, S., Singh, H., (2008), ‘‘Improvements in Performance of EDM – A Review’’, IEEE Southeastcon Conference, Conference Publications, pp. 599-603

πραγματοποιείται από την αναπτυσσόμενη θερμότητα που έχει ως συνέπεια την εξάτμιση του διηλεκτρικού μέσου.

Ο έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης επιτρέπει τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης έντασης. Η εκλυόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εκκένωση μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, που έχει ως αποτέλεσμα να αρχίζει η τήξη και η ακαριαία εξάτμιση ορισμένου όγκου υλικού από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων (βλ. Σχήμα 2.1-δ). Η ένταση του ρεύματος εκκένωσης αποκτά τότε τη μέγιστη τιμή της. Δημιουργείται στο χώρο της εκκένωσης ένας αγωγός πλάσματος (ιονισμένο αέριο μεγάλης θερμοκρασίας 8000-12000°K), που αποτελείται από θετικά φορτισμένα ιόντα μετάλλου και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια από την εξάτμιση των υλικών των ηλεκτροδίων και από ουδέτερα μεταλλικά άτομα⁸.

Στις επόμενες φάσεις, η ένταση του ρεύματος εκκένωσης παραμένει χρονικά σταθερή ενώ στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ένας ορισμένος όγκος μετάλλου τήκεται ή εξατμίζεται ακαριαία σχηματίζοντας ένα νέφος αερίου υψηλής πίεσης (της τάξης αρκετών εκατοντάδων ατμοσφαιρών) και δημιουργείται ένας κρατήρας. Ο αγωγός πλάσματος και το νέφος του αερίου αυξάνονται σταθερά.

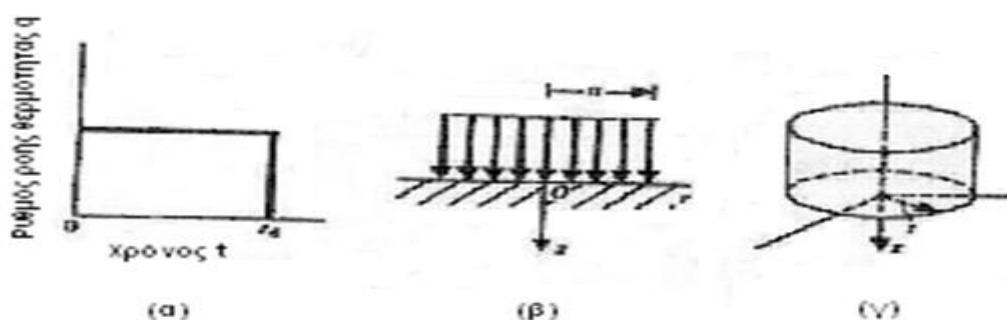
Με διακοπή της ηλεκτρικής τάσης, βλ Σχήμα 2.1 (ε), η πίεση του νέφους μειώνεται απότομα, ο αγωγός πλάσματος και το νέφος διασπώνται και το, εν μέρει ρευστό εν μέρει εξαερωμένο, υλικό απομακρύνεται υπό σφαιροειδή μορφή από τον κρατήρα μέσω του διηλεκτρικού υγρού, (βλ Σχήμα 2.1-στ). Ο όγκος του υλικού που αφαιρείται από το εργαλείο και το κατεργασμένο τεμάχιο σε μια εκκένωση δεν είναι ο ίδιος. Εξαρτάται κυρίως από την πολικότητα και τις ιδιότητες του υλικού των ηλεκτροδίων καθώς επίσης από τη διάρκεια και το ρεύμα εκκένωσης (βλ. Σχήμα 2.2). Με κατάλληλη επιλογή του υλικού του εργαλείου- ηλεκτροδίου και με αλλαγή των παραμέτρων εκκένωσης όπως της ενεργού επιφάνειας του εργαλείου (βλ. Σχήμα 2.3), μπορεί να επιτευχθεί μια σημαντική ασυμμετρία, π.χ. 99,5% αφαίρεση του υλικού στο τεμάχιο- ηλεκτρόδιο και 0,5% εργαλείο- ηλεκτρόδιο.

⁸ Μαμαλη Γ. Αθανασίου, τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000, Αθήνα, σελ.222-227

Μια ακριβής μαθηματική σχέση του μηχανισμού αποβολής δεν είναι μέχρι τώρα γνωστή, ενώ, μια πρώτη προσέγγιση των πολύπλοκων φαινομένων που υπεισέρχονται μπορεί να γίνει με το μοντέλο της θερμικής πηγής. Η θεωρία αυτή συσχετίζει τον όγκο που αποβάλλεται κατά τη διάρκεια απλής εκκένωσης με τις παραμέτρους κατεργασίας και στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Ο σπινθήρας / εκκένωση θεωρείται ομοιόμορφη κυκλική πηγή θερμότητας με σταθερή διάμετρο.
- Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου θεωρείται ημίαπειρο μέσο και εκτός από το τμήμα που καλύπτει η θερμική πηγή, είναι μονωμένο.
- Ο ρυθμός της ροής της θερμότητας παραμένει σταθερός καθ'όλη τη διάρκεια της εκκένωσης.
- Οι ιδιότητες των υλικών δεν αλλάζουν με τη θερμοκρασία.
- Αγνοούνται τα φαινόμενα ατμοποίησης⁹.

- **Εικόνα 2: Απλοποιημένο μοντέλο θερμικής πηγής για την ηλεκτροδιάβρωση**



Πηγή: Μαμαλη Γ. Αθανασίου, τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000

Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός αποβολής υλικού από την κάθοδο είναι μικρότερος από αυτόν της ανόδου για τους εξής λόγους:

1. Η ενέργεια σύγκρουσης των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο είναι πολύ μεγαλύτερη της αντίστοιχης των ιόντων

1. Από την πυρόλυση του διηλεκτρικού, σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα άνθρακα το οποίο προστατεύει την κάθοδο.

2. δυνάμεις συμπίεσης αναπτύσσονται στην κάθοδο σε μεγαλύτερο ποσοστό¹⁰.

⁹ Μαμαλη Γ. Αθανασίου, τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000, Αθήνα, σελ.222-227

➤ Λείανση με ηλεκτροχημική διάβρωση

Η μέθοδος αυτή είναι συνδυασμός της ηλεκροχημικής λείανσης και της ηλεκτροδιάβρωσης. Ο τροχός κατασκευάζεται είτε από γραφίτη είτε από ορείχαλκο και δεν περιέχει κόκκους λειαντικού υλικού. Μεταξύ του τροχού και του κομματιού κυκλοφορεί ηλεκτρολύτης υψηλής αγωγιμότητας (υδατικό διάλυμα ανόργανων αλάτων, π.χ. KNO_3 , Na_2CO_3), η χημική δράση του οποίου προκαλεί αφαίρεση υλικού. Επίσης μεταξύ του κομματιού και του περιστρεφόμενου τροχού εφαρμόζεται ή εναλλασσόμενη τάση ή παλμοί συνεχούς ρεύματος. Οι δημιουργούμενοι σπινθήρες θραύουν τα προϊόντα της χημικής δράσης και αυτά πλέον απομακρύνονται με τη ροή του ηλεκτρολύτη. Η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη απ' ό τι στην ηλεκτροδιάβρωση, όμως και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι σημαντικά υψηλότερος. Χρησιμοποιείται για τη κατεργασία αντικειμένων λεπτών μορφών, τυπικά, για χειρουργικά εργαλεία, βελόνες κλπ.

➤ Διάτρηση με ροή ηλεκτρολύτη

Η κατεργασία αυτή αναπτύχθηκε αρχικά από τη General Electric και τη Rolls Royce με πρωταρχικό σκοπό τη διάνοιξη οπών ψύξης μεγάλου βάθους και μικρής διαμέτρου, σε πτερύγια τουρμπινών και συμπιεστών μηχανών αεροσκαφών. Το εργαλείο είναι γυάλινος σωλήνας και ο ηλεκτρολύτης υδατικό διάλυμα (15-20% κ.β.) οξέως (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl) σε θερμοκρασία 20-40 °C και πίεση 250-400 kPa. Η διαφορά από την απλή ηλεκτροχημική κατεργασία είναι ότι εδώ εφαρμόζεται πολύ υψηλότερη τάση και σημαντικά μικρότερη ένταση. Συνήθως το ρεύμα είναι πλήρως ανορθωμένο 600-900 V, 25 A. Το υλικό του τεμαχίου πρέπει να είναι αγωγίμο¹¹.

¹⁰ Μαμαλη Γ. Αθανασίου, τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000, Αθήνα, σελ.222-227

¹¹ El-Hofy, H., (2005), 'Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes', McGraw-Hill, pp.115-139

2.4 ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

Το ηλεκτρόδιο και το υλικό από το οποίο αποτελείται είναι κομβικής σημασίας για την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση και την αποτελεσματικότητά της. Είναι χαρακτηριστικό ότι το μεγαλύτερο μέρος του κόστους και του χρόνου που καταναλώνεται κατά την παραγωγή μητρών με ηλεκτροδιάβρωση, αφιερώνεται στην κατασκευή των ηλεκτροδίων. Το κόστος της παραγωγής τους μπορεί να αγγίξει το 50% του συνολικού κόστους της κατεργασίας.

Η κατασκευή τους συνήθως γίνεται με συμβατικές μεθόδους όπως με αποτύπωση, λείανση, εξώθηση και πιο συχνά τórνευση και φραιζάρισμα, ενώ απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι κατεργασίας που συνοδεύονται από μεγάλη σπατάλη σε υλικό, ειδικά όταν η γεωμετρία του ηλεκτροδίου είναι πολύπλοκη.

Στην επιλογή του σωστού υλικού, σημαντικό ρόλο παίζει το υλικό του τεμαχίου που θα υποστεί την κατεργασία.

Η πιο εμπορικά διαδεδομένη εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης, είναι η ηλεκτροδιάβρωση βυθιζόμενης μήτρας και το υλικό από το οποίο αποτελούνται συνήθως τα προϊόντα της κατεργασίας αυτής είναι ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαλείων, ή αλλιώς εργαλειοχάλυβας. Η πλειοψηφία των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για κατεργασίες μετάλλων, ξύλων και πλαστικών, είναι κατασκευασμένα από εργαλειοχάλυβες. Οι εργαλειοχάλυβες είναι τραχιά προϊόντα χύτευσης και πρέπει να επιδεικνύουν αντοχή σε συγκεκριμένα φορτία δυνάμεων καθώς και σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Αντίστοιχα προϊόντα κατασκευάζονται συχνά και από κράματα ταχυχάλυβων που περιέχουν μολυβδένιο και βολφράμιο, και έχουν μεγάλη σκληρότητα που μπορούν να τη διατηρήσουν σε θερμοκρασίες μέχρι και 540 °C. Η μεγαλύτερη μερίδα των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές κατεργασίες κοπής είναι κατασκευασμένα από αυτά τα υλικά.

Ωστόσο υπάρχουν τέσσερα βασικά κριτήρια, τα οποία εξασφαλίζουν σε κάθε περίπτωση, πολύ υψηλή απόδοση στην κατεργασία. Τα κριτήρια αυτά είναι:

1. Υψηλό σημείο τήξης, ώστε να αυξάνεται ο χρόνος ζωής του.
2. Καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, για να αυξάνει την παραγωγικότητα.
3. Ευκολία στην επεξεργασία του, με τις συμβατικές μεθόδους.
4. Χαμηλό κόστος.

Τα υλικά που πληρούν τις παραπάνω προδιαγραφές , μπορούν να παράξουν καλά αποτελέσματα επιφανειακής τραχύτητας και ως εκτούτουχρησιμοποιούνται περισσότερο στην πράξη, είναι ο γραφίτης, ο ηλεκτρολυτικός χαλκός, ο ορείχαλκος και το χυτό αλουμίνιο¹².

2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

A. Τοπολογικά.

Η ηλεκτροδιάβρωση δημιουργεί στη κατεργασμένη επιφάνεια μια πολύ χαρακτηριστική μορφή που αποτελείται από κρατήρες που είναι όλοι του ίδιου μεγέθους. Δεν παρατηρείται κάποιος προσανατολισμός στην διάταξη των κρατήρων, όπως π.χ. στα ίχνη πρόωσης στις συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες.

Το μέγεθος (διάμετρος και βάθος) των κρατήρων εξαρτάται από την ενέργεια του σπινθήρα που βέβαια εξαρτάται από τις παραμέτρους της κατεργασίας (συχνότητα, ένταση ρεύματος, διαφορά δυναμικού). Γενικά, η τραχύτητα Ra της επιφάνειας κυμαίνεται από 0,2-12,5 μm. Χαρακτηριστικό της ηλεκτροδιάβρωσης είναι ότι, όπως προκύπτει από τη τοπολογία της επιφάνειας, οι προεξοχές αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της. Έτσι, αν μετά την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, γίνει επεξεργασία της επιφάνειας με λεπτή λείανση, τότε η τραχύτητα της βελτιώνεται πολύ γρήγορα στη αρχή και μετά, όταν οι προεξοχές εξομαλυνθούν, με πολύ αργότερο ρυθμό.

Η ηλεκτροδιάβρωση δημιουργεί στη κατεργασμένη επιφάνεια μια πολύ χαρακτηριστική μορφή που αποτελείται από κρατήρες που είναι όλοι του ίδιου μεγέθους. Δεν παρατηρείται κάποιος προσανατολισμός στην διάταξη των κρατήρων, όπως π.χ. στα ίχνη πρόωσης στις συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες. Το μέγεθος (διάμετρος και βάθος) των κρατήρων εξαρτάται από την ενέργεια του σπινθήρα που βέβαια εξαρτάται από τις παραμέτρους της κατεργασίας (συχνότητα, ένταση ρεύματος, διαφορά δυναμικού). Γενικά, η 40 τραχύτητα Ra της επιφάνειας κυμαίνεται από 0,2-12,5 μm. Χαρακτηριστικό της ηλεκτροδιάβρωσης είναι ότι, όπως προκύπτει από τη τοπολογία της επιφάνειας, οι προεξοχές αποτελούν ένα μικρό

¹² Dursun, K., Cogun, C., (2008), “Use of wire bunch electrodes in electric discharge machining”, Rapid Prototyping Journal, 15/4, pp. 291-298

ποσοστό της. Έτσι, αν μετά την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, γίνει επεξεργασία της επιφάνειας με λεπτή λείανση, τότε η τραχύτητα της βελτιώνεται πολύ γρήγορα στη αρχή και μετά, όταν οι προεξοχές εξομαλυνθούν, με πολύ αργότερο ρυθμό.

B. Μεταλλογραφικά - Φυσιολογία.

Κατά τη δημιουργία του σπινθήρα, μέταλλο από την επιφάνεια του τεμαχίου λειώνει ή εξατμίζεται. Με τη ψυκτική δράση του κυκλοφορούντος διηλεκτρικού υγρού αλλά και με τη μετάδοση της θερμότητας προς το εσωτερικό του σώματος του τεμαχίου, η πήξη είναι ταχύτερη και έτσι το πάχος του επιφανειακού στρώματος που επηρεάζεται από την ηλεκτροδιάβρωση είναι πολύ λεπτό, της τάξης του 0,15 mm για ξεχονδρίσματα και 0,01 mm για φινιρίσματα.

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος μέτρησης του πάχους αυτού του επιφανειακού στρώματος είναι καθοριστική για το προσδιορισμό του και η επιλογή της θα εξαρτηθεί από την αναμενόμενη χρήση του τεμαχίου και επομένως από τη ιδιότητα εκείνη του υλικού που θα είναι πρωταρχικής σημασίας για τη συγκεκριμένη χρήση. Έτσι λοιπόν, το πάχος του επιφανειακού στρώματος μπορεί να προσδιοριστεί από μετρήσεις της σκληρότητας, υπολειπόμενων τάσεων, βάθους μεταλλογραφικών μεταβολών, κλπ.

Το επιφανειακό στρώμα που προκύπτει κατά τη κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση μπορεί να χωριστεί σε δύο υποστρώσεις, τη στρώση στερεοποίησης και τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Η στρώση στερεοποίησης έχει τη χαρακτηριστική μορφή υλικού που στερεοποιήθηκε πολύ γρήγορα, ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη έχει τη δομή ανοπτημένου ή επαναφερμένου υλικού. Προφανώς αυτά εξαρτώνται άμεσα από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου¹³.

2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ EDM

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ EDM

¹³ Wang, K., Gelgele, H.L., Wang, Y., Yuan, Q., Fang, M., (2003), "A hybrid intelligent method for modeling the EDM process", International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, pp. 995-999.

- Η σκληρότητα του υλικού δεν επηρεάζει την κατεργασία.
- Ο λόγος των γεωμετρικών στοιχείων της διανοιγόμενης οπής, δηλ. βάθος/ διάμετρο μπορεί να είναι πολύ μεγάλος.
- Μπορούν να ανοιχτούν πολλές τρύπες ταυτοχρόνως.
- Δεν υπάρχουν συνέπειες μεταλλουργικής φύσης.
- Είναι δυνατή η κατεργασία προϊόντων κονιομεταλλουργίας.
- Η διάτρηση είναι καθαρή χωρίς γρέζια.

Υπό την διαμόρφωση των εκάστοτε συνθηκών, καθορίζονται οι παράμετροι εξόδου που αποτελούν τα τρία κύρια κριτήρια για την επιτυχία της κατεργασίας:

- ❖ Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού ή MMR
- ❖ Η φθορά του ηλεκτροδίου –εργαλείου
- ❖ Η ποιότητα της επιφάνειας

Με το ρυθμό αφαίρεσης υλικού, αναφερόμαστε στο ρυθμό με τον οποίο, αφαιρείται όγκος υλικού από την επιφάνεια του υπό κατεργασία τεμαχίου. Η φθορά του εργαλείου ηλεκτροδίου, είναι η φθορά του εργαλείου που αποτελεί το ένα εκ των δύο ηλεκτροδίων και επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Η επιφάνεια του τελικού προϊόντος που θα προκύψει από την κατεργασία, πρέπει αρχικά να έχει τη ζητούμενη μορφή και ακρίβεια στις διαστάσεις της και επιπλέον να έχει την επιθυμητή ταχύτητα και ποιότητα εν γένει.

Οι κυριότερες παράμετροι του συστήματος, που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της κατεργασίας και τις συνθήκες υπό τις οποίες αυτή λαμβάνει χώρα, είναι οι εξής οκτώ:

- ✚ Πολικότητα
- ✚ Τάση ανοικτού κυκλώματος
- ✚ Ένταση εκκένωσης
- ✚ Διάρκεια παλμού
- ✚ Υλικό του ηλεκτροδίου
- ✚ Χρόνος μεταξύ δύο παλμών–χρονισμός παλμού τάσης

✚ Έλεγχος διάκενου

✚ Διηλεκτρικό και ρυθμός κυκλοφορίας

Η πολικότητα των δύο ηλεκτροδίων, δηλαδή του εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, επιλέγεται με στόχο την ελαχιστοποίηση της φθοράς του εργαλείου και την επίτευξη των απαιτούμενων λόγων διάβρωσης. Επίσης το υλικό του προς επεξεργασία τεμαχίου και το υλικό του εργαλείου, επηρεάζουν ενίοτε την επιλογή της πολικότητας.

Ο ρόλος της πολικότητας γίνεται εμφανής τη στιγμή της διάσπασης του διηλεκτρικού, με την εφαρμογή τάσης στα ηλεκτρόδια που βρίσκονται εκατέρωθεν του διάκενου. Η διαδικασία της διάσπασης, ή αλλιώς κατάρρευσης του διηλεκτρικού είναι απολύτως στοχευόμενη χωρικά, και συμβαίνει σε ένα κανάλι με ακτίνα της τάξης των 10mm περίπου. Στην περιοχή αυτή, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μεταξύ ανόδου και καθόδου, μαζί με τα ηλεκτρόνια που αποπέμπονται από την κάθοδο λόγω του

εφαρμοζόμενου πεδίου, επιταχύνονται κατευθυνόμενα προς την άνοδο. Στην πορεία τους αυτή, συγκρούονται με ουδέτερα άτομα του διηλεκτρικού, δημιουργώντας έτσι θετικά ιόντα και επιπλέον ηλεκτρόνια, τα οποία επιταχύνονται αντίστοιχα προς την κάθοδο και την άνοδο¹⁴.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ EDM

Σε ορισμένες εφαρμογές, EDM έχει αντικαταστήσει τις παραδοσιακές μηχανουργικές κατεργασίες όπως η άλεση του θερμικά επεξεργασμένου χάλυβες εργαλείων. Αλεσμένο υλικό πρέπει να είναι μέσα σε ένα δεχθεί- θέση φάσμα σκληρότητα μικρότερη από 30-35 HRC με ordi- απομειώνουν εργαλεία κοπής. Ωστόσο, EDM επιτρέπει χάλυβες εργαλείων να αντιμετωπίζονται σε πλήρη σκληρότητα πριν μεταλλοτεχνίας, αποφεύγοντας τα προβλήματα της μεταβλητότητας διαστάσεων, οι οποίες είναι χαρακτηριστικό της μετα-θεραπείας¹⁵.

¹⁴ Malhotra, N., Rani, S., Singh, H., (2008), ‘Improvements in Performance of EDM – A Review’, IEEE Southeastcon Conference, Conference Publications, pp. 603-610

¹⁵ Samuel, M.P., Philip, P.K., (1997), ‘Powder metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining’, International Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol.37, Issue 11, pp. 1625-1633

Η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση εφαρμόζεται σε πολυάριθμες περιπτώσεις, όπως στη διαμόρφωση καλουπιών σφυρηλάτησης, στη διάνοιξη οπών και εγκοπών, στη παραγωγή περυγίων για τουρμπίνες, στη διαμόρφωση εσωτερικών κοιλοτήτων πολύπλοκων μορφών, κλπ. Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού κυμαίνεται από 2-400 mm³/min. Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας εξαρτάται από τη συχνότητα των σπινθήρων και την ένταση του ρεύματος, δηλαδή από το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού δημιουργεί τραχιά επιφάνεια που, ακραία, μπορεί να πάρει την εμφάνιση τηγμένου και επαναστερεοποιημένου υλικού. Έτσι οι κατεργασίες φινιρίσματος γίνονται με χαμηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού ή γίνεται τελική επεξεργασία της επιφάνειας με άλλη μέθοδο, π.χ. λείανση¹⁶.

Σημειώνεται εδώ ότι η ηλεκτροδιάβρωση χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη κατεργασία μητρών και καλουπιών από χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Σε τεμάχια από τέτοιο υλικό, η ζώνη στερεοποίησης, έχει τη μεγαλύτερη σκληρότητα, λόγω μαρτενσιτικής δομής, ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη, αποτελούμενη από επαναφερμένο μαρτενσίτη, έχει μικρότερη σκληρότητα. Αυξημένη περιεκτικότητα του υλικού σε άνθρακα, στην επιφανειακή στοιβάδα, θα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πολύ μαρτενσίτη και κατά συνέπεια αύξηση του κινδύνου εμφάνισης ρωγμών κατά τη χρήση. Βέβαια ένα μονοφασικό υλικό ή ένα σκληρυνόμενο με κατακρήμνιση θα έχει διαφορετική συμπεριφορά¹⁷.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΒΟΛΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ LASER

Το ακρωνύμιο **LASER** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), αποτελεί μια πυκνή δέσμη ακτίνων φωτός με ενιαίο μήκος κύματος σε ορατές ή υπέρυθρες συχνότητες¹⁸. Η εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, έχει γίνει τόσο κοινή και δημοφιλής στην καθημερινή ζωή και αναφέρεται τώρα ως λέιζερ. Οι θεμελιώδεις θεωρίες του λέιζερ, η ιστορική εξέλιξη, οι αρχές λειτουργίας,

¹⁶ Marafona, J., Wykes, C., (2000), ‘‘A new method of optimizing material removal rate using EDM with copper tungsten electrodes’’, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2), pp. 153–164

¹⁷ KH Ho, ST Newman / International Journal of Εργαλειομηχανών & Παρασκευή 43 (2003) 1287-1300

¹⁸ Μαμαλη Γ. Αθανασίου, τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000, Αθήνα, σελ.245

τα χαρακτηριστικά της δέσμης καθώς και οι εφαρμογές τους έχουν γίνει αντικείμενο πολλών βιβλίων.

Τα φαινόμενα από τη χρήση του λέιζερ είναι παρόμοια με τα φαινόμενα της υπερταχείας κρούσης, δηλαδή στο σχήμα των κρατήρων που δημιουργούνται και στα φαινόμενα τήξης και αεριοποίησης των μετάλλων. Η δέσμη λέιζερ είναι ουσιαστικά ένα θερμικό εργαλείο, το οποίο μέσω της συνεκτικής εστιασμένης δέσμης μονοχρωματικού φωτός αφαιρεί, τήκει ή τροποποιεί θερμικά ένα υλικό. Οι εφαρμογές του δεν περιορίζονται στις κατεργασίες αλλά επεκτείνονται και σε άλλους τομείς της τεχνολογίας των υλικών¹⁹.

3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ LASER

Η πρώτη θεωρητική θεμελίωση του LASER δόθηκε από τον Αϊνστάιν το 1917 χρησιμοποιώντας τον νόμο της ακτινοβολίας του Plank, ο οποίος βασίστηκε σε συντελεστές πιθανοτήτων (Συντελεστές Αϊνστάιν) για την απορρόφηση και την αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ο Theodor Maiman ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να αποδείξει την ταχύτερη δυνατή πρακτική του λέιζερ το 1960, μετά τις εκθέσεις από διάφορους επιστήμονες, μεταξύ των οποίων την πρώτη θεωρητική περιγραφή για εξαναγκασμένη εκπομπή και απορρόφηση το 1928 και πειραματική επίδειξη της.

Τα πρώτα λέιζερ κατασκευάστηκαν το 1960 και τέσσερα χρόνια αργότερα ο αμερικανός φυσικός Τάουνς(Townes) και οι σοβιετικοί Μπασόφ(Basov) και Προχόροφ(Prokhorov) τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής για τις πρωτοποριακές τους έρευνες στον τομέα αυτό. Μετά το 1970, η τεχνική των λέιζερ παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη και μαζί με την μικροηλεκτρονική θεωρείται ο σημαντικότερος τομέας της σύγχρονης τεχνολογίας από την άποψη των πολυάριθμων και οικονομικά εκμεταλλεύσιμων εφαρμογών της²⁰.

¹⁹ Μαμαλη Γ. Αθανασίου, τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000, Αθήνα, σελ.245

²⁰ Wilson, J. and Hawkes, J.F.B. (eds) (1987) Lasers: Principles and Applications, Prentice Hall Publications.

3.2 ΒΑΣΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΡΧΗ ΤΟΥ LASER

Βασικά, κάθε σύστημα λέιζερ έχει ουσιαστικά ένα μέσο ενεργό, που τοποθετείται μεταξύ ενός ζευγαριού οπτικά παράλληλα με καθρέφτες απεικόνισης μετάδοσης, και μια πηγή ενέργειας για την άντληση ενεργό μέσο. Το μέσο ενημέρωσης μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο, και έχει την ιδιότητα να ενισχύει το πλάτος του κύματος φωτός περνώντας μέσα από αυτό με εξαναγκασμένη εκπομπή, ενώ η άντληση μπορεί να είναι ηλεκτρική ή οπτική. Το μέσο ενεργό χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση μεταξύ ζεύγους κατόπτρων κατά τέτοιο τρόπο ώστε το φως να ταλαντεύεται μεταξύ καθρεφτών και να περνά κάθε φορά από το μέσο και μετά την επίτευξη σημαντικής ενίσχυσης να εκπέμπει μέσω του κατόπτρου εκπομπής.

Ας εξετάσουμε ένα ενεργό μέσο των ατόμων που έχουν μόνο δύο επίπεδα ενέργειας: επίπεδο E2 και E1 επίπεδο του εδάφους. Εάν υπάρχουν άτομα στη θεμελιώδη κατάσταση, E1, είναι ενθουσιασμένοι με την ανώτερη κατάσταση, E2, μέσω οποιουδήποτε μηχανισμού άντλησης (οπτική, ηλεκτρική εκκένωση, περάσει ρεύμα, ή με βομβαρδισμό ηλεκτρονίων), στη συνέχεια, μόλις μετά από λίγες νανοδευτερόλεπτα της διέγερση τους, τα άτομα επιστρέφουν στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας φωτόνια της ενέργειας $h\nu = E2-E1$. Σύμφωνα με το 1917 τη θεωρία του Αϊνστάιν, η διαδικασία των εκπομπών μπορεί να συμβεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, είτε μπορεί να προκαλείται από φωτόνιο ή μπορεί να συμβεί αυθόρμητα.

Η πρώτη περίπτωση έχει ονομαστεί ως εξαναγκασμένη εκπομπή, ενώ η δεύτερη είναι γνωστή ως αυθόρμητη εκπομπή. Τα φωτόνια που εκπέμπονται από εξαναγκασμένη εκπομπή έχουν την ίδια συχνότητα και κατάσταση πόλωσης ως φωτόνια. Ως εκ τούτου, αν προσθέσετε στο κύμα τόνωση φωτονίων σε μια εποικοδομητική βάση, αυξάνοντας έτσι το πλάτος του να κάνει lasing. Σε θερμική ισορροπία, η πιθανότητα των διεγερμένων είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη της αυθόρμητης. Επομένως οι περισσότερες από τις συμβατικές πηγές φωτός είναι ανακόλουθες, και μόνο το λέιζερ είναι δυνατό στις συνθήκες, εκτός από τη θερμική ισορροπία²¹.

²¹ Ifflander, R. (ed.) (2001) Solid State Laser Material Processing: Fundamental Relations & Technical Realizations, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΟΥ LASER

Τα Laser διαιρούνται σε ομάδες σύμφωνα με:

- (α) την κατάσταση του ενεργού υλικού (στερεό, υγρό, αέριο, πλάσμα)
- (β) την ζώνη μήκους κύματος (ορατό, υπέρυθρο, υπεριώδες)
- (γ) τη μέθοδο διέγερσης του ενεργού υλικού (οπτική, ηλεκτρική)
- (δ) τα χαρακτηριστικά της εξερχόμενης ΗΜΑ Laser
- (ε) τον αριθμό των ενεργειακών επιπέδων που παίρνουν μέρος στη διαδικασία.

Το ενεργό υλικό καθορίζει:

1. το μήκος κύματος της εξερχόμενης δέσμης
2. τη μέθοδο διέγερσης που ενδείκνυται
3. την τάξη μεγέθους της εξερχόμενης ισχύος
4. την αποδοτικότητα του συστήματος

Το ενεργό υλικό καθορίζει πολλές ιδιότητες του Laser και επί πλέον πρέπει να είναι «διαφανές» στο μήκος κύματος που το ίδιο «παράγει».

A. Τα αέρια Laser χωρίζονται σε τέσσερις υπο-ομάδες:

- (i) ατομικά (π.χ. He-Ne και He-Cd)
- (ii) ατμών μετάλλου (Cu, Au)
- (iii) μοριακά (CO₂, N₂, χημικά, μακρινού υπέρυθρου, excimer)
- (iv) ιοντικά (Ar⁺, Kr⁺)

B. Τα υγρά Laser είναι κυρίως χρωστικών dye

Γ. Τα στερεά Laser χωρίζονται σε:

- (i) μονωτών (ρουβινίου, νεοδυμίου, αλεξανδρίτη, σαπφείρου)
- (ii) ημιαγωγών (διόδων)

Δ. Ειδικά Laser

- (i) ακτίνων X
- (ii) ελεύθερου ηλεκτρονίου

Αναλυτικότερα,

1. Laser αέριας κατάστασης

Τα περισσότερα αέρια (άτομα ή μόρια) μπορούν να οδηγηθούν σε κατάσταση κατάλληλη για εκπομπή HMA Laser, κυρίως όταν βρίσκονται υπό χαμηλή πίεση.

Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους διευκολύνει η χαμηλή πίεση είναι:

- για να είναι δυνατή η ηλεκτρική εκκένωση μακράς πορείας, κατά μήκος του σωλήνα με το ενεργό υλικό, στα δυο άκρα του οποίου εμβαπτίζονται τα δύο ηλεκτρόδια και

- για να παραχθεί ΗΜ φάσμα πολύ μικρού εύρους, το οποίο ευρύνεται όταν παρεμβάλλονται συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων²².

Το πρώτο αέριο Laser κατασκευάστηκε από τους Maiman TH και Javan A, το 1961, ήταν He-Ne, εξέπεμπε στο κοντινό υπέρυθρο (1152 nm). Το πρώτο Laser ήταν ρουβινίου και είχε κατασκευαστεί ένα χρόνο νωρίτερα. Τα αέρια Laser μπορούν να διεγερθούν με ηλεκτρική εκκένωση που προκαλείται με εφαρμογή υψηλού δυναμικού στα ηλεκτρόδια στα άκρα του σωλήνα. Ηλεκτρόνια αποσπώνται από την κάθοδο, επιταχύνονται προς την άνοδο, συγκρούονται με τα μόρια του αερίου και τους μεταδίδουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας διεγείροντάς τα (η ίδια μέθοδος χρησιμοποιείται στις λάμπες φθορισμού).

Η οπτική άντληση ως μέθοδος διέγερσης είναι δύσκολη για τα Laser αερίου. Για να απορροφηθεί αρκετό ποσό ενέργειας απαιτείται το φάσμα απορρόφησης του υλικού να είναι παρόμοιο με το φάσμα εκπομπής της πηγής. Όμως οι κοινές πηγές φωτός έχουν ευρύ φάσμα εκπομπής, ενώ τα άτομα του αερίου απορροφούν σε «λεπτές γραμμές». Γενικά η οπτική άντληση δεν επιλέγεται για τη διέγερση του ενεργού υλικού αερίων Laser. Εξάιρεση είναι η χρήση της δέσμης Laser CO₂ για την οπτική άντληση του ενεργού υλικού του μακρινού υπέρυθρου αερίου Laser²³.

➤ Αέρια ατόμων

²² Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology, CRC Press, Boca Raton, FL, Ann Arbor, MI, Boston, MA.

²³ Ifflander, R. (ed.) (2001) Solid State Laser Material Processing: Fundamental Relations & Technical Realizations, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

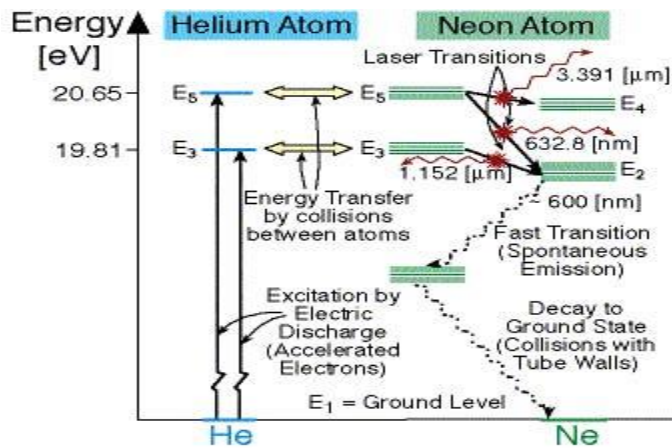
Το ενεργό υλικό είναι ένα ευγενές αέριο σε ουδέτερη κατάσταση ή ατμοί μετάλλου. Το ενεργό αέριο είναι αναμεμιγμένο με δεύτερο αέριο, που βοηθά στην αύξηση της απόδοσης της διαδικασίας. Για μεγαλύτερη ενίσχυση απαιτείται μικρή διάμετρος του σωλήνα. Τα αέρια Laser ατόμων συνήθως λειτουργούν με συνεχή τρόπο.

➤ Laser He-Ne

Ήταν το πιο διαδεδομένο Laser μέχρι πριν λίγα χρόνια που εμφανίστηκε το Laser διόδων. Το ενεργό υλικό είναι το νέον (Ne) που έχει τέσσερα ενεργειακά επίπεδα. Δύο μετασταθερά ενεργειακά επίπεδα δρουν ως άνω επίπεδα, ενώ υπάρχουν άλλα δυο που δρουν ως κάτω επίπεδα. Δηλαδή έχουμε τρία εκπεμπόμενα μήκη κύματος: λ_{54} , λ_{52} , λ_{32} .

Η παρουσία του αερίου He βοηθά για δύο κύριους λόγους:

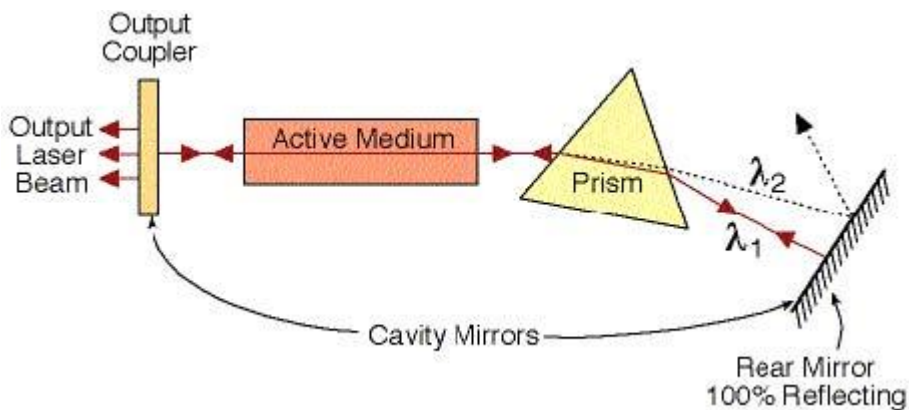
- η απευθείας διέγερση του Ne είναι πολύ λιγότερο αποδοτική σε σχέση με το He (περίπου 1:200)
 - το ενεργειακό επίπεδο 5 του ηλίου είναι πολύ κοντά στο αντίστοιχο 5 του νέου. Επομένως από την ηλεκτρική εκκένωση (περίπου 2000 V) τα αποσπώμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται κυρίως με τα άτομα He τα οποία διεγείρονται και με συγκρούσεις διεγείρουν με τη σειρά τους τα άτομα του Ne (αναλογία: He ~ 85-90%, Ne ~ 10-15%).
- **Εικόνα 3: Δομή του Laser He-Ne**



Πηγή: Ifflander, R. (ed.) (2001) Solid State Laser Material Processing: Fundamental Relations & Technical Realizations

Οι περισσότερες εφαρμογές του Laser He-Ne βασίζονται στο ορατό κόκκινο λ_{52} που έχει και τη μεγαλύτερη ένταση, η οποία θα ήταν ακόμη εντονότερη αν δεν υπήρχε η αποδιέγερση λ_{54} που μειώνει και αυτή (παράλληλα) τον πληθυσμό του E₅. Ειδική επικάλυψη των καθρεφτών προμηδοτεί την ανάκλαση των λ_{52} και απορροφά τα υπόλοιπα, έτσι ώστε να ενισχυθεί μόνο το επιλεγμένο μήκος κύματος²⁴.

Εικόνα 4: Λειτουργία του Laser He-Ne

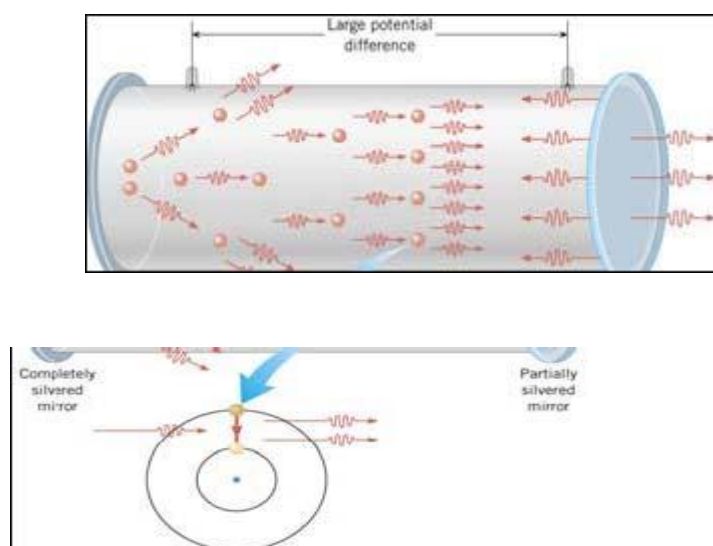


Πηγή: Ifflander, R. (ed.) (2001) Solid State Laser Material Processing: Fundamental Relations & Technical Realizations

²⁴Ifflander, R. (ed.) (2001) Solid State Laser Material Processing: Fundamental Relations & Technical Realizations, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Στο Laser He-Ne ο χρόνος ημιζωής του χαμηλού Laser ενεργειακού επιπέδου δεν είναι αρκετά σύντομος, όμως βελτιώνεται με τις συγκρούσεις. Οι συγκρούσεις πολλαπλασιάζονται όταν τα τοιχώματα του σωλήνα πλησιάζουν, επομένως η απόδοση του Laser αυξάνει όσο ο σωλήνας έχει μικρότερη διάμετρο (π.χ. 2 mm). Στο εργαστήριο έχει λειτουργήσει Laser He-Ne με ισχύ εξόδου 100 mW, όμως τα He-Ne του εμπορίου έχουν έξοδο 0,5-50 mW.

Εικόνα 5: Συγκρούσεις σωματιδίων στο Laser He-Ne



Πηγή: Ifflander, R. (ed.) (2001) Solid State Laser Material Processing: Fundamental Relations & Technical Realizations

➤ Laser ατμών μετάλλου

Διακρίνονται σε δύο είδη: (α) ουδέτερα (χαλκού Cu, χρυσού Au) και (β) ιοντισμένα (ηλίου-καδμίου He-Cd) και εκπέμπουν (με υψηλή απόδοση) ΗΜΑ ορατού με τη μορφή πυκνών παλμών.

Στο Laser ατμών μετάλλου ο σωλήνας είναι γεμάτος με ένα αδρανές αέριο (π.χ. νέον) και με μικρή ποσότητα του καθαρού μετάλλου, π.χ. χαλκού, που για να βρεθεί σε κατάσταση ατμών θα πρέπει να επικρατούν συνθήκες, πολύ υψηλής

θερμοκρασίας. Ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από υλικό ιδιαίτερα ανθεκτικό σε αυτές τις θερμοκρασίες (π.χ. αλουμίνα). Ένα κομμάτι καθαρού χαλκού εισάγεται στο μέσο του σωλήνα ο οποίος μετά γεμίζει με αέριο νέον. Εφαρμόζεται υψηλό δυναμικό στα ηλεκτρόδια στα άκρα του σωλήνα και η θερμοκρασία αυξάνει πολύ, ξεπερνώντας τους 1083 °C, σημείο τήξης του χαλκού, που αρχίζει να εξατμίζεται. Έξω από τον σωλήνα μετράται θερμοκρασία της τάξης του 1400-1500 °C.

Καθ' όλη τη διαδικασία, μικρό ποσοστό των ατόμων Cu ιοντίζεται και κινείται προς το αντίθετο ηλεκτρόδιο. Το σύνολο του ατμού ψύχεται και μετατρέπεται σε στερεό μέταλλο. Μετά από εκατοντάδες ώρες λειτουργίας το Laser πρέπει να ανανεωθεί με άλλο κομμάτι χαλκού. Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζονται παλμοί υψηλού δυναμικού και τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του αερίου Cu (το ενεργό υλικό) που διεγείρονται στα (2) επιθυμητά ενεργειακά επίπεδα. Εκπέμπονται 2 ΗΜ κύματα, ένα πράσινο ($\lambda=511$ nm) και ένα κίτρινο ($\lambda=578$ nm).

Το Laser ατμών χαλκού λειτουργεί μόνον κατά παλμούς, επειδή τα δυο χαμηλά ενεργειακά επίπεδα (μετά την εκπομπή) είναι μετασταθερά, δηλαδή έχουν μακρό χρόνο ημιζωής και λήγει πολύ σύντομα η συνθήκη της αντιστροφής πληθυσμών. Κάθε παλμός Laser διαρκεί περί τα 100 ns.

Τα Laser ατμών χαλκού βρίσκουν εφαρμογή:

- ως πηγή ενέργειας για Laser χρωστικής
- για φωτισμό αντικειμένων στη φωτογράφιση μεγάλης ταχύτητας
- στην ιατροδικαστική για ταυτοποίηση δακτυλικών αποτυπωμάτων και ανίχνευση ειδικών χημικών στοιχείων στον τόπο εγκλήματος: φωτίζεται ένα δείγμα και εξετάζεται ο φθορισμός του. Βοηθά ο ισχυρός παλμός Laser
- στη φωτοδυναμική θεραπεία: ειδικό φάρμακο χορηγείται στον καρκινοπαθή και το φως Laser καταστρέφει επιλεκτικά καρκινικά κύτταρα (όσα έχουν απορροφήσει το φάρμακο)
- στο εμπλουτισμό ουρανίου (^{235}U): το φυσικό ουράνιο περιέχει πολύ μικρή ποσότητα ^{235}U . Με το Laser χαλκού είναι δυνατός ο επιλεκτικός ιοντισμός μόνο του ^{235}U και η συλλογή του σε ηλεκτρικά φορτισμένες πλάκες.

Στο εμπόριο η ισχύς των Laser χαλκού φτάνει μέχρι 100 W, αλλά σε ειδικά εργαστήρια έχει φτάσει και 6000 W. Το Laser ατμών χρυσού έχει πολλά στοιχεία και

ιδιότητες κοινά με το Laser χαλκού. Το Laser χρυσού εκπέμπει στο κόκκινο ($\lambda=628$ nm)²⁵.

➤ **Ηλίου Καδμίου**

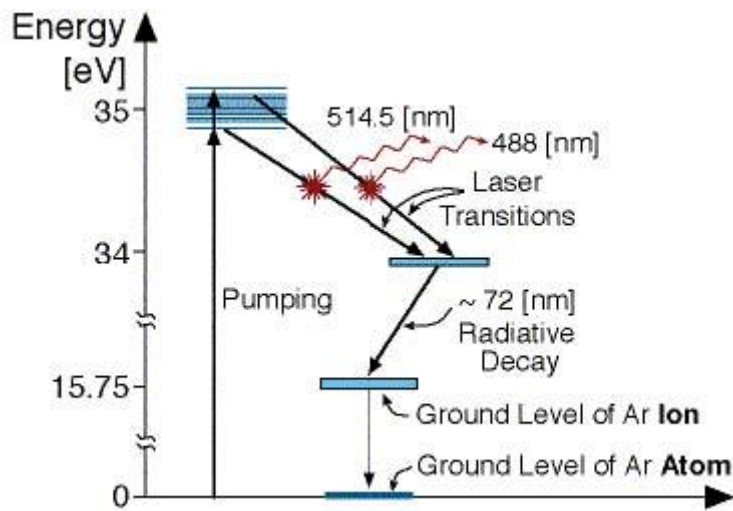
Το Laser ηλίου-καδμίου περιέχει-βασίζεται στο μέταλλο κάδμιο, η λειτουργία του όμως είναι παρόμοια με τη λειτουργία του Laser He-Ne. Τα ελαφρά ιοντισμένα άτομα καδμίου δίνουν πολλά εκπεμπόμενα μήκη κύματος Laser στην περιοχή του ιώδους και του υπεριώδους. Η κύρια εφαρμογή τους είναι στην οπτική, ειδικότερα στην ολογραφία.

➤ **Αέρια ιόντων**

Τα πιο κοινά είναι τα ιόντα των ευγενών αερίων αργόν (Ar^+) και κρυπτόν (Kr^+). Ο σωλήνας π.χ. του πρώτου περιέχει αέριο αργόν που μετατρέπεται σε πλάσμα όταν διεγερθεί. Πλάσμα είναι η κατάσταση της ύλης κατά την οποία τα ηλεκτρόνια είναι αποσπασμένα από τα άτομα ή τα μόρια και συμπεριφέρονται ως ελεύθερα. Το θεμελιώδες ενεργειακό επίπεδο του ιόντος Ar είναι ψηλότερο από το αντίστοιχο θεμελιώδες του ατόμου Ar. Η «χαμένη» αυτή ενέργεια που πρέπει να ξοδευτεί είναι η αιτία της μικρής απόδοσης του Laser Ar^+ . Τα βασικά μήκη κύματος του Laser Ar^+ είναι ένα μπλε ($\lambda=0,488$ μm) και ένα πράσινο ($\lambda=0,515$ μm), υπάρχουν όμως και δυο υπεριώδη.

Εικόνα 6: Λειτουργία των αέριων ιόντων στο Laser Ar

²⁵ Ifflander, R. (ed.) (2001) Solid State Laser Material Processing: Fundamental Relations & Technical Realizations, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.



Πηγή: Colson, W.B., Pellegrini, C., and Renieri, A. (eds) (1990) Laser Hand-book, Free-Electron Lasers,

Από τις ελκυστικές εφαρμογές του Laser Ar^+ είναι η δημιουργία οπτικών εφέ για τέχνη και διασκέδαση, επειδή ήταν το μόνο Laser με πολλά χρώματα με αξιόλογη ισχύ (μερικά W). Η συσκευή Laser Ar^+ απαιτεί μεγάλη πυκνότητα ρεύματος (100-500 A/cm²), (επομένως και στενό σωλήνα) και συνεχές δυναμικό μερικών εκατοντάδων Volts. Παράγονται μεγάλα ποσά θερμότητας, που καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη συστημάτων ψύξης και ανθεκτικών υλικών κατασκευής (οξειδίο βυρηλλίου). Όποιος δουλεύει με Laser αργού πρέπει να μην παραλείπει ειδικά μέτρα προστασίας (π.χ. ειδικά γυαλιά)²⁶.

Τα Laser Ar^+ βρίσκουν εφαρμογή:

- ως πηγή ενέργειας για Laser χρωστικής
- στη διασκέδαση (π.χ. δισκοτέκ)
- στη γενική χειρουργική (απορρόφηση ενέργειας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος)
 - στην οφθαλμολογία (στην αποκόλληση του αμφιβληστροειδή)
 - στην τοξικολογία – ιατροδικαστική (μετρήσεις με φθορισμό υλικών)
 - στην ολογραφία (επειδή έχει αρκετή ισχύ στο ορατό μέρος του φάσματος)

Το Laser Kr^+ έχει παρόμοιο τρόπο δημιουργίας και ιδιότητες, αλλά ακόμη χαμηλότερη απόδοση και ισχύ εξόδου της τάξης των 100 mW. Η κύρια εφαρμογή του

²⁶ Colson, W.B., Pellegrini, C., and Renieri, A. (eds) (1990) Laser Hand-book, Free-Electron Lasers, vol.6, North Holland, Amsterdam

είναι στη διασκέδαση (φανταστικά οπτικά εφέ στην περιοχή του κίτρινου-κόκκινου)²⁷.

➤ Αέρια μορίων

Κατά την μέχρι τώρα ανάλυση των ειδών Laser η δημιουργία της δέσμης Laser βασιζόταν στη μεταπήδηση ηλεκτρονίων μεταξύ διαφορετικών κύριων ενεργειακών επιπέδων. Στα μόρια όμως, τα κύρια ενεργειακά επίπεδα υποδιαιρούνται και σε ενεργειακά επίπεδα ταλάντωσης-δόνησης, το καθένα των οποίων υποδιαιρείται και σε ενεργειακά επίπεδα περιστροφής. Τα επίπεδα ταλάντωσης-δόνησης σχετίζονται με την ταλάντωση των ατόμων γύρω από μια θέση ισορροπίας μέσα στο μόριο. Τα επίπεδα περιστροφής σχετίζονται με την περιστροφή του μορίου στο χώρο. Εφόσον πρόκειται για υποδιαιρέσεις, οι ενεργειακές διαφορές μεταξύ τους είναι πολύ μικρότερες και το Laser που δημιουργούν έχει μεγάλο μήκος κύματος, συνήθως στην περιοχή του υπέρυθρου²⁸.

➤ Laser CO₂

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το Laser CO₂. Το CO₂ είναι το ενεργό υλικό και δω όμως προστίθενται, άλλα αέρια που αυξάνουν την αποδοτικότητα της συσκευής: N₂ (άζωτο) και He, η αναλογία των οποίων εξαρτάται από τον μηχανισμό διέγερσης και το είδος της λειτουργίας (π.χ. συνεχής).

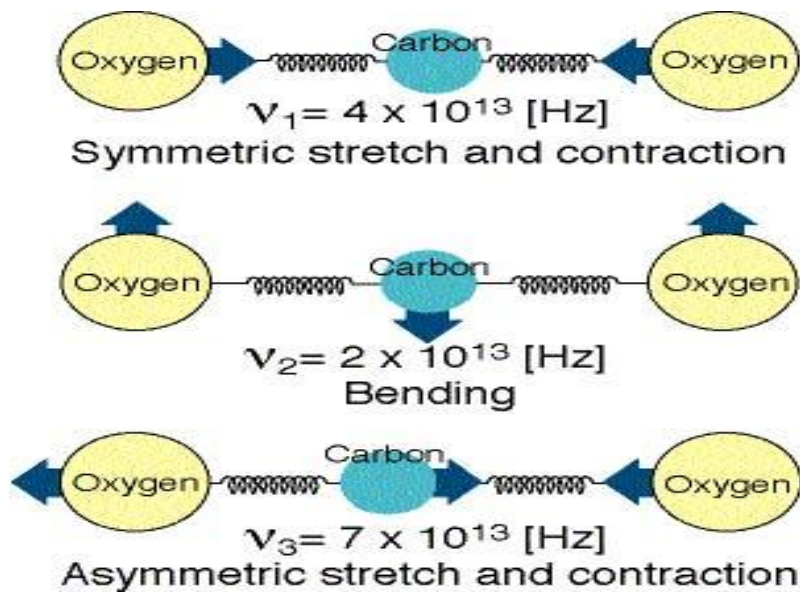
Το μόριο του CO₂ παρουσιάζει τρεις δυνατούς τρόπους ταλάντωσης-δόνησης:

- τον συμμετρικό (κατά μήκος του άξονα του επιμήκους μορίου) με συχνότητα ν_1
- τον με κάμψη (σε διεύθυνση κάθετη ως προς τον άξονα) με συχνότητα ν_2
- τον ασύμμετρο (όπως ο πρώτος τρόπος αλλά με διαφορετική κατεύθυνση) με συχνότητα ν_3

- **Εικόνα 7: Τρόποι ταλάντωσης του Laser CO₂**

²⁷ Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology, CRC Press, Boca Raton, FL, Ann Arbor, MI, Boston, MA.

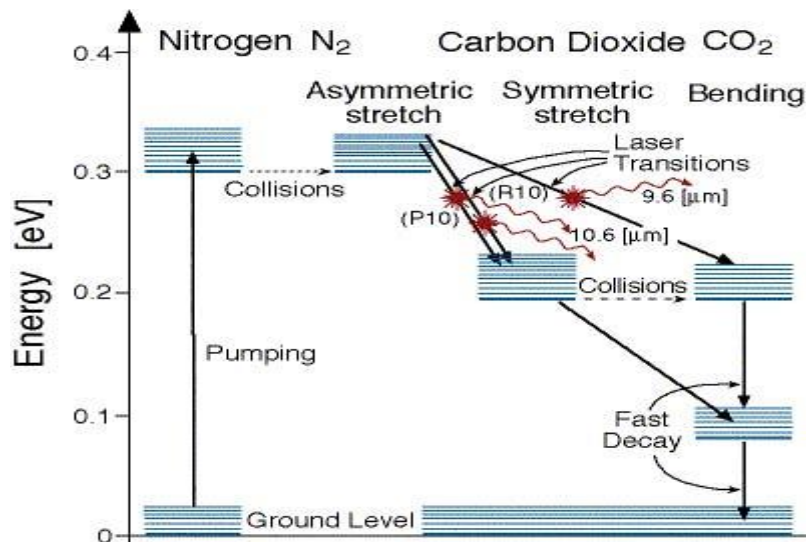
²⁸ Colson, W.B., Pellegrini, C., and Renieri, A. (eds) (1990) Laser Hand-book, Free-Electron Lasers, vol.6, North Holland, Amsterdam



Πηγή: Colson, W.B., Pellegrini, C., and Renieri, A. (eds) (1990) Laser Hand-book, Free-Electron Lasers

Η αποδιέγερση που δημιουργεί την HMA Laser, ξεκινά από υψηλό ενεργειακό επίπεδο του τρίτου τρόπου και καταλήγει σε έναν από τους άλλους δύο. Επειδή κάθε ενεργειακό επίπεδο ταλάντωσης-δόνησης υποδιαιρείται σε επίπεδα περιστροφής, οι μεταπηδήσεις είναι -κάθε φορά- πολλαπλές. Η ηλεκτρική εκκένωση στο σωλήνα του Laser CO₂ επιταχύνει ηλεκτρόνια των οποίων η κινητική ενέργεια μεταφέρεται σε συγκρούσεις στα μόρια του N₂ και του CO₂. Τα μόρια του N₂ βοηθούν τη διαδικασία διέγερσης των CO₂.

Εικόνα 8: Τα ηλεκτρόνια στη λειτουργία του Laser CO₂



Πηγή: Colson, W.B., Pellegrini, C., and Renieri, A. (eds) (1990) Laser Handbook, Free-Electron Lasers

Τυπική αναλογία αέριων όγκων: 10% CO₂, 10 % N₂ και 80% He.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι Laser CO₂:

- συνεχούς ροής/τροφοδοσίας, που επιλέγεται όταν απαιτείται ισχύς (μερικές εκατοντάδες Watts)
- σφραγισμένου αερίου, που απαιτεί την ύπαρξη καταλύτη, επειδή με το χρόνο το CO₂ διασπάται σε CO + O₂. Ισχύς < 200 Watts. Σύγχρονα Laser αυτής της κατηγορίας διεγείρονται με ραδιοκύματα και αποδεικνύονται φθηνά και αξιόπιστα.
- Έχουν κατασκευασθεί Laser CO₂ με σωλήνα διαμέτρου 1 mm, ώστε το ΗΜ κύμα να κινείται κατά μήκος του με πολύ μικρές απώλειες.

Η ροή του αερίου και η διεύθυνση της εφαρμοζόμενης υψηλής τάσης μπορεί να είναι κάθετες στον άξονα του σωλήνα, οπότε η ψύξη του μίγματος είναι αποτελεσματικότερη και η εξερχόμενη ισχύς Laser πολύ μεγαλύτερη (της τάξης των 10 kWatts), ακόμη και με μεγάλες πιέσεις των αερίων στο εσωτερικό. Η ακτινοβολία από το Laser CO₂ συνήθως είναι συνεχής²⁹.

➤ Laser N₂

²⁹ Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology, CRC Press, Boca Raton, FL, Ann Arbor, MI, Boston, MA.

Και σε αυτό το Laser, το ενεργό υλικό άζωτο μπορεί να έχει συνεχή παροχή ή μπορεί ο σωλήνας του να είναι σφραγισμένος. Διεγείρεται με ηλεκτρικό παλμό και η Laser ακτινοβολία προκύπτει από μεταπηδήσεις μεταξύ ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης. Βραχείς παλμοί υψηλής τάσης (30-40 kV) προκαλούν ηλεκτρική εκκένωση και στιγμιαία αντιστροφή πληθυσμών.

Το Laser αζώτου είναι Laser παλμών. Ο χρόνος ημιζωής του ανώτερου «Laser» επιπέδου είναι μικρότερος από τον χρόνο του κατώτερου επιπέδου. Η ενίσχυση της ακτινοβολίας μέσα στο σωλήνα είναι τόσο αποδοτική που με μήκος σωλήνα ενός μέτρου δεν θα χρειαζόταν να τον επαναδιασχίζει, δηλαδή οι καθρέφτες δεν είναι απαραίτητοι. Στην πράξη υπάρχει μόνο ο «πίσω» καθρέφτης με την 100% ανακλαστικότητα.

Το Laser N₂ εκπέμπει στην υπεριώδη περιοχή, είναι απλό και φθινό. Η ακτινοβολία του δίνει μερικά mJ ανά παλμό, με διάρκεια παλμού της τάξης των ns και πυκνότητα περίπου 1000 Hz.

Εφαρμογές του Laser N₂:

- προσφορά ενέργειας για τη διέγερση Laser χρωστικής
- φασματοσκοπία υπεριώδους
- αντοχή υλικών στη θερμότητα
- μέτρηση φθορισμού υλικών
- μέτρηση πολύ ταχέων διαδικασιών (φωτογράφιση με βραχείς παλμούς)³⁰
- **Laser (διεγερμένων) διμερών (excimer)**

Υπάρχει μια οικογένεια Laser των οποίων η ακτινοβολία εκπέμπεται από ένα μόριο με πολύ σύντομη ζωή. Αποτελείται από ένα άτομο ευγενούς αερίου (Ar, Kr, Xe) και ένα άτομο αλογόνου (F, Cl, Br, I). Το μόριο αυτό υπάρχει μόνο σε διεγερμένη κατάσταση. Όταν αποδιεγερθεί, τα άτομα διαχωρίζονται. Η διεγερμένη κατάσταση διαρκεί περίπου 10 ns. Excimer είναι ο συνδυασμός των λέξεων excited και dimmer, δηλαδή ένα μόριο, δύο άτομα, κατάσταση διεγερμένη.

Τα ευγενή αέρια είναι αδρανή και δεν συνδέονται χημικά με ίδια ή άλλα άτομα, τουλάχιστον στη θεμελιώδη κατάσταση. Αν όμως δεχθούν σημαντική ποσότητα ενέργειας και ανέβουν σε ένα διεγερμένο (ιοντισμένο) ενεργειακό επίπεδο,

³⁰ Colson, W.B., Pellegrini, C., and Renieri, A. (eds) (1990) Laser Hand-book, Free-Electron Lasers, vol.6, North Holland, Amsterdam

δημιουργούνται οι συνθήκες για συνδέσεις. Καθώς από το μόριο εκπέμπεται ακτινοβολία (Laser σε αυτές τις περιπτώσεις), τα άτομα επανέρχονται στη βασική ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή τα άτομα γίνονται πάλι ανεξάρτητα. Επομένως σαν μόριο έχει ένα διεγερμένο ενεργειακό επίπεδο με κάποιο πληθυσμό και ένα θεμελιώδες επίπεδο χωρίς καθόλου πληθυσμό. Δηλαδή, αμέσως με τη διέγερση υπάρχει και αντιστροφή πληθυσμών.

Για τη λειτουργία του Laser excimer έχει βρεθεί πως ο σωλήνας πρέπει να περιέχει:

- πολύ λίγο αλογόνο (π.χ. από HCl, NF₃)
- λίγο αδρανές αέριο (αργό, κρυπτό ή ξένο)
- σχεδόν 90% νέον ή ήλιον

Η διέγερση γίνεται με σύντομους παλμούς ηλεκτρικής ισχύος ως μερικά MW/cm³. Η απόδοση είναι σημαντική ακόμη και χωρίς καθρέφτες. Χρησιμοποιείται όμως ο 100% ανακλών πίσω καθρέφτης. Τα αέρια μέσα στο σωλήνα είναι τοξικά, άρα ο σωλήνας του Laser σφραγίζεται καλά μετά την πλήρωσή του. Το excimer Laser εκπέμπει στο υπεριώδες και μόνο με βραχύχρονους παλμούς. Η εξερχόμενη ισχύς φτάνει τα 100 W. Είναι σχετικά ακριβό. Το excimer Laser έχει συμπυκνωμένη ενέργεια και χρησιμοποιείται ως κοπτικό εργαλείο για σχεδόν όλα τα υλικά.

Έχει επίσης εφαρμογή

- στην φωτολιθογραφία (πολύ μεγάλη ακρίβεια)
- στην κοπή βιολογικού ιστού (δεν επηρεάζονται γειτονικά κύτταρα)
- στην διορθωτική της όρασης (αλλαγή της καμπυλότητας του κερατοειδή)
- σημάδεμα οποιουδήποτε υλικού (πλαστικό, γυαλί, μέταλλο) (επειδή η ακτινοβολία του μικρού μήκους κύματος απορροφάται από την ύλη)³¹.

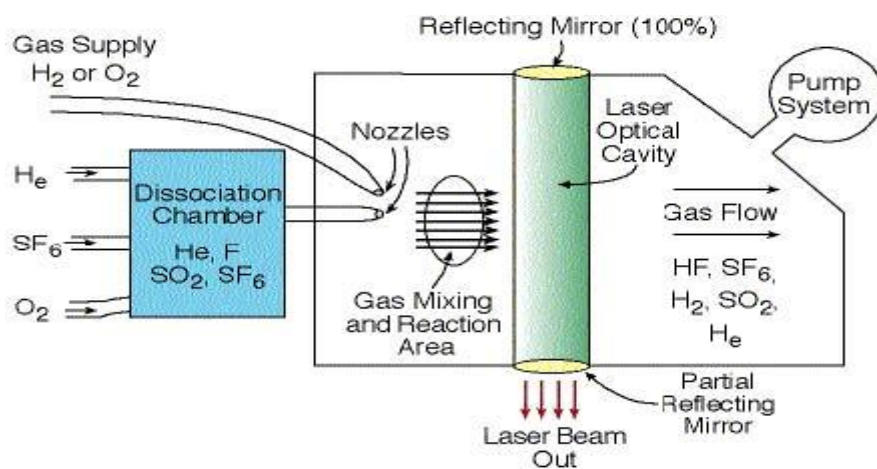
➤ Χημικό Laser

Είναι παράδειγμα συσκευής Laser της οποίας η ενέργεια για τη διέγερση του ενεργού υλικού προέρχεται από χημική αντίδραση μεταξύ δύο ατόμων. Ανήκει στην οικογένεια των δυναμικών Laser με αέριο, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στην ταχεία εκτόνωση θερμού αερίου υπό πίεση, καθώς περνά σε σχεδόν κενό θάλαμο

³¹ Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology, CRC Press, Boca Raton, FL, Ann Arbor, MI, Boston, MA.

μέσω ειδικής βελόνας. Η ταχεία εκτόνωση ψύχει το αέριο. Η εκτόνωση είναι ταχύτερη από την αποδιέγερση, επομένως μεσολαβεί κατάσταση διεγερμένων μορίων σε χαμηλή θερμοκρασία, δηλαδή συνθήκη αντιστροφής πληθυσμών. Το αέριο του σωλήνα μπορεί να περνά από πολλές βελόνες ταυτόχρονα προς τον κενό θάλαμο, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση του Laser. Οι βελόνες συνήθως τοποθετούνται στην παράπλευρη επιφάνεια του σωλήνα και με διεύθυνση κάθετη προς τον κύριο άξονα³².

Εικόνα 9: Λειτουργία χημικού Laser



Πηγή: Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers

Το ενεργό υλικό είναι διατομικό μόριο και οι μεταπηδήσεις γίνονται μεταξύ ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης. Το πιο συνηθισμένο είναι το υδροφθόριο (HF) ή σπανιότερα το φθοριούχο δευτέριο (DF) και το υδροχλώριο (HCl). Εκπέμπουν στην υπέρυθη ζώνη. Ως πηγή υδρογόνου χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες. Φθοριούχο θείο (SF₆) ή φθοριούχο άζωτο (NF₃) χρησιμεύουν ως πηγή φθορίου. Στα χημικά Laser του εμπορίου προστίθεται οξυγόνο για να αντιδράσει με το θείο και να δώσουν μόρια SO₂. Στο μίγμα προστίθεται και ήλιον, ίσως και άλλα αέρια, ανάλογα με τον συγκεκριμένο τύπο του Laser. Παρόλα αυτά, η συνολική πίεση στο εσωτερικό του Laser χαρακτηρίζεται χαμηλή.

³² Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers, Mac Millan Publishing Company, New York

Το χημικό Laser, έχει μεγάλη ισχύ στην έξοδο και γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση στο Laser DF (σε σχέση με το HF) επειδή η ατμόσφαιρα είναι πιο διαφανής στη συγκεκριμένη συχνότητα. Μειονεκτήματα είναι ότι το δευτέριο είναι ακριβό, το φθόριο αντιδρά πολύ εύκολα με άλλα μόρια και το υδρογόνο θέλει προσοχή για να μην εκραγεί. Στα χημικά Laser του εμπορίου εφαρμόζεται δυναμικό περίπου 8kV και σε μερικά προηγείται έκθεση του αερίου σε HMA υπεριώδους για να προ-ιοντιστεί και να αυξηθεί η απόδοση της συσκευής. Τα χημικά Laser βρίσκουν εφαρμογή στο στρατιωτικό πεδίο, όπως το εξελιγμένο μέσο-υπέρυθρο (MIRACL, Mid Infra Red Advanced Chemical Laser) σχεδιασμένο να καταστρέφει εχθρικούς πυραύλους στον αέρα (συνεχές Laser ισχύος μέχρι 2 MW και διάρκειας της τάξης του λεπτού). Μπορεί να ακολουθήσει τα ίχνη τους (με τη βοήθεια υπολογιστών) ακόμη και για 50 km. Ακόμη μικρότερου μήκους κύματος (~1 μm) είναι το Laser COIL Chemical Oxygen Iodine Laser) (χημικό Laser ιωδίου οξυγόνου), που χρησιμοποιείται επίσης για στρατιωτικούς σκοπούς³³.

➤ **Laser μακρινού υπέρυθρου (FIR, Far Infra Red)**

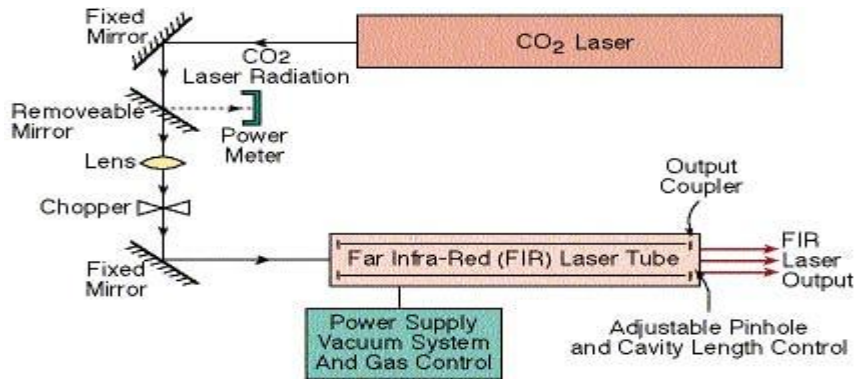
Είναι επίσης Laser αερίου και έχει μήκος κύματος μέχρι και 1000 μm (~1 mm). Οι μεταπηδήσεις συμβαίνουν μεταξύ των υπο-επιπέδων περιστροφής των μορίων του ενεργού υλικού, συνήθως του ίδιου επιπέδου ταλάντωσης-δόνησης. Το ενεργό υλικό είναι ένα απλό, οργανικό μόριο, όπως C₂H₄, CF₄, NH₃, με πολύ λεπτά ενεργειακά επίπεδα. Η αντιστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται με Laser μικρότερου μήκους κύματος, όπως το CO₂. Στο εργαστήριο μπορούν να παραχθούν χιλιάδες γραμμές (συχνότητες) FIR και η εφαρμογή τους επικεντρώνεται στην φασματοσκοπία.

Επειδή το Laser που προσφέρει την ενέργεια δρα κατά μήκος του άξονα στο σωλήνα, το υλικό του καθρέφτη στο τέλος της διαδρομής πρέπει να είναι διαφανές π.χ. στο CO₂ και μη διαφανές στο Laser του ενεργού υλικού, το οποίο παγιδεύεται και ενισχύεται μετά από πολλές εσωτερικές διαδρομές³⁴.

Εικόνα 10: Τα σωματίδια στο Laser μακρινού υπέρυθρου

³³ Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers, Mac Millan Publishing Company, New York

³⁴ Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology, CRC Press, Boca Raton, FL, Ann Arbor, MI, Boston, MA.



Πηγή: Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology

2. Laser στερεής κατάστασης

Τα άτομα στη στερεά κατάσταση βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και αλληλοεπιδρούν. Γι' αυτό το εύρος των γραμμών στα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των αερίων. Ευρύ φάσμα απορρόφησης σημαίνει πως η προσφορά ενέργειας μπορεί να γίνει από πηγή φωτός και μάλιστα όχι απαραίτητα Laser.

Το ενεργό υλικό στο Laser στερεής κατάστασης είναι ένα συγκεκριμένο υλικό, όπου όμως έχει γίνει έγχυση άλλου υλικού με τη μορφή ιόντων. Τα ιόντα του υλικού πρόσμιξης αντικαθιστούν άτομα του υλικού βάσης και είναι αυτά που παρέχουν τα κατάλληλα ενεργειακά επίπεδα για τη μεταπήδηση Laser. Το υλικό βάσης επηρεάζει λίγο το μήκος κύματος της HMA εκπομπής. Το ίδιο υλικό πρόσμιξης σε δύο διαφορετικά υλικά βάσης έχει ως αποτέλεσμα παρόμοια HMA Laser. Το υλικό βάσης καθορίζει όμως τις φυσικές ιδιότητες του ενεργού υλικού, όπως θερμοχωρητικότητα, διαστολή και επομένως τη μέγιστη δυνατή εκπεμπόμενη ισχύ.

Το στερεό ενεργό υλικό που διεγείρεται με οπτική ακτινοβολία είναι κρύσταλλος ή γυαλί, συνήθως σε σχήμα κυλινδρικό ή παραλληλεπίπεδο. Η ενέργεια εισέρχεται από την παράπλευρη επιφάνεια, ενώ η HMA Laser εξέρχεται από μια από τις βάσεις. Η προσφερόμενη ενέργεια για εκπομπή Laser με παλμούς είναι συνήθως από λάμπες ξένου ή κρυπτού χαμηλής πίεσης. Η προσφερόμενη ενέργεια για εκπομπή συνεχούς Laser είναι συνήθως από λάμπες αλογόνου ή υδραργύρου υψηλής πίεσης. Τα τελευταία χρόνια εξελίχθηκε και η τεχνολογία των Laser διόδων τα οποία έχουν

εφαρμογή και στην προσφορά ενέργειας για Laser στερεάς κατάστασης, επειδή το μήκος κύματος των Laser διόδων μπορεί να προσαρμοστεί και να ταιριάζει στο φάσμα απορρόφησης του ενεργού (στερεού) υλικού.

Laser ρουβινίου

Πρωτοκατασκευάστηκε το 1960. Το ρουβίνιο είναι ένας συνθετικός κρύσταλλος οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3) και είναι περισσότερο γνωστό ως πολύτιμος λίθος. Καλείται και σάπφειρος (ζαφείρι). Το ρουβίνιο υφίσταται έγχυση ιόντων χρωμίου (Cr^{+3}) -ως πρόσμιξη- που αντικαθιστούν άτομα Al.

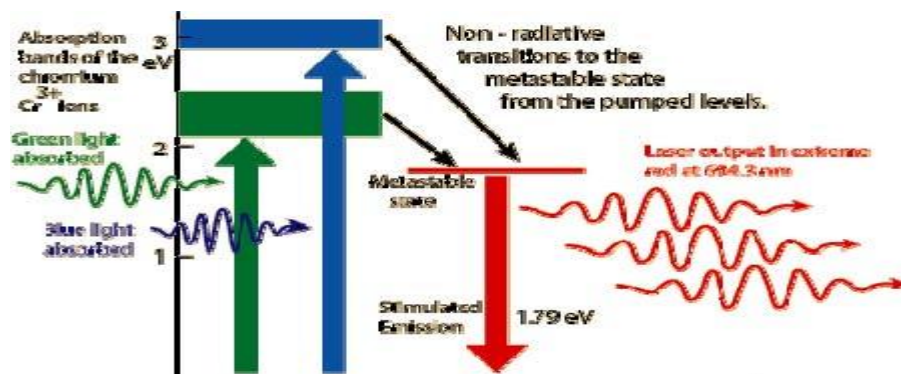
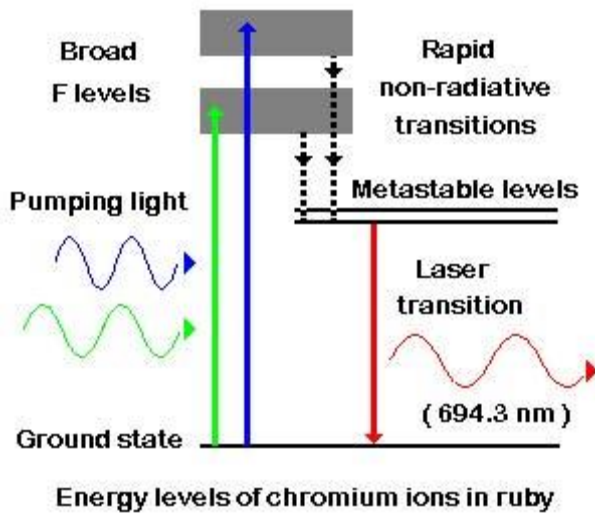
Μια λάμπα ξένον προσφέρεται ενέργεια στο ενεργό υλικό και τα ιόντα Cr απορροφούν μήκη κύματος της περιοχής 500-600 nm και μεταβαίνουν στο ενεργειακό επίπεδο E_3 , από το οποίο, αποδιεγειρόμενα «πέφτουν» στο μετασταθερό επίπεδο E_2 χωρίς εκπομπή ακτινοβολίας, αλλά με δονήσεις που μετατρέπονται σε θερμότητα. Ο χρόνος ημιζωής του E_2 είναι 5 ms³⁵.

Το Laser ρουβινίου είναι τριών επιπέδων και άρα δύσκολο να εκπέμψει συνεχή ακτινοβολία. Η λάμπα ενεργοποίησης φορτίζεται με ειδικό πυκνωτή που εκφορτίζεται για μερικά μsec. Επομένως και η διάρκεια των Laser (ερυθρών) παλμών του ρουβινίου θα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Τα παραγόμενα φωτόνια εξαναγκάζονται από τους καθρέφτες και διασχίζουν το ενεργό υλικό μπρος-πίσω πολλές φορές, αυτο-πολλαπλασιαζόμενα. Όσα όμως φωτόνια παρεκκλίνουν της παράλληλης προς τον κύριο άξονα πορείας, απορροφώνται από το υλικό της παράπλευρης επιφάνειας. Η ράβδος – ενεργό υλικό – του Laser ρουβινίου μπορεί να έχει διάμετρο από 0,6-2,0 cm και μήκος από 7-20 cm.

Εικόνα 11: Λειτουργία του Laser ρουβινίου και ροή των φωτονίων

³⁵ Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology, CRC Press, Boca Raton, FL, Ann Arbor, MI, Boston, MA.



Πηγή: Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers

✚ Laser νεοδυμίου

Τα ιόντα νεοδυμίου Nd^{+3} προστίθενται ως προσμίξεις και αντικαθιστούν άτομα τριών (βασικά) στερεών σωμάτων.

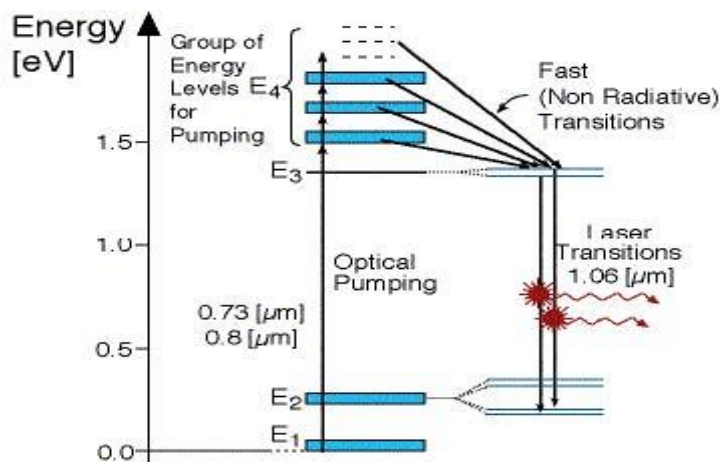
- ύαλος
- YAG (Yttrium Aluminum Garnet) κρύσταλλος
- YLF ($LiYF_4$) κρύσταλλος

Ο ύαλος (γυαλί) προτιμάται όταν η εφαρμογή απαιτεί ισχυρούς και αραιούς παλμούς. Το ενεργό υλικό μπορεί να έχει μορφή δίσκου ή κυλίνδρου, διαμέτρου ακόμα και μισού μέτρου και μήκους αρκετών μέτρων, επειδή το γυαλί είναι ισότροπο

υλικό και εύκολο στη διαμόρφωση του επιθυμητού σχήματος. Μειονέκτημα της υάλου είναι η μικρή της θερμο-αγωγιμότητα, δηλαδή είναι δύσκολη η απομάκρυνση των παραγόμενων ποσών θερμότητας.

Για συχνούς παλμούς προτιμάται ο κρύσταλλος YAG με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, αλλά οι διαστάσεις του είναι περιορισμένες (διάμετρος μέχρι 15 mm και μήκος μέχρι 30 cm) και η τιμή του υψηλή.

Εικόνα 12: Λειτουργία laser νεοδύμιου

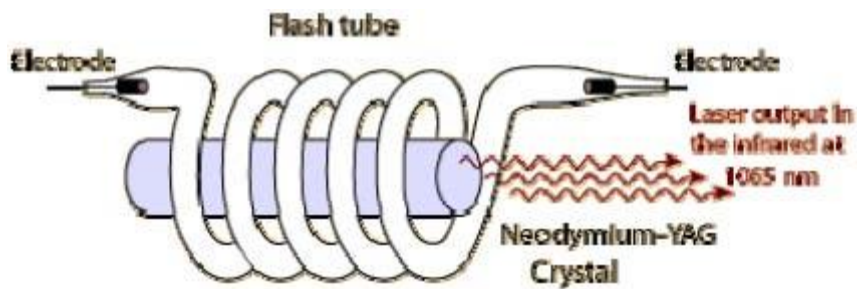


Πηγή: Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers

Τα Laser Nd εκπέμπουν στην εγγύς υπέρυθη περιοχή και διεγείρονται με ΗΜΑ. Είναι Laser τεσσάρων ενεργειακών επιπέδων³⁶.

Εικόνα 13: Σωματίδια στημ υπέρυθη περιοχή

³⁶ Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers, Mac Millan Publishing Company, New York



Πηγή: Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers

✚ Laser Αλεξανδρίτη ($\text{Cr}^{+3} : \text{BeAl}_2\text{O}_4$)

Ο κρύσταλλος είναι BeAl_2O_4 και έχει προσμίξεις ιόντων Cr^{+3} . Η ενεργειακή του διάταξη μοιάζει με την αντίστοιχη του ρουβινίου. Μπορεί όμως να λειτουργήσει είτε ως Laser τριών επιπέδων στα 680 nm είτε ως Laser τεσσάρων επιπέδων στα 720-800 nm. Με τις προσμίξεις του χρωμίου ο κρύσταλλος γίνεται ασύμμετρος και ουσιαστικά δημιουργείται πηγή ταλαντώσεων-δονήσεων με αποτέλεσμα το Laser Αλεξανδρίτη (όπως και του σαπφείρου-τιτανίου) να μπορεί να εκπέμψει πολλά συνεχόμενα μήκη κύματος. Με ειδικό φίλτρο (π.χ. ένα πρίσμα) στην έξοδο της οπτικής κοιλότητας, επιλέγεται κάθε φορά το ένα μήκος κύματος, το κατάλληλο για κάθε εφαρμογή.³⁷

✚ Laser τιτανίου – σαπφείρου

Το υλικό βάσης είναι κρύσταλλος σάπφειρος (Al_2O_3) και οι προσμίξεις είναι ιόντα Ti^{+3} , που αντικαθιστούν άτομα Al. Εκπέμπουν συνεχές ή παλμικό Laser στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου και συχνά οι χρήστες τα προτιμούν από τα Laser χρωστικών (dye Lasers), επειδή είναι πιο αξιόπιστα και εύκολα στους χειρισμούς. Με κατάλληλη ρύθμιση εκπέμπουν και στο ορατό. Η προσφορά ενέργειας γίνεται συνήθως με οπτική άντληση με άλλο Laser - όπως π.χ. Laser Ar^+ - και έχει πολύ καλή απόδοση. Τα χρησιμοποιούν σε ερευνητικά εργαστήρια και ειδικότερα στη φασματοσκοπία. Βοηθούν όμως και στη μέτρηση υδρατμών και αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα, όπως και στη μελέτη των επιπτώσεών τους. Με προσεκτική ενίσχυση

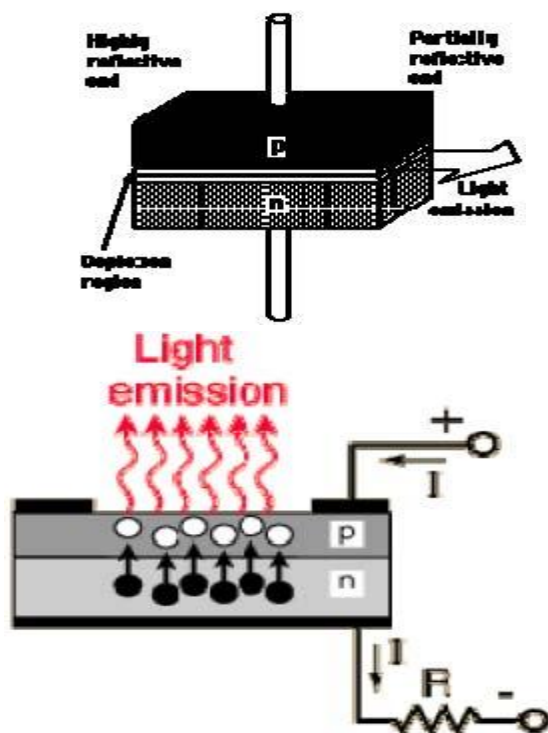
³⁷ Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology, CRC Press, Boca Raton, FL, Ann Arbor, MI, Boston, MA.

μπορούν να δώσουν παλμούς Laser ισχύος και μέχρι 10^{12} W και διάρκειας ως 10^{-15} sec, επαλαμβανόμενους με 10 Hz³⁸.

✚ Laser διόδων (ημιαγωγοί-έγχυση)

Καλούνται και (α) Laser ημιαγωγών από το υλικό κατασκευής τους, (β) Laser επαφής εξαιτίας της ζώνης επαφής p-n και (γ) Laser έγχυσης επειδή το εφαρμοζόμενο δυναμικό εγχύει ηλεκτρόνια στη ζώνη της επαφής. Είναι τα πλέον διαδεδομένα στο εμπόριο. Χρησιμοποιούνται σε ποικιλία καταναλωτικών προϊόντων: compact disks, Laser printers, bar code scanners και γενικά στην «οπτική επικοινωνία».

Εικόνα 14: Λειτουργία του Laser διόδων



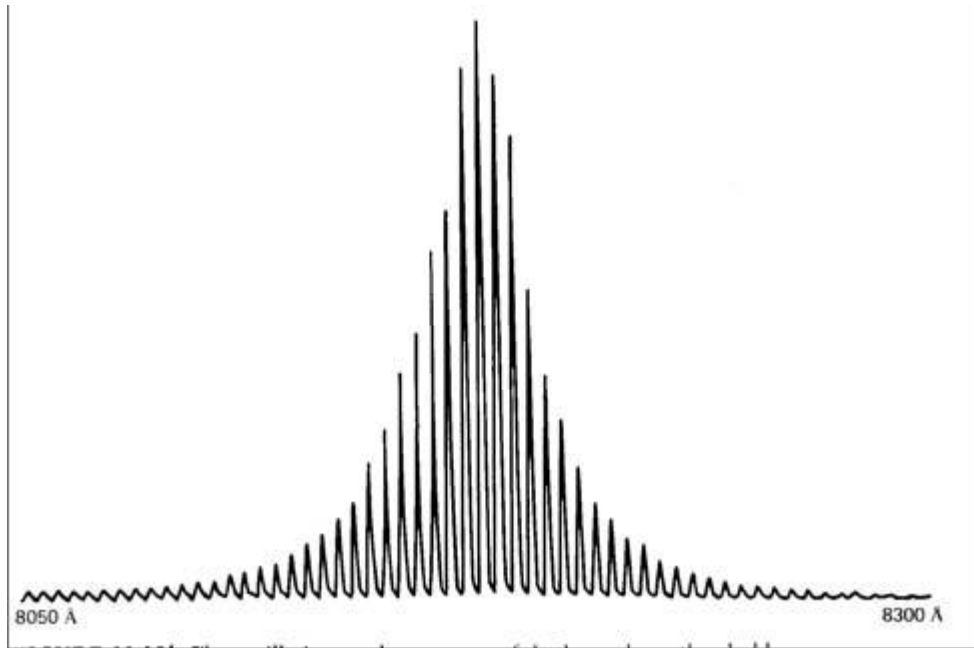
Πηγή: Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers

Πλεονεκτήματα του Laser διόδων

- Μεγάλη απόδοση
- Υψηλή αξιοπιστία

³⁸ Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers, Mac Millan Publishing Company, New York

- Μεγάλη διάρκεια ζωής (100 χρόνια συνεχούς λειτουργίας)
- Οικονομικό (μαζική παραγωγή και μικρή κατανάλωση ενέργειας)
- Εφικτός ρυθμός δεκάδων GHz (ισοδυναμεί με ταυτόχρονη μετάδοση 5000 τηλεφωνικών κλήσεων σε μια οπτική ίνα)
- Μικρός όγκος και βάρος
- Λεπτή δέσμη συχνοτήτων³⁹
- **Εικόνα 15: Λεπτή δέσμη συχνοτήτων**



Πηγή: AlGaAs “al-gas” LD Spectrum. (Yariv, p. 260)

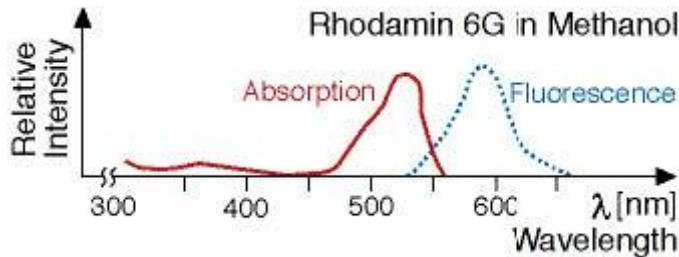
3. Laser υγρού (dye-χρωστικών)

Το Laser χρωστικών μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική συσκευή μετατροπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ενός μήκους κύματος σε ένα άλλο και μάλιστα προσαρμόσιμο κατά το επιθυμητό. Η περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία μπορεί να γίνει η προσαρμογή, εξαρτάται από τη χρωστική. Μόρια χρωστικής (dye) συνήθως είναι οργανικά φθορίζοντα συμπλέγματα, που περιέχουν μεγάλο αριθμό κυκλικών δομών. Το ενεργό υλικό Laser χρωστικής είναι τέτοια μόρια χρωστικής διαλυμένα συνήθως σε αλκοόλη. Από την αλληλεπίδραση των μορίων χρωστικής με το διαλύτη διευρύνεται η ζώνη των ενεργειακών επιπέδων

³⁹ Ifflander, R. (ed.) (2001) Solid State Laser Material Processing: Fundamental Relations & Technical Realizations, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

ταλάντωσης-δόνησης και σχηματίζεται ευρεία ζώνη εκπεμπομένων (αλλά και απορροφούμενων) συχνοτήτων.

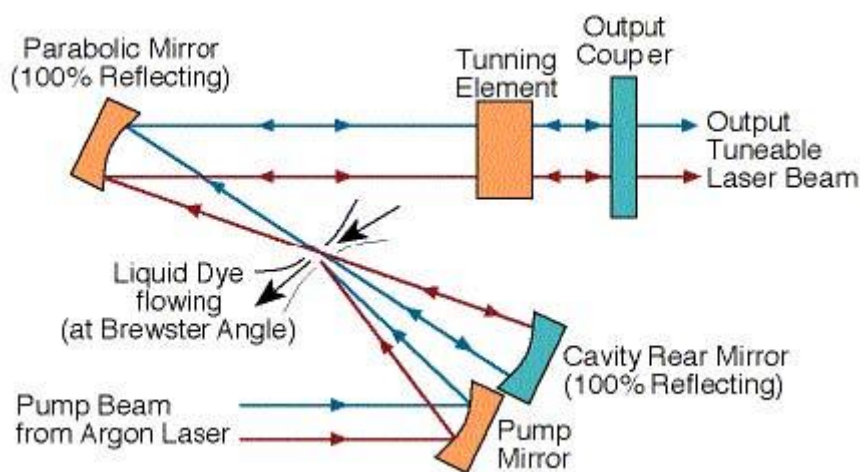
Εικόνα 16: Ενεργειακά επίπεδα στο Laser χρωστικών



Πηγή: Brau, C.A. (1990) Free-Electron Lasers

Το διάγραμμα των ενεργειακών επιπέδων στα Laser χρωστικών είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο. Ο χρόνος ημιζωής του διεγερμένου επιπέδου είναι σύντομος, επειδή υπάρχουν πολλοί δρόμοι αποδιέγερσης και παράλληλα ο αριθμός συγκρούσεων μεταξύ των μορίων στην υγρή κατάσταση είναι μεγάλος. Με κάθε σύγκρουση διαρρέει ενέργεια από τη διεγερμένη κατάσταση. Στο Laser χρωστικής η προσφορά ενέργειας γίνεται με οπτική άντληση: φωτισμός με ΗΜΑ κατάλληλου μήκους κύματος. Η προσφερόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη της εκπεμπόμενης επειδή υπάρχει απώλεια ενέργειας κατά τη διαδικασία της «μεταφοράς». Επομένως τα εκπεμπόμενα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα των αντίστοιχων της απορρόφησης.

Εικόνα 17: Εκπομπή και απορρόφηση της ενέργειας



Πηγή: Brau, C.A. (1990) Free-Electron Lasers

Πλεονεκτήματα του dye Laser είναι η έμφυτη ομοιογένεια, η εύκολη επιλογή του επιθυμητού μήκους κύματος (καταρχήν με επιλογή του είδους του υγρού), η εύκολη απομάκρυνση του περισσού ποσού θερμότητας (με ροή του ίδιου του υγρού), η λεπτή ζώνη εξερχομένων συχνοτήτων και η πολύ μικρή διάρκεια των παραγόμενων παλμών Laser.

Μειονεκτήματα του dye Laser είναι η δύσκολη συντήρηση της συσκευής, η παρουσία-χρήση δεύτερου Laser ως πηγή ενέργειας, ο μικρός χρόνος ζωής της χρωστικής, η χρήση, συχνά τοξικών χημικών και εξατμιζόμενων διαλυτών.

Νέα τεχνολογία οδηγεί προς Laser χρωστικών στερεής κατάστασης. Χαρακτηριστικές εφαρμογές του Laser χρωστικών είναι (α) η καταστροφή καρκινικών όγκων που απορροφούν εκλεκτικά συγκεκριμένα μήκη κύματος (β) η φωτοδυναμική θεραπεία (γ) η κωνιορτοποίηση λίθων στους νεφρούς με κρουστικά κύματα που δημιουργούν οι βραχείς παλμοί του Laser⁴⁰.

✓ Laser ειδικής σύστασης

Ειδική σύσταση μπορεί να έχει το σύστημα προσφοράς ενέργειας (Laser ελεύθερου ηλεκτρονίου), η ενέργεια της εξερχόμενης ακτινοβολίας (Laser ακτίνων X) ή το ενεργό υλικό (Laser ινών). Υπό έρευνα βρίσκεται η κατασκευή Laser που να «προσπερνά» τη διαδικασία της αντιστροφής πληθυσμών, όπως και ατομικό Laser πολύ χαμηλής θερμοκρασίας.

✓ Laser ελεύθερου ηλεκτρονίου

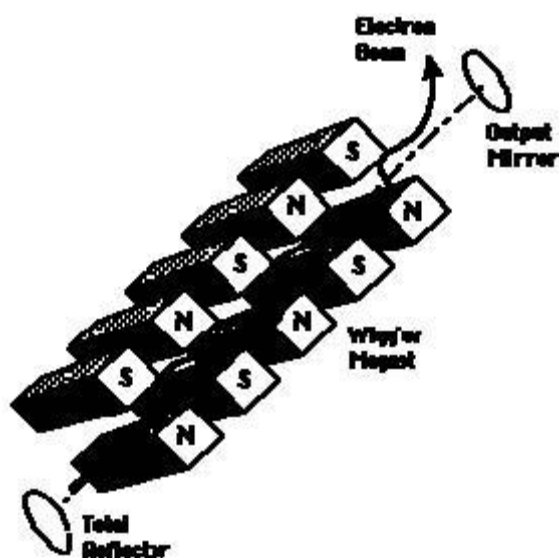
Το Laser ελεύθερου ηλεκτρονίου είναι μια συσκευή υψηλής απόδοσης που εκπέμπει ΗΜΑ Laser οπουδήποτε μήκους κύματος το οποίο εξαρτάται από το σχεδιασμό της συσκευής και όχι από τις ιδιότητες του ενεργού υλικού. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ανήκουν σε δέσμη ηλεκτρονίων και επιταχύνονται σε κενό. Τα ηλεκτρόνια δεν ανήκουν σε άτομα ή μόρια, επομένως μπορούν να μεταπηδούν μεταξύ οποιωνδήποτε ενεργειακών επιπέδων-καταστάσεων.

⁴⁰ Brau, C.A. (1990) Free-Electron Lasers, Academic Press, Oxford

Τα ηλεκτρόνια έχουν ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Υπάρχει ΗΜΑ που κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με τα ηλεκτρόνια. Υπάρχει και ειδικά διαμορφωμένο περιοδικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, από σειρά μαγνητών τοποθετημένων σε κατάλληλες θέσεις.

Αρχικά οι εφαρμογές του Laser ελεύθερου ηλεκτρονίου ήταν στον στρατιωτικό τομέα, αλλά σήμερα έχει εφαρμογές και στον ιατρικό τομέα, κυρίως επειδή μπορεί να γίνει επιλογή του μήκους κύματος ώστε να αλληλεπιδρά κατάλληλα με βιολογικούς ιστούς. Υπάρχουν όμως μειονεκτήματα επειδή η συσκευή αυτές απαιτούν ηλεκτρικό ρεύμα χιλιάδων Amperes και υψηλό δυναμικό χιλιάδων Volts για να επιτευχθούν οι απαιτούμενες ταχύτητες των ηλεκτρονίων. Η συσκευή έχει μεγάλες διαστάσεις, υψηλό κόστος και αναπόφευκτα δημιουργούνται επικίνδυνες ακτίνες X. Βέβαια η εξερχόμενη ΗΜΑ μπορεί να έχει ισχύ ακόμη και Giga Watt⁴¹.

Εικόνα 18: Δομή του Laser ελεύθερου ηλεκτρονίου



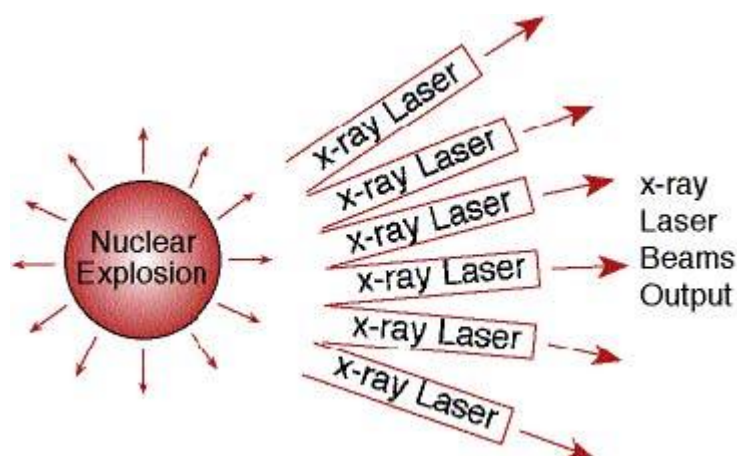
Πηγή: Brau, C.A. (1990) Free-Electron Lasers

✓ Laser ακτίνων X

⁴¹ Brau, C.A. (1990) Free-Electron Lasers, Academic Press, Oxford

Θεωρητικά η HMA Laser μπορεί να έχει μήκος κύματος της περιοχής των ακτίνων X ή γ. Όμως το HMA Laser στο ορατό ή στο εγγύς υπέρυθρο δημιουργείται από μεταπήδησεις ηλεκτρονίων μεταξύ «εξωτερικών» ενεργειακών επιπέδων στα άτομα ή στα μόρια. Για τη δημιουργία HMA στην περιοχή των ακτίνων X απαιτείται μεταπήδηση πολύ μεγαλύτερης ενεργειακής απόστασης, δηλαδή από τα «εξωτερικά» ενεργειακά επίπεδα προς τα «εσωτερικά». Απαιτείται προσφορά πολύ μεγαλύτερης ενέργειας για τη διέγερση του ενεργού υλικού και μάλιστα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, καθόσον ο χρόνος ημιζωής των διεγερμένων καταστάσεων, είναι πολύ μικρός. Τέτοια ενέργεια μπορεί να αποσπασθεί από πυρηνική έκρηξη, η οποία θα ήταν ικανή να «οπλίσει» ταυτόχρονα πολλά Laser ακτίνων X.

Εικόνα 19: Διαδικασία ανάκλασης ακτίνων του Laser X



Πηγή: Brau, C.A. (1990) Free-Electron Lasers

Το τεράστιο ποσό ενέργειας εξατμίζει το ενεργό υλικό, το μετατρέπει σε πλάσμα (κατάσταση υλικού όπου ηλεκτρόνια και ιόντα παραμένουν χωριστά) και όταν μερικά από τα «ελεύθερα» ηλεκτρόνια «νιώσουν» την έλξη του θετικού πυρήνα και παγιδευτούν σε εσωτερικές τροχιές, απελευθερώνεται HMA ακτίνων X. Η κατάσταση πλάσματος είναι από «φύση της» κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών. Η διαδικασία είναι σημαντικά αποδοτική και δεν χρειάζονται καθρέφτες για ενίσχυση⁴².

⁴² Brau, C.A. (1990) Free-Electron Lasers, Academic Press, Oxford

3.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ LASER

Το Laser έχει ορισμένες μοναδικές ιδιότητες, δηλαδή, υψηλή μονοχρωματικότητα, η συνοχή και η κατευθυντικότητα, σε σύγκριση με συνήθεις πηγές φωτός, αν και οι δύο είναι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες. Αυτές οι ιδιότητες αναλύονται παρακάτω:

❖ Μονοχρωματικότητα

Η ενέργεια ενός φωτονίου καθορίζει το μήκος κύματος της μέσω της σχέσης $E = hc / \lambda$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, h είναι σταθερή του Planck και το λ είναι το μήκος κύματος. Σε μια ιδανική περίπτωση, το λέιζερ εκπέμπει φωτόνια όλα με την ίδια ενέργεια, και έτσι το ίδιο μήκος κύματος, λέγεται να είναι μονοχρωματική. Το φως από ένα λέιζερ συνήθως προέρχεται από μια ατομική μετάβαση με ένα μόνο συγκεκριμένο μήκος κύματος. Έτσι, το φως του λέιζερ έχει ένα μοναδικό φασματικό χρώμα και είναι σχεδόν η πιο αγνή μονοχρωματικό φως διαθέσιμη.

Το Laser φως αποτελείται ουσιαστικά από ένα μήκος κύματος, έχει την προέλευσή της στην εξαναγκασμένη εκπομπή από ένα σύνολο επιπέδων ατομικής ενέργειας. Αυτό είναι δυνατό επειδή η μετάβαση λέιζερ εμπλέκει καλά καθορισμένα επίπεδα ενέργειας.

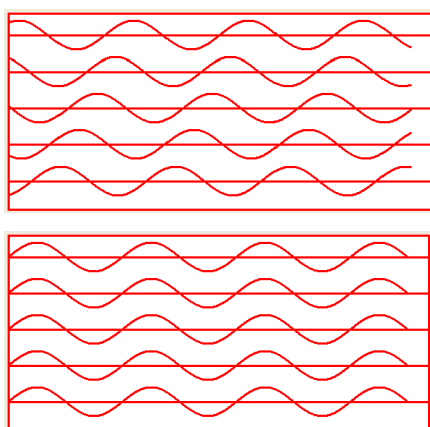
Τα λέιζερ, σε γενικές γραμμές, παράγουν φως σε μια πολύ στενή ζώνη γύρω από ένα ενιαίο, κεντρικό μήκος κύματος. Ο βαθμός της μονοχρωματικότητας μπορεί να περιγραφεί ποσοτικά σε εύρος ζώνης μήκους κύματος ή εύρος ζώνης συχνοτήτων. Το στενότερο είναι το πλάτος γραμμής, υψηλότερο βαθμό της monochromocity του λέιζερ έχει. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται από τον τύπο του λέιζερ, καθώς και ειδικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της μονοχρωματικότητας εξαρτώνται. Τυπικά, το εύρος ζώνης συχνοτήτων ενός εμπορικού He-Ne laser είναι περίπου 1500MHz (πλήρες πλάτος στο ήμισυ του μεγίστου, FWHM). Σε όρους μήκους κύματος, αυτό σημαίνει ότι σε ένα μήκος κύματος 632,8 nm, αυτό σημαίνει ένα εύρος μήκους κύματος από περίπου 0,01 ηΜ. Από την άλλη πλευρά, το εύρος ζώνης ενός τυπικά διόδου λέιζερ με μήκος κύματος 900nm είναι περίπου 1 nm σε

σύγκριση με το LED, το οποίο έχει ένα εύρος ζώνης περίπου 30-60 nm⁴³.

❖ Συνοχή

Η έννοια της συνοχής μπορεί να είναι καλά κατανοητή από την παρακάτω εικόνα.

Εικόνα 20: Συχνότητα του Laser



Πηγή: John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

Το σχήμα (α) απεικονίζει ένα τυπικό δέσμη φωτός κυμάτων από μια συνηθισμένη πηγή που ταξιδεύουν μέσα στο χώρο. Μπορεί κανείς να δει ότι αυτά τα κύματα δεν έχουν καμία σταθερή σχέση με το άλλο. Αυτό το φως λέγεται ότι είναι «ασυνάρτητη», πράγμα που σημαίνει ότι η δέσμη φωτός δεν έχει καμία εσωτερική τάξη. Το σχήμα (β), από την άλλη πλευρά, απεικονίζει τα κύματα φωτός μέσα σε ένα εξαιρετικά παραλληλισμένη δέσμη λέιζερ. Όλες αυτές οι επιμέρους κύματα είναι στο στάδιο, ή "σε φάση", ένα με το άλλο σε κάθε σημείο. «Συνοχή» είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια τέτοια ιδιότητα του φωτός λέιζερ.

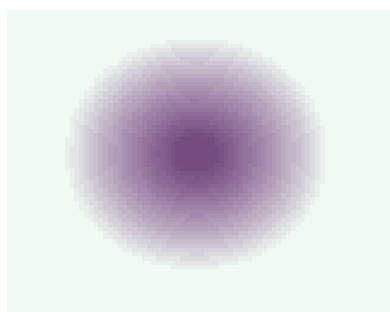
⁴³ John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

Υπάρχουν δύο τύποι της συνοχής - χωρική και χρονική. Συσχέτιση μεταξύ των κυμάτων σε ένα τόπο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ή κατά μήκος της διαδρομής της ακτίνας σε μια μόνο στιγμή, είναι ουσιαστικά το ίδιο πράγμα, και ονομάζονται «**χρονική συνοχή**». Συσχέτιση μεταξύ διαφόρων τόπων (αλλά όχι κατά μήκος της διαδρομής) ονομάζεται «**χωρική συνοχή**».⁴⁴

❖ Διάμετρος της ακτίνας

Η ένταση του φωτός λέιζερ δεν είναι ίδια σε όλη τη διατομή της δοκού. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι η κοιλότητα ελέγχει επίσης τις λειτουργίες trans-στίχο, ή διατομές έντασης. Η ιδανική δοκός έχει μία συμμετρική διατομή: Η ένταση είναι μεγαλύτερη στη μέση και τις ουρές στα ανοικτά στα άκρα. Αυτό ονομάζεται η εγκάρσια Ηλεκτρομαγνητική Mode (TEM_{00}) εξόδου.

Εικόνα 21: διάμετρος της ακτίνας του Laser



Πηγή: John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

Οι δείκτες η και π (0 και 0 στην περίπτωση αυτή) στο TEM_{nm} συσχετίζεται με τον αριθμό των κόμβων στο χ και γ διευθύνσεις. Μια θεωρητική TEM_{00} δοκός έχει ένα τέλειο Gaussian προφίλ. Λεπτομερής συζήτηση σχετικά με τους τρόπους που αναφέρονται στην επόμενη ενότητα. Λέιζερ μπορεί να παράγει πολλές άλλες λειτουργίες TEM, τα οποία θα συζητηθούν σε επόμενα κεφάλαια. Σε γενικές

⁴⁴ Μοριακή εκφράσεις Μικροσκοπία Primer Φυσικής του φωτός και του χρώματος - Εισαγωγή στα lasers

γραμμές, μπορεί να πει κανείς ότι οι ακτίνες λέιζερ έχουν μια συμμετρική κατανομή της έντασης. δηλαδή αν τρέξουμε σε ολόκληρη τη δέσμη, η ένταση είναι ελάχιστη στην άκρη και καθώς προχωρούμε προς το κέντρο αυξάνει και είναι μέγιστη στο κέντρο και στη συνέχεια πέφτει σε ένα παρόμοιο τρόπο, όπως από την άλλη πλευρά, απ' όπου ξεκινήσαμε. Στην πραγματικότητα, μπορούμε να αρχίσουμε σε οποιοδήποτε σημείο στο χείλος της δέσμης λέιζερ και το αποτέλεσμα θα είναι ίδιο, όπως συζητήθηκε νωρίτερα.

Διάμετρος δέσμης ορίζεται ως η διάμετρος ενός κυκλικού δέσμης σε ένα ορισμένο σημείο όπου η ένταση πέφτει σε ένα συγκεκριμένο κλάσμα της μέγιστης τιμής του. Οι κοινοί ορισμοί είναι μισο η ένταση, δηλαδή πλήρες εύρος στο μέγιστο ήμισυ (FWHM), $1/e$ (0,368) και $1/e^2$ (0.135) της μέγιστης τιμής. Με άλλα λόγια, η διάμετρος της δέσμης είναι η διάμετρος της δέσμης λέιζερ διατομή μεταξύ των σημείων κοντά στο εξωτερικό άκρο της δοκού, όπου η ένταση του είναι μόνο 50% (FWHM), 63% ($1/e$) και περίπου 86% ($1/e^2$), της έντασης στο κέντρο της δέσμης⁴⁵.

❖ Κατευθυντικότητα και της απόκλισης της δέσμης

Μία από τις σημαντικές ιδιότητες του λέιζερ είναι υψηλή κατευθυντικότητα του. Τα κάτοπτρα τοποθετούνται στα αντίθετα άκρα μιας κοιλότητας λέιζερ επιτρέπει τη δέσμη να ταξιδεύουν πίσω και εμπρός, προκειμένου να αποκτήσουν την ένταση από την εξαναγκασμένη εκπομπή περισσότερων φωτονίων στο ίδιο μήκος κύματος, η οποία οδηγεί σε αυξημένη ενίσχυση λόγω του μεγαλύτερου μήκους διαδρομής διαμέσου του μέσου.

Οι πολλαπλές ανακλάσεις παράγουν επίσης ένα καλά ευθυγραμμισμένη δέσμη, επειδή μόνο τα φωτόνια που ταξιδεύουν παράλληλα με τα τοιχώματα της κοιλότητας θα πρέπει να αντικατοπτρίζεται και από τις δύο καθρέφτες. Αν το φως είναι το παραμικρό κομμάτι από τον άξονα, θα χαθούν από την ακτίνα. Η ηχηρή κοιλότητα, ως εκ τούτου, καθιστά βέβαιο ότι μόνο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ταξιδεύουν κατά μήκος του οπτικού άξονα μπορεί να διατηρηθεί, κατά συνέπεια κτίριο του κέρδους.

⁴⁵ Μοριακή εκφράσεις Μικροσκοπία Primer Φυσικής του φωτός και του χρώματος - Εισαγωγή στα lasers

Ο υψηλός βαθμός ευθυγράμμισης προκύπτει από το γεγονός ότι η κοιλότητα του λέιζερ έχει πολύ σχεδόν παράλληλες εμπρόσθια και πίσω κάτοπτρα, τα οποία περιορίζουν την τελική ακτίνα λέιζερ σε μια διαδρομή, η οποία είναι κάθετη προς τις εν λόγω κάτοπτρα. Ευθυγράμμισης αναφέρεται στο βαθμό στον οποίο η δέσμη παραμένει παράλληλο με την απόσταση. Μια τέλεια ευθυγραμμισμένη δέσμη θα έχουν παράλληλες πλευρές και ποτέ δεν θα επεκταθεί σε όλους.

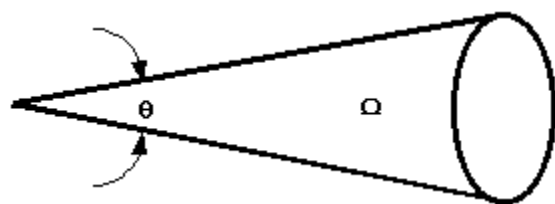
Γωνία απόκλισης του θα είναι ακριβώς μηδέν. Περίθλαση παίζει ένα σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό του μεγέθους της κηλίδας λέιζερ που μπορούν να προβάλλονται σε μία δεδομένη απόσταση. Η ταλάντωση της δοκού στην κοιλότητα αντηχείο παράγει μια στενή δέσμη που αποκλίνει στη συνέχεια σε κάποια γωνία ανάλογα με τη σχεδίαση αντηχείο, το μέγεθος του ανοίγματος εξόδου και προκύπτοντα αποτελέσματα περίθλασης επί της δοκού. Αυτά τα αποτελέσματα περίθλασης συνήθως αναφέρεται ως ένα αποτέλεσμα δέσμης διασποράς είναι αποτέλεσμα των κυμάτων φωτός που διέρχεται μέσα από ένα μικρό άνοιγμα. Αυτά τα φαινόμενα περίθλασης επιβάλλουν ένα όριο στην ελάχιστη διάμετρο ένα ελαφρύ σημείο μετά τη διέλευση μέσω ενός οπτικού συστήματος. Για ένα λέιζερ, η δέσμη που εξέρχεται από το κάτοπτρο εξόδου μπορεί να θεωρηθεί ως το άνοιγμα ή οπή, και τα αποτελέσματα περίθλασης επί της δοκού από το κάτοπτρο θα περιορίσει την ελάχιστη απόκλιση και spot μέγεθος της δέσμης. Για δοκούς σε TEM₀₀ κατάσταση, περίθλαση είναι συνήθως ο περιοριστικός παράγοντας της απόκλισης της δέσμης⁴⁶.

❖ Λάμψη

Ορίζεται ως η ισχύς που εκπέμπεται ανά μονάδα επιφανείας ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Οι μονάδες είναι βατ ανά τετραγωνικό μέτρο ανά στερακτίνο. Ένα στερακτίνο είναι η μονάδα στερεάς γωνίας, η οποία είναι τρισδιάστατο ανάλογο του συμβατικού δύο διαστάσεων (επίπεδες) γωνία εκφράζεται σε ακτίνια. Για μικρές γωνίες η σχέση μεταξύ ενός επίπεδη γωνία και η στερεά γωνία κώνου με την εν λόγω

⁴⁶ Μοριακή εκφράσεις Μικροσκοπία Primer Φυσικής του φωτός και του χρώματος - Εισαγωγή στα lasers

γωνία είναι επίπεδες μια καλή προσέγγιση είναι:



$\Omega = (\pi / 4) \theta^2$ όπου θ είναι η επίπεδη γωνία και Ω είναι η στερεά γωνία, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η λάμψη του 1 mm He-Ne laser με 1 χιλιοστό τίθεται διάμετρο και μια απόκλιση του 1 χιλιοστο-ακτίνο είναι $1,6 \times 10^9 \text{ Watts / m}^2$ -steradian, η οποία μπορεί να υπολογιστεί με τον ακόλουθο τρόπο.

Η στερεά γωνία που αντιστοιχεί σε ένα millirad είναι: $\Omega = (\pi / 4) (1 \text{ mrad})^2 = 0,8 \times 10^{-6} \text{ sterad}$ και η ακτινοβολία είναι δύναμη διαιρεμένη με το εμβαδόν της δέσμης και της στερεάς γωνίας. Έτσι ακτινοβολία **B** είναι $\mathbf{B} = 10^{-3} \text{ W} / (0,785 \times 10^{-6}) (0,8 \times 10^{-6}) = 1,6 \times 10^9 \text{ Watts / m}^2$ -steradian Η λάμψη ενός milliwatt ηλίου νέον λέιζερ είναι πολύ μεγαλύτερη από ό, τι 10^6 Watts / m^2 -steradian, ότι από τον ήλιο που εκπέμπει περισσότερο από 10^{26} W . Αυτό είναι ένα μοναδικό πλεονέκτημα για πολλές από τις εφαρμογές laser σε διάφορους τομείς⁴⁷.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΒΟΛΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ PLASMA

4.1 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Ο τυπικός ορισμός ενός πλάσματος είναι η 4^η κατάσταση της ύλης (στερεά, υγρά, αέριο, πλάσμα), όπου το υλικό έχει γίνει τόσο καυτό ώστε (τουλάχιστον μερικά) τα ηλεκτρόνια δεν δεσμεύονται πλέον σε μεμονωμένους πυρήνες. Έτσι, ένα πλάσμα είναι ηλεκτρικά αγώγιμο, και μπορεί να εμφανίσει τις συλλογικές δυνάμεις⁴⁸.

Ένα πλάσμα είναι ένα αέριο που είναι σημαντικά ιονισμένο (μέσω θέρμανσης ή φωτοϊονισμού) και, επομένως, αποτελείται από ηλεκτρόνια και ιόντα, και έχει μια αρκετά χαμηλή πυκνότητα ώστε να συμπεριφέρεται κλασικά, δηλαδή να υπακούουν στη στατιστική Maxwell-Boltzmann και όχι σε αυτή των Fermi-Dirac ή των Bose-Einstein. Στην εικόνα 22 παρουσιάζεται η μορφή που έχει το πλάσμα.

⁴⁷ John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

⁴⁸ Chen, F. Francis:(1974),Introduction to plasma physics. Plenum Pr.

Εικόνα 22: Μορφή πλάσματος μέσα από την δημιουργία κενού



Πηγή: John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

Η φυσική του πλάσματος προέρχεται από το 19^ο αιώνα, στη μελέτη των απορρίψεων αερίου⁴⁹. Ωστόσο, σύντομα διαπιστώθηκε ότι το πλάσμα είναι επίσης το κλειδί για την κατανόηση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πέρα από τον Ατλαντικό. Το θέμα έλαβε περαιτέρω ώθηση στις αρχές του 1950, με την έναρξη της ελεγχόμενης (και την ανεξέλεγκτη) θερμοπυρηνικής σύντηξης.

Η δυναμική συμπεριφορά του πλάσματος είναι πιο πολύπλοκη από τη δυναμική των αερίων και υγρών. Αυτή η δυναμική πολυπλοκότητα έχει δύο κύριες προελεύσεις:

❖ Η κυρίαρχη μορφή της αλληλεπίδρασης διασωματιδιακών σε ένα πλάσμα, Coulomb, είναι τόσο αδύναμη που οι μέσες ελεύθερες διαδρομές των ηλεκτρονίων και των ιόντων είναι συχνά μεγαλύτερες από ό, τι το μακροσκοπικό μήκος των κλιμάκων του πλάσματος. Αυτό επιτρέπει στις λειτουργίες διανομής ο των σωματιδίων να αποκλίνουν σοβαρά από την ισορροπία τους και, ειδικότερα, να είναι πολύ ανισότροπες.

❖ Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε ένα πλάσμα είναι μεγάλης εμβέλειας. Αυτό επιτρέπει τα φορτισμένα σωματίδια να μεταφέρουν ο ένας στον άλλο τον ηλεκτρομαγνητισμό και να ενεργούν σε συνεννόηση ως τρόποι διέγερσης (κύματα του πλάσματος ή plasmons) που συμπεριφέρονται σαν ενιαίες δυναμικές οντότητες.

⁴⁹ Crookes, W. (1879).Phil. Trans.,1, 135

Μεγάλο μέρος της φυσικής του πλάσματος αποτελείται από την μελέτη των ιδιοτήτων και των αλληλεπιδράσεων αυτών των τρόπων⁵⁰.

Η δυναμική συμπεριφορά του πλάσματος, εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα. Στο χαμηλότερο σημείο των συχνοτήτων τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια κλειδωμένα μαζί με ηλεκτροστατικές δυνάμεις και συμπεριφέρονται σαν ένα ηλεκτρικά αγώγιμο σώμα. Σε κάπως υψηλότερες συχνότητες τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα μπορούν να κινούνται σε σχέση με το άλλο, ωα συμπεριφέρονται σαν δύο ξεχωριστές δυνάμεις. Σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες, η σύνθετη δυναμική υποστηρίζεται από το διάστημα ανισοτροπιών και μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας μια παραλλαγή της κινητικής θεωρίας⁵¹.

4.2 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Η τεχνολογία πλάσματος συμπεριλαμβάνει πολλούς διαφορετικούς σκοπούς για την επεξεργασία της επιφάνειας, όπως: τον καθαρισμό, την επικάλυψη, την εκτύπωση, τη ζωγραφική και την κόλλα συγκόλλησης. Περιλαμβάνει τόσες πολλές διαφορετικές εφαρμογές που είναι σήμερα μία από τις κορυφαίες μεθόδους στην κατεργασία επιφάνειας, ειδικά σε βιομηχανίες που βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη συσκευασία. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται ακόμα σε μεγάλο βαθμό στην αυτοκινητοβιομηχανία και στις βιομηχανίες αεροσκαφών. Η επεξεργασία με τη χρήση του πλάσματος οδηγεί επίσης πολύ υψηλής ποιότητας προϊόντα σε ουσιαστική εφαρμογή ενώ εξακολουθεί να είναι μια φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία.

Επιφανειακή τάση και προεπεξεργασία

Κάθε επιφάνεια έχει μία ειδική επιφανειακή τάση η οποία ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με το υλικό. Επιπλέον κάθε μελάνι, χρώμα, κόλλα έχει τις δικές του μοναδικές ιδιότητες που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την επιφανειακή τάση σε διαφορετικά υλικά. Η επιφανειακή τάση αυξάνεται από την κατεργασία με πλάσμα

⁵⁰ Brown, L.S. and Gabrielse, G. 1986. "Geonium theory: Physics of a single electron or ion in a Penning trap." *Reviews of Modern Physics*, 58, 233

⁵¹ Brown, L.S. and Gabrielse, G. 1986. "Geonium theory: Physics of a single electron or ion in a Penning trap." *Reviews of Modern Physics*, 58, 234

ώστε να επιτευχθεί μία βέλτιστη επιφανειακή τάση κατά την οποία η μελάνη ή η κόλλα θα κολλήσει⁵².

Η διαδικασία προεπεξεργασίας αποτελείται από τρία τμήματα: τον καθαρισμό, την ενεργοποίηση και την επιφάνεια συγκόλλησης. Τα βήματα αυτά είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό μέρος της κατεργασίας με χρήση πλάσματος, διότι άμεσα επηρεάζει την ποιότητα της επιφάνειας στην οποία θα εφαρμοστεί αργότερα μελάνη ή κόλλα. Καθαρισμός της επιφάνειας του υποστρώματος μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα σύστημα πλάσματος ώστε να απομακρύνουν ακόμη και τα πιο μικρά σωματίδια σκόνης. Το πλάσμα καταναλώνει στην πραγματικότητα πολλά από τα σωματίδια μέσα από την επιφανειακή αντίδραση και τα απομακρύνει από το περιβάλλον. Καμία μηχανική ζημιά δε γίνεται στην επιφάνεια όταν αυτή η διαδικασία γίνεται με ένα στεγνό επεξεργασίας πλάσμα, το οποίο δεν εκπέμπει κανένα επιβλαβές απόβλητο και ως εκ τούτου είναι μια φιλική διαδικασία προς το περιβάλλον. Η συγκόλληση με πλάσμα παρουσιάζεται στην εικόνα 23.

Εικόνα 23: Συγκόλληση με πλάσμα



Πηγή: John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

Τα πλαστικά είναι κατασκευασμένα από μακρές αλυσίδες πολυμερούς οι οποίες έχουν μια μη-πολική επιφάνεια. Όταν ενεργοποιείται η επιφάνεια του πλάσματος

⁵² http://www.plasmamatreat.com/industrial_applications_surface_treatment_process.html

στην πραγματικότητα αλλάζει η χημική δομή και η πολικότητα του υποστρώματος. Όταν ενεργοποιηθεί σωστά τότε διαθέτει βελτιωμένες συγκολλητικές ιδιότητες, αυξημένη επιφανειακή διαβρεξιμότητα, και σε πολλές περιπτώσεις βελτιωμένη αντοχή της συγκόλλησης των αρθρώσεων.

Η αντοχή του δεσμού είναι σε πολλές περιπτώσεις το τελικό στάδιο στη διαδικασία επεξεργασίας του πλάσματος. Είναι πολύ σημαντικό κατά την εφαρμογή της κόλλας η επιφάνεια να έχει καθαριστεί επιμελώς ώστε να μπορεί να αποδώσει στο βέλτιστο επίπεδο. Μόλις γίνει ο δεσμός είναι μόνιμος και δεν αποικοδομείται συναρτήσει του χρόνου. Υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός των βιομηχανικών εφαρμογών αυτής της διαδικασίας επεξεργασίας που χρησιμοποιείται σε πλαστικά, γυαλί, μέταλλο, υφάσματα, και ταινίες. Κάθε ατομική διαδικασία χρησιμοποιεί ένα διαφορετικό συνδυασμό καθαρισμού, τα στάδια ενεργοποίησης, και συγκόλλησης όπου διαφορετικά συστήματα πλάσματος έχουν αναπτυχθεί και προσαρμοστεί σε κάθε εφαρμογή. Τα πιο σημαντικά στοιχεία του συστήματος με πλάσμα είναι οι πίνακες και οι γεννήτριες πλάσματος. Το πλάσμα δημιουργείται μέσω μιας εκκένωσης υψηλής τάσης⁵³.

Μια εγκατάσταση μηχανής πλάσματος περιλαμβάνει βασικά μια μηχανή συνεχούς ρεύματος από την οποία παράγεται η αναγκαία για το ηλεκτρικό τόξο ηλεκτρική τάση, το ηλεκτρόδιο χάρη στο οποίο διαμορφώνεται σε συγκεκριμένη περιοχή το ηλεκτρικό τόξο και το ακροφύσιο χάρη στο οποίο διαμορφώνεται το πλάσμα αερίου που υλοποιεί και την κοπή. Αναγκαίες για τη λειτουργία της μηχανής πλάσματος είναι μια σειρά διατάξεων, όπως η διάταξη έναυσης ενός βοηθητικού τόξου που χρησιμοποιεί μια παμογεννήτρια, μιας διάταξη αντίστασης για τον περιορισμό του ρεύματος στο βοηθητικό τόξο, ένα πηνίο προστασίας και μια διάταξη που διοχετεύει νερό ψύξης στο σώμα της τσιμπίδας⁵⁴.

4.3 ΚΟΠΗ ΜΕ ΠΛΑΣΜΑ

Η κοπή με πλάσμα αποτελεί μία μέθοδο που χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις κοπών, όπως η κοπή μη σιδηρούχων και υψηλής κραμάτωσης ελασμάτων και γενικά η κοπή ελασμάτων από δύστηκτα υλικά, για την οποία απαιτείται ιδιαίτερα καλή ποιότητα επιφάνειας.

⁵³ http://www.plasmatreat.com/plasma_technology/determination_surface_tension.html

⁵⁴ http://www.dynetechology.co.uk/faq.htm#What_does_Dyne_Level/_mN/m_mean

Η κοπή επιτυγχάνεται με την ταχεία τοπική τήξη και εξάτμιση του σημείου εκείνου της επιφανείας του ελάσματος στο οποίο θα γίνεται η εκάστοτε αφαίρεση υλικού, από μια δέσμη αερίου κοπής που διαμορφώνεται μεταξύ του ακροφυσίου της μηχανής πλάσματος. Η δέσμη αυτή προκύπτει από την υπερθέρμανση του αερίου(εικόνα 24) στην περιοχή του ηλεκτρικού τόξου που παράγεται μεταξύ του ακροφυσίου της μηχανής πλάσματος και της προς κοπή επιφανείας του ελάσματος. Το αέριο κοπής μέσα στη μηχανή πλάσματος διοχετεύεται στην περιοχή που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο από το οποίο παράγεται το τόξο και καταλήγει στο ακροφύσιο. Το ακροφύσιο της μηχανής πλάσματος έχει μια ειδική διαμόρφωση τέτοια ώστε να αυξάνεται τοπικά στην περιοχή του τόξου η πυκνότητα ενέργειας κι έτσι δημιουργείται η δέσμη αερίου πολύ υψηλής ενέργειας.

Εικόνα 24: Κοπή με πλάσμα



Πηγή: Malhotra, N., Rani, S., Singh, H., 2008

Επομένως, η κοπή δεν γίνεται με μηχανική αποβολή υλικού, αλλά με τήξη μια μικρής ποσότητας υλικού και εξάτμιση ενός μέρους αυτής. Η υψηλή ενέργεια της δέσμης κοπής επιτυγχάνει μια εντοπισμένη σχεδόν σημειακή τήξη του μετάλλου και η υψηλή ταχύτητα ροής πλάσματος διαμορφώνει κατάλληλη μηχανική συνθήκη διαχωρισμού του υλικού από τη μη προσβαλλόμενη από τη δέσμη επιφάνεια. Ο διαχωρισμός αυτός συνιστά μια σημειακή κοπή πολύ καλύτερης ποιότητας από αυτήν που επιτυγχάνεται με τη μηχανική αποβολή υλικού⁵⁵.

⁵⁵ http://www.plasmatreat.com/test_inks/surface_tension_measurement.html

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

5.1 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΈΝΝΟΙΑΣ

Η δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται σε έναν εκτοξευτή δέσμης ηλεκτρονίων και παρέχει υψηλή ταχύτητα σε ένα πολύ μικρό μέγεθος κηλίδας. Η κατεργασία αυτή απαιτείται να διεξαχθεί στο κενό διαφορετικά, τα ηλεκτρόνια θα αλληλεπιδρούν με τα μόρια του αέρα, και έτσι θα έχαναν την ενέργεια και την ικανότητα κοπής. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την κοπή λεπτών οπών και σχισμών σε κάθε υλικό. Σε ένα θάλαμο κενού, μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας εστιάζεται σε ένα τεμάχιο. Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων, επιδρά εντυπωσιακά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, πραγματοποιώντας αλλαγές στην θερμότητα, η οποία εξατμίζει λεπτές ποσότητες του υλικού. Η υψηλής ενέργειας δέσμη ηλεκτρονίων εστιάζεται για να προσπίπτει επί του τεμαχίου με ένα σημείο μεγέθους από 10 - 100 μm (σχήμα 1- εικόνας 25). Λόγω της υψηλής πυκνότητας πραγματοποιείται άμεσα η τήξη και η διαδικασία της εξάτμισης γίνεται σταδιακά. Τέλος, το λιωμένο υλικό αποβάλλεται από την περιοχή κοπής όπως φαίνεται στο σχήμα 2- εικόνας 25⁵⁶.

⁵⁶ S. Iijima. "Helical Microtubules of Graphitic Carbon." Nature 354 (1991) pp. 56-58

Εικόνα 25: Εστίαση δέσμης ηλεκτρονίων μέσω σχηματικής απεικόνισης 1 και 2

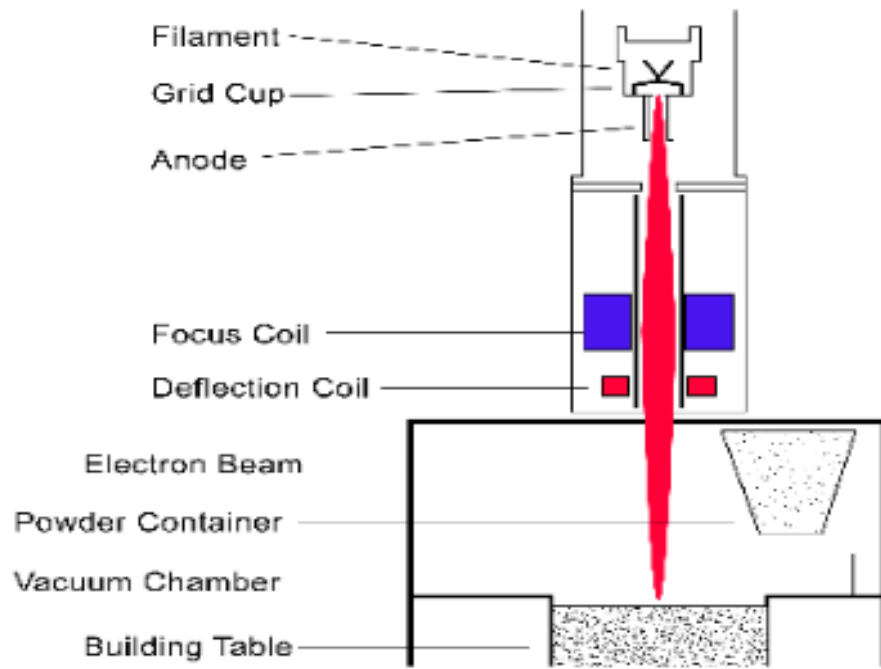
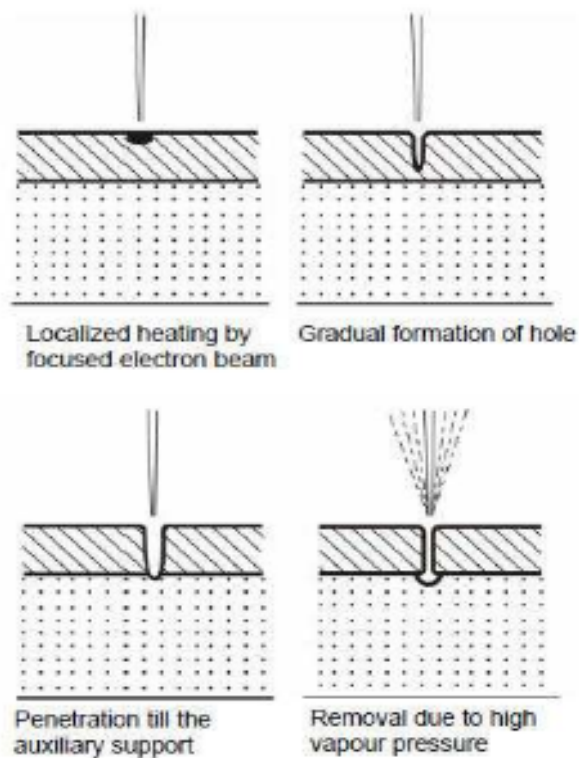


Fig. 1. Electron Beam Machining (EBM) Process



Πηγή: John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

5.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΕΣΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

Ο εκτοξευτής ηλεκτρονίων αποτελεί την καρδιά της κάθε μονάδας καταργασίας με δέσμη ηλεκτρονίων. Οι βασικές λειτουργίες του κάθε εκτοξευτή δέσμης ηλεκτρονίων είναι να παράγουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στην κάθοδο, να επιταχύνουν όσους έχουν υψηλή ταχύτητα και να εστιάσουν πάνω από ένα μικρό μέγεθος κηλίδος. Πέρα από αυτό, η δέσμη πρέπει να ελίσσεται, εάν απαιτείται από το όπλο. Η κάθοδος γενικά κατασκευάζεται από βολφράμιο ή ταντάλιο. Τέτοια νημάτια θερμαίνονται καθόδου, συχνά επαγωγικά, σε θερμοκρασία περίπου 2500 °C. Τέτοια θέρμανση οδηγεί σε θερμο-ιονική εκπομπή ηλεκτρονίων, η οποία ενισχύεται περαιτέρω με τη διατήρηση σε κενό εντός του θαλάμου του εκτοξευτή. Επιπλέον, αυτή η κάθοδος είναι εξαιρετικά αρνητικά πολωμένη έτσι ώστε τα θερμο-ιονικά ηλεκτρόνια να απωθούνται έντονα από την κάθοδο(εικόνα 26)⁵⁷.

Εικόνα 26: Επίδραση καθόδου στα θερμο-ιοντικά ηλεκτρόνια

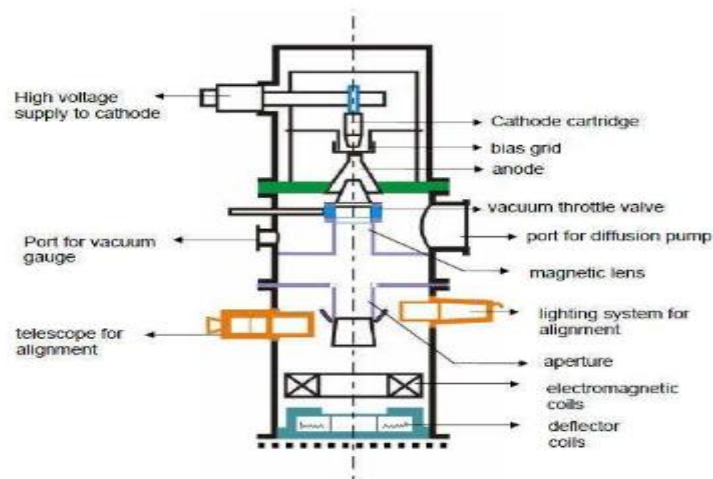


Fig. 3. Electron Beam Gun

Πηγή: John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

⁵⁷ De Heer, W.A., A. Chatelain, and D. Ugarte. "A Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source". Science. vol. 270, No. 5239. Nov. 17, 1995. p. 1179-1182

Αμέσως μετά από την κάθοδο, υπάρχει ένα δακτυλιοειδές πλέγμα πόλωσης. Μία υψηλή αρνητική πόλωση εφαρμόζεται σε αυτό το πλέγμα έτσι ώστε τα ηλεκτρόνια που παράγονται από αυτή την κάθοδο να μην αποκλίνουν και να πλησιάσουν το επόμενο στοιχείο υπό τη μορφή μίας δοκού. Η άνοδος προσελκύει τώρα την δέσμη ηλεκτρονίων και σταδιακά πρέπει να επιταχυνθεί. Τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από το τμήμα της ανόδου μπορούν να επιτύχουν ταχύτητα τόσο υψηλές όσο το μισό της ταχύτητας του φωτός. Το πλέγμα χρησιμοποιείται ως διακόπτης για τη λειτουργία του εκτοξευτή δέσμης ηλεκτρονίων σε παλμική λειτουργία⁵⁸.

Μετά την άνοδο, η δέσμη ηλεκτρονίων διέρχεται από μία σειρά μαγνητικών φακών και ανοιγμάτων. Οι μαγνητικοί φακοί διαμορφώνουν τη δέσμη για να προσπαθήσει να μειώσει την απόκλιση. Τα ανοίγματα από την άλλη πλευρά επιτρέπουν μόνο στα ηλεκτρόνια που συγκλίνουν να περάσουν και να συλλάβουν την αποκλίνουσα χαμηλή ενέργεια.

Με αυτό τον τρόπο, οι μαγνητικοί φακοί βελτιώνουν την ποιότητα της δέσμης ηλεκτρονίων. Στη συνέχεια, η δέσμη ηλεκτρονίων περνά μέσα από το τελικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φακού και γίνεται εκτροπή του πηνίου. Ο ηλεκτρομαγνητικός φακός εστιάζει την δέσμη ηλεκτρονίων σε ένα επιθυμητό σημείο. Στο πηνίο εκτροπής μπορεί να ελιχθεί η δέσμη ηλεκτρονίων, αν και με μικρή ποσότητα, για να βελτιωθεί το σχήμα των κατεργασμένων οπών. Γενικώς μεταξύ του εκτοξευτή δέσμης ηλεκτρονίων και του τεμαχίου, το οποίο είναι επίσης υπό κενό, θα υπάρχει μια σειρά από εγκοπές περιστρεφόμενων δίσκων. Αυτοί οι δίσκοι επιτρέπουν στη δέσμη ηλεκτρονίων να περάσει και τα υλικά του μηχανήματος, αλλά με πρόληψη στις αναθυμιάσεις μετάλλων και στους ατμούς που παράγονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας για να φτάσει το όπλο. Έτσι είναι

⁵⁸ Kannatey-Asibu, E., Jr. "Thermal Aspects of the Split-Beam Electron Machining Concept." ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 113, No. 4 (1991) pp. 215-221

απαραίτητο αυτό για το συγχρονισμό της κίνησης του περιστρεφόμενου δίσκου και παλμική του εκτόξευση δέσμης ηλεκτρονίων(εικόνα 27)⁵⁹.

Εικόνα 27: Παλμική εκτόξευση δέσμης ηλεκτρονίων

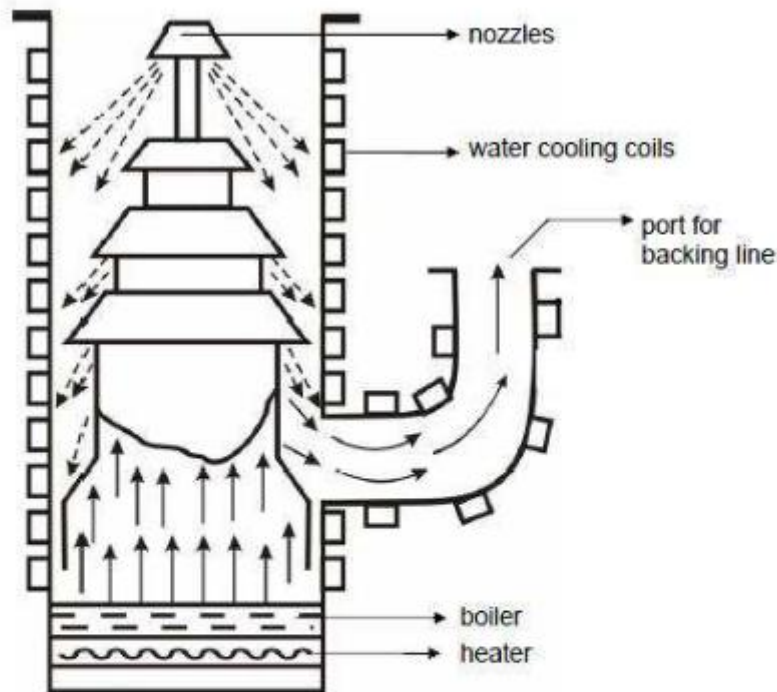


Fig. 4. Working of a Diffusion Pump

Πηγή: John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

5.3 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

Οι παράμετροι της διαδικασίας, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τα χαρακτηριστικά μεταλλοτεχνίας στην κοπή με δέσμη ηλεκτρονίων είναι οι εξής:

⁵⁹ Touloukian, Y.S. Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys. IFI/Plenum, New York, 1970

- ❖ Η τάση επιτάχυνσης
- ❖ Το ρεύμα της δέσμης
- ❖ Η διάρκεια παλμού
- ❖ Η ενέργεια ανά παλμό
- ❖ Ισχύς ανά παλμό
- ❖ Το ρεύμα φακού
- ❖ Το μέγεθος Spot
- ❖ Η πυκνότητα ισχύος

Η δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να παρέχει οπές διαμέτρου στην περιοχή από 100 μm έως 2 mm με βάθος μέχρι 15 χιλιοστά, δηλαδή, με l/d αναλογία περίπου 10. Το σχήμα αναπαριστά σχηματικά μία τυπική οπή με δέσμη ηλεκτρονίων. Η τρύπα μπορεί να είναι κωνική κατά το βάθος ή σε σχήμα βαρελιού. Με την εστίαση της δέσμης κάτω από την επιφάνεια μια αντίστροφη κωνικότητα μπορεί επίσης να ληφθεί. Τυπικά, θα υπάρξει μια άκρη στρογγυλοποίησης στο σημείο εισόδου μαζί με την παρουσία του στρώματος. Μια ευρεία ποικιλία υλικών όπως ατσάλι, ανοξείδωτο χάλυβα, υπερ-κράματα αλουμινίου, καθώς και πλαστικά, κεραμικά, δέρματα μπορεί να κατασκευαστούν επιτυχία χρησιμοποιώντας δέσμη ηλεκτρονίων. Καθώς ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού έχει θερμικό χαρακτήρα θα υπάρχουν θερμικές ζημιές που συνδέονται με τη δέσμη ηλεκτρονίων.

Ωστόσο, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι μάλλον περιορισμένη, λόγω της μικρότερης διάρκειας παλμού στη δέσμη ηλεκτρονίων. Τυπικά η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι περίπου 20 έως 30 μm. Μερικά από τα υλικά είναι πιο εύκολα μηχανικά σε σύγκριση με το χάλυβα. Ο αριθμός οπών ανά δευτερόλεπτο εξαρτάται από τη διάμετρο οπής, την πυκνότητα ισχύος και το βάθος της τρύπας, καθώς και τον τύπο του υλικού, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 28⁶⁰.

⁶⁰ A. M. Rao, D. Jackques, R.C. Haddon, W. Zhu, C. Bower, and S. Jin. “In –Situ grown Carbon Nanotube Array with Excellent Field Emission Characteristics”. Appl. Phys. Lett., 76 3813 (2000).

Εικόνα 28: Δημιουργία αρθμού οπών

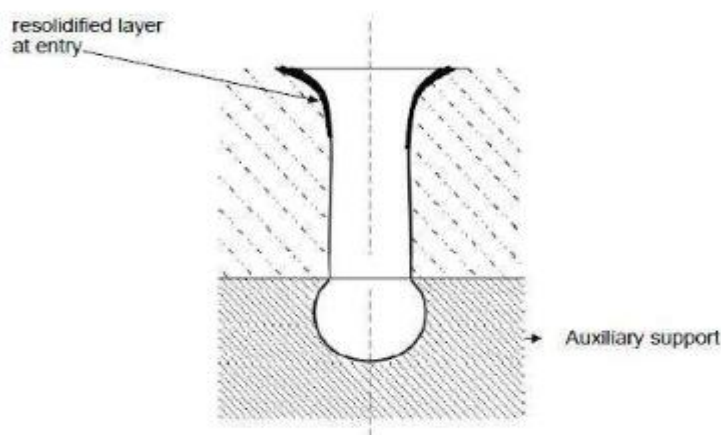


Fig. 5. Typical kerfs shape of electron beam drilled hole

Πηγή: John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ

Η δέσμη ηλεκτρονίων δεν επιβάλλει καμία δύναμη κοπής για τα τεμάχια. Έτσι, πολύ απλά η εκμετάλλευση εργασίας είναι απαραίτητη. Τρύπες μπορούν επίσης να είναι διάτρητες σε πολύ μικρή γωνία από 20 έως 30⁰. Η δέσμη παρέχει πολύ υψηλά ποσοστά γεώτρησης όταν μικρές τρύπες με μεγάλη αναλογία διαστάσεων είναι διάτρητες.

Η θερμική ζώνη στη δέσμη οφείλεται στη μικρότερη διάρκεια παλμών. Έτσι, μπορεί να παρέχει οπές οποιουδήποτε σχήματος συνδυάζοντας την εκτροπή χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικά πηνία και τον πίνακα CNC με υψηλή ακρίβεια. Ωστόσο, η EBM έχει το δικό της μερίδιο των περιορισμών. Οι πρωτογενείς περιορισμοί είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου του εξοπλισμού και της απαραίτητης τακτικής συντήρησης που εφαρμόζεται για κάθε εξοπλισμό και που χρησιμοποιεί το σύστημα κενού. Επιπλέον, υπάρχει σημαντική ποσότητα των μη παραγωγικών αντλιών για την επίτευξη του επιθυμητού κενού. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μειωθεί σε

κάποιο βαθμό με τη χρήση κλειδαριών φορτίου⁶¹. Για τον προσδιορισμό της κατανομής της θερμοκρασίας απαιτείται άμεση χωρική και χρονική ανάλυση μέτρηση της θερμοκρασίας μέσω μικρο-στοιχείων.⁶².

⁶¹ Incropera, Frank P. and David P. DeWitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th Ed. John Wiley & Sons, New York, 1996

⁶² Incropera, Frank P. and David P. DeWitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th Ed. John Wiley & Sons, New York, 1996

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

• Ελένη Γιαννούλη, Περικλής Ακρίβος , Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Χημείας, Θεσσαλονίκη ,ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ,2011

• Μαμαλη Γ. Αθανασίου, τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: μη συμβατικές κατεργασίες, 2000, Αθήνα

• Μοριακή εκφράσεις Μικροσκοπία Primer Φυσικής του φωτός και του χρώματος - Εισαγωγή στα lasers

• Wang, K., Gelgele, H.L., Wang, Y., Yuan, Q., Fang, M., (2003), “A hybrid intelligent method for modeling the EDM process”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, pp. 995-999.

• Samuel, M.P., Philip, P.K., (1997), “Powder metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining”, International Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol.37, Issue 11, pp. 1625-1633

• <http://users.ntua.gr/mamalis/elliniko.pdf>

• <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/CNC/SHMEIWSEIS/3-1-CUT.pdf>

• <http://www.automationmag.com/images/stories/LWTech-files/91%20Electrical%20Discharge.pdf>

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Weber, M.J. (ed.) (1991) Handbook of Laser Science and Technology, CRC Press, Boca Raton, FL, Ann Arbor, MI, Boston, MA.
- Colson, W.B., Pellegrini, C., and Renieri, A. (eds) (1990) Laser Hand-book, Free-Electron Lasers, vol.6, North Holland, Amsterdam
- Marshall, J.C. (1985) Free Electron Lasers, Mac Millan Publishing Company, New York
- Brau, C.A. (1990) Free-Electron Lasers, Academic Press, Oxford
- John Ambroseo(2001): Συνεκτική Laser - φωτονική ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ
- Chen, F. Francis:(1974),Introduction to plasma physics. Plenum Pr.
- Crookes, W. (1879).Phil. Trans.,1, 135
- Brown, L.S. and Gabrielse, G. 1986. "Geonium theory: Physics of a single electron or ion in a Penning trap." Reviews of Modern Physics,58, 234
- S. Iijima. "Helical Microtubules of Graphitic Carbon." Nature 354 (1991) pp. 56-58
- De Heer, W.A., A. Chatelain, and D. Ugarte. "A Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source". Science. vol. 270, No. 5239. Nov. 17, 1995. p. 1179-1182

ΕΙΚΟΝΕΣ

- Εικόνα 1. Διαδικασία αποβολής υλικού
- Εικόνα 2. Απλοποιημένο μοντέλο θερμικής πηγής για την ηλεκτροδιάβρωση
- Εικόνα 3. Δομή και λειτουργία του Laser He-Ne
- Εικόνα 4. Λειτουργία του Laser He-Ne
- Εικόνα 5. Συγκρούσεις σωματιδίων στο Laser He-Ne
- Εικόνα 6. Λειτουργία των αέριων ιόντων στο Laser Ar
- Εικόνα 7. Τρόποι ταλάντωσης του Laser CO₂
- Εικόνα 8. Τα ηλεκτρόνια στη λειτουργία του Laser CO₂
- Εικόνα 9. Λειτουργία χημικού Laser
- Εικόνα 10. Τα σωματίδια στο Laser μακρινού υπέρυθρου
- Εικόνα 11: Λειτουργία του laser ρουβινίου και ροή των φωτονίων
- Εικόνα 12. Λειτουργία laser νεοδυμίου
- Εικόνα 13. Σωματίδια στην υπέρυθη περιοχή
- Εικόνα 14. Λειτουργία του Laser διόδων
- Εικόνα 15. Λεπτή δέσμη συχνοτήτων
- Εικόνα 16. Ενεργειακά επίπεδα στο laser χρωστικών
- Εικόνα 17. Εκπομπή και απορρόφηση της ενέργειας
- Εικόνα 18. Δομή του laser ελεύθερου ηλεκτρονίου
- Εικόνα 19. Διαδικασία ανάκλασης ακτίνων του Laser X
- Εικόνα 20. Συνοχή του laser
- Εικόνα 21. Διάμετρος της ακτίνας ενός laser
- Εικόνα 22. Μορφή πλάσματος μέσα από την δημιουργία κεραυνού
- Εικόνα 23. Συγκόλληση με πλάσμα
- Εικόνα 24. Κοπή με πλάσμα
- Εικόνα 25. Εστίαση δέσμης ηλεκτρονίων μέσω σχηματικής απεικόνισης 1 και 2
- Εικόνα 26. Επίδραση καθόδου στα θερμο-ιονικά ηλεκτρόνια
- Εικόνα 27. Παλμική εκτόξευση δέσμης ηλεκτρονίων
- Εικόνα 28. Δημιουργία αριθμού οπών

ΠΙΝΑΚΕΣ

- ΠΙΝΑΚΑΣ 1 . ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ