



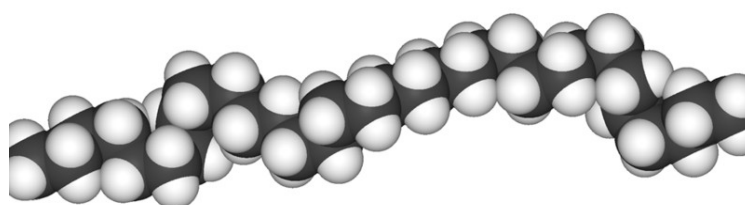
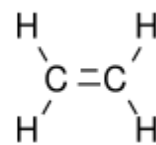
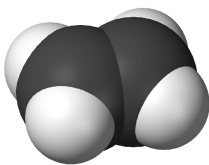
Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ  
LASER**



Σπουδαστής : **Καμπάντας Παναγιώτης**

Εισηγητής : **Γεωργίου Ευστράτιος**

Ηράκλειο, Φεβρουάριος 2008

*Την παρούσα πτυχιακή εργασία  
την αφιερώνω στους γονείς μου*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον υπεύθυνο καθηγητή κ. **Γεωργίου Ευστράτιο** για την ανεκτίμητη βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας. Οι συμβουλές του, ήταν ιδιαίτερα πολύτιμες στον εμπλουτισμό των τεχνικών γνώσεών μου καθώς και των εμπειριών μου.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον **Τσαγκαράκη Γεώργιο** για την βοήθεια του στην υλοποίηση των πειραμάτων αλλά και τον **Νίκο Λαζαρίδη** για την βοήθεια του στην αναζήτηση της κατάλληλης βιβλιογραφίας.

Επίσης τους καθηγητές που συμμετέχουν στο Κέντρο Τεχνολογίας Υλικών και laser του ΤΕΙ Κρήτης, και ιδιαίτερα τους κ.κ. **Εμμ. Κουδουμά** και **Κων. Σαββάκη** για την φροντίδα παροχής εξοπλισμού, αναλωσίμων και οργάνων απαραίτητων για την ερευνητική αυτή προσπάθεια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία **PLASTIKA KRITIS** και τον υπεύθυνο Χημ.Μηχανικό κο. Γ. Κόρκακα για το ενδιαφέρον που έδειξε στην έρευνά μας και για τα πλαστικά δείγματα που μας προμήθευσε.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</u> .....	σελ.1
<u>Κεφάλαιο 2: Γενικές αρχές των lasers</u> .....	σελ.2
2.1:Αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή.....	σελ.2
2.2:Περιγραφή της λειτουργίας laser.....	σελ.3
2.3:Τα μέρη ενός τυπικού συστήματος laser.....	σελ.5
2.3.1:Το ενεργό μέσο.....	σελ.5
2.3.2:Η οπτική κοιλότητα του laser.....	σελ.6
2.3.3:Μηχανισμοί διέγερσης του ενεργού μέσου.....	σελ.6
2.4:Ιδιότητες της δέσμης laser.....	σελ.8
2.4.1:Μονοχρωματικότητα.....	σελ.8
2.4.2:Συμφωνία.....	σελ.9
2.4.3:Κατευθυντικότητα.....	σελ.10
2.4.4:Λαμπρότητα.....	σελ.10
2.5:Τύποι lasers.....	σελ.11
2.5.1:Lasers στερεάς κατάστασης.....	σελ.11
2.5.2:Lasers αερίων.....	σελ.14
2.6:Διαμόρφωση παλμών.....	σελ.16
2.6.1:Η τεχνική της διαμόρφωσης του παράγοντα Q.....	σελ.16
2.6.2:Η τεχνική της εγκλειδωσης ρυθμών (mode locked).....	σελ.20
2.7:Εφαρμογές των lasers.....	σελ.22
<u>Κεφάλαιο 3: Laser βιομηχανικών κατεργασιών</u> .....	σελ.23
3.1:Laser Nd:YAG.....	σελ.23
3.2:Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO <sub>2</sub> ).....	σελ.25
3.3:Excimer laser.....	σελ.28
<u>Κεφάλαιο 4: Πολυμερή</u> .....	σελ.32
4.1:Χαρακτηριστικά και ταξινόμηση πολυμερών.....	σελ.32
4.2:Παραγωγή και κατεργασία πολυμερών.....	σελ.37
4.3:Το πολυαιθυλένιο.....	σελ.42
<u>Κεφάλαιο 5: Συγκολλήσεις πολυμερών</u> .....	σελ.44
5.1:Κατηγορίες συγκολλήσεων.....	σελ.44
5.2:Συγκολλήσεις με μηχανικές δονήσεις.....	σελ.45
5.3:Συγκολλήσεις με εξωτερική παροχή θερμότητας.....	σελ.47
<u>Κεφάλαιο 6: Συγκολλήσεις πολυμερών με laser</u> .....	σελ.50
6.1:Μέθοδοι συγκολλήσεων με laser.....	σελ.50
6.1.1:Συγκόλληση με laser CO <sub>2</sub> .....	σελ.51

6.1.2:Συγκόλληση με διερχόμενη ακτινοβολία laser.....σελ.52	σελ.52
6.2:Παράγοντες που επηρεάζουν την συγκόλληση.....σελ.53	σελ.53
6.2.1:Χαρακτηρισμός των πολυμερών.....σελ.53	σελ.53
6.2.2:Οι διατάξεις της ένωσης.....σελ.54	σελ.54
6.2.3:Η πίεση.....σελ.55	σελ.55
6.2.4:Η συγκράτηση.....σελ.56	σελ.56
6.3:Λaser κατάλληλα για συγκολλήσεις πλαστικών με την μέθοδο της διερχόμενης Ακτινοβολίας Laser.....σελ.	σελ.
57	
6.3.1:Nd:YAG laser.....σελ.57	σελ.57
6.3.2:Διοδικά laser.....σελ.57	σελ.57
6.4:Η χρήση των πρόσθετων απορροφητικών χρωστικών.....σελ.58	σελ.58
<u>Κεφάλαιο 7:Εργαστηριακές διατάξεις και πειράματα συγκόλλησης.....σελ.61</u>	σελ.61
7.1:Εισαγωγή στην πειραματική εργασία.....σελ.61	σελ.61
7.2:Ανάλυση της πειραματικής διάταξης.....σελ.62	σελ.62
7.3:Υλοποίηση πειραμάτων.....σελ.64	σελ.64
7.3.1:Συγκολλήσεις πλαστικών με μικρό πάχος.....σελ.64	σελ.64
7.3.2:Συγκολλήσεις πλαστικών με μεγαλύτερο πάχος.....σελ.75	σελ.75
<u>Κεφάλαιο 8:Γενική επισκόπηση και συμπεράσματα.....σελ.81</u>	σελ.81
8.1:Βαθμός επιτυχίας, προβλήματα, προτεινόμενες λύσεις και προοπτικές βελτίωσης.....σελ.81	σελ.81
8.1.1:Βαθμός επιτυχίας.....σελ.81	σελ.81
8.1.2:Προβλήματα που ανέκυψαν.....σελ.81	σελ.81
8.1.3:Προοπτικές βελτίωσης.....σελ.82	σελ.82
8.2:Συμπεράσματα.....σελ.83	σελ.83
<u>Παράρτημα:.....σελ.85</u>	σελ.85
<u>Βιβλιογραφία:.....σελ.90</u>	σελ.90

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πλαστικές ύλες έχουν εισχωρήσει εδώ και μερικές δεκαετίες στη ζωή του ανθρώπου και έχουν φέρει μια μικρή επανάσταση. Τα προϊόντα από πλαστικό έχουν αντικαταστήσει παραδοσιακά υλικά που χρησιμοποιούσε ο άνθρωπος στην καθημερινότητα του και έχουν δώσει λύση σε πολλά προβλήματά του. Έχουν εισχωρήσει τόσο βαθιά στη ζωή του ανθρώπου, που δεν υπάρχει άνθρωπος στον λεγόμενο πολιτισμένο κόσμο που να μην διαθέτει προϊόντα από πλαστικό. Έτσι οι μέθοδοι παραγωγής και επεξεργασίας των πλαστικών έχουν πολύ μεγάλη τεχνολογική και οικονομική σημασία. Αυτή η πτυχιακή εργασία πραγματεύεται με τις συγκολλήσεις των πλαστικών με laser που είναι μια σχετικά νέα μέθοδος βιομηχανικής επεξεργασίας των πλαστικών.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση σε εργαστηριακό επίπεδο μιας βιομηχανικής διεργασίας και η αναζήτηση των καταλληλότερων και βέλτιστων συνθηκών για την υλοποίηση συγκολλήσεων με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά όπως αντοχή στον εφέλκυσμό, καλή εμφάνιση, στεγανότητα κ.α..

Η συγκόλληση των πολυμερών με laser κατατάσσεται στις αυτογενείς συγκολλήσεις και περιλαμβάνει την συγκόλληση δυο πολυμερών υλικών που σε αυτήν την εργασία είναι φύλλα πολυαιθυλενίου με ή χωρίς πρόσθετα. Τα φύλλα πολυαιθυλενίου τα προμηθευτήκαμε από τη κατασκευάστρια εταιρία **PLASTIKA KRITIS** και το laser που θα χρησιμοποιήθηκε είναι Nd:YAG σε ελεύθερη λειτουργία αντλούμενο από λυχνία εκκένωσης. Το μήκος κύματος του συγκεκριμένου τύπου laser είναι στο κοντινό υπέρυθρο (NIR) στα 1064 nm. Αυτό το μήκος κύματος δεν απορροφάτε αποτελεσματικά από τα πλαστικά και γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η χρήση πρόσθετων ουσιών στα πλαστικά για να αυξήσουν την ικανότητα συγκόλλησης των δειγμάτων.

Σε αυτήν την εργασία για την υλοποίηση των συγκολλήσεων έχει επιλεγεί η διάταξη αλληλοεπικάλυψης κατά την οποία το ένα φύλλο πλαστικού καλύπτει επιφανειακά το άλλο. Κατά αυτήν τη μεθοδολογία το ένα φύλλο, αυτό που επικαλύπτει το άλλο πρέπει να είναι διαπερατό από την ακτινοβολία του laser ενώ το άλλο πρέπει να απορροφά ισχυρά την ακτινοβολία του laser. Έτσι η ακτινοβολία του laser θα προκαλέσει την άνοδο της θερμοκρασίας αρχικά στο απορροφητικό πλαστικό και στην συνέχεια αυτό θα διαχύσει την θερμότητα και στο πλαστικό κομμάτι επικάλυψης με αποτέλεσμα την συνολική τοπική τήξη στο σημείο της έκθεσης. Σε όλη τη φάση της συγκόλλησης επιβάλλεται πίεση στα δείγματα η οποία

απαιτείται να παραμείνει και για κάποιο χρονικό διάστημα μετά την απενεργοποίηση του laser, ώστε να ψυχθούν και να στερεοποιηθούν τα δείγματα.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία τα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι πολύ σημαντικά και ενθαρρυντικά και δείχνουν ότι μπορούμε να επιτύχουμε καλής ποιότητας συγκολλήσεις σε πλαστικά με διαφορετικά πάχη και διαφορετικές πρόσθετες ουσίες. Ακόμη μπορούν να χαρακτηριστούν ως πρώτο βήμα για την μετέπειτα ανάπτυξη ενός αυτοματοποιημένου μοντέλου και την εφαρμογή του σε βιομηχανική κλίμακα από ενδιαφερόμενες εταιρίες.

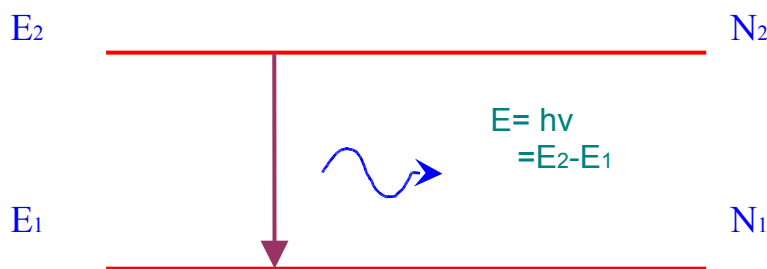
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ LASERS

### 2.1. ΑΥΘΟΡΜΗΤΗ ΚΑΙ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΕΚΠΟΜΠΗ- ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

**LASER** είναι ακρωνύμιο της φράσης **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation: Ενίσχυση Φωτός με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας. Αν και το πρώτο laser κατασκευάστηκε το 1958, η διεργασία της εξαναγκασμένης εκπομπής είχε προβλεφθεί από τον Άλμπερτ Αϊνστάιν ήδη το 1917.

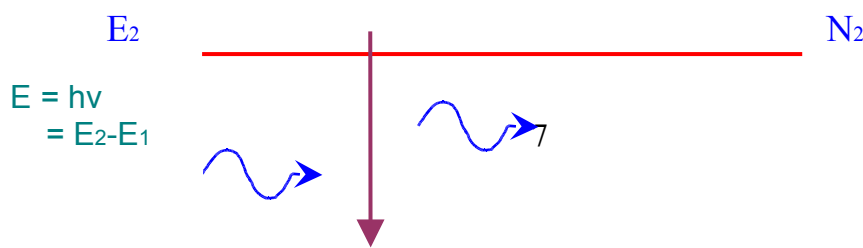
Το laser εκμεταλλεύεται τρία βασικά φαινόμενα που συμβαίνουν όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό (Η.Μ.) κύμα αλληλεπιδρά με ένα υλικό, δηλαδή, τις διεργασίες της αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής και τη διεργασία της απορρόφησης.

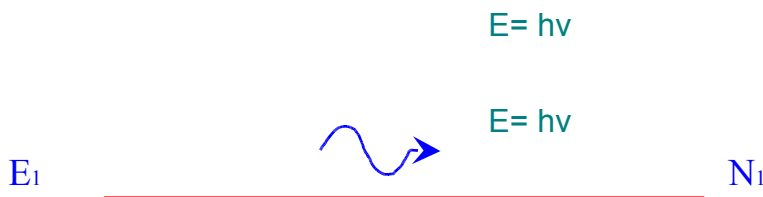
**Αυθόρμητη εκπομπή:** Όπως δηλώνει και το όνομα της, η αυθόρμητη εκπομπή είναι η διαδικασία κατά την οποία ένας πληθυσμός  $N_2$  ατόμων που βρίσκονται στην κατάσταση  $E_2$  μεταβαίνουν αυθόρμητα (αποδιεγείρονται) στη κατάσταση  $E_1$ , όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1. με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων ενέργειας  $h\nu$ , τέτοιας ώστε:  $h\nu = E_2 - E_1$ .



Εικόνα 2.1. Αυθόρμητη εκπομπή.

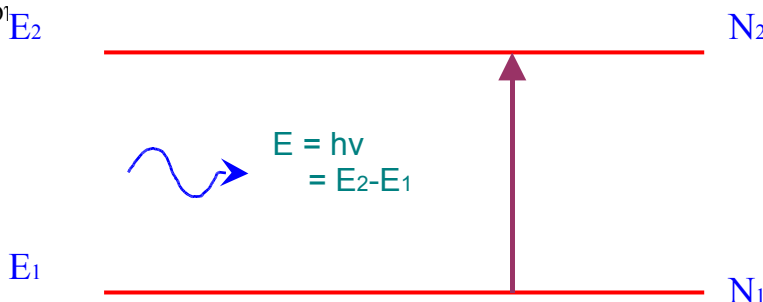
**Εξαναγκασμένη εκπομπή:** Η διαδικασία αυτή είναι η αντίθετη της απορρόφησης που θα αναφερθεί παρακάτω. Αν υπάρχει πληθυσμός  $N_2$  στο επίπεδο  $E_2$ , και το άτομο ακτινοβοληθεί με φωτόνια συχνότητας  $\nu$ , ώστε  $E_2 - E_1 = h\nu$ , το άτομο θα εξαναγκασθεί να εκπέμψει επιπλέον φωτόνια από τα αρχικά, τα οποία θα έχουν την ίδια συχνότητα, την ίδια φάση την ίδια κατάσταση πόλωσης και θα διαδοθούν στην ίδια κατεύθυνση με τα αρχικά φωτόνια που επάγουν το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής.





Εικόνα 2.2. Εξαναγκασμένη εκπομπή.

**Απορρόφηση:** Κατά τη διαδικασία αυτή ένα άτομο στη κατάσταση  $E_1$  απορροφά ένα φωτόνιο και μεταβαίνει στην κατάσταση  $E_2$ . Η διαφορά ενέργειας  $E_2 - E_1$  που απαιτείται από το άτομο για να πραγματοποιήσει τη μετάβαση παρέχεται από την ενέργεια του προσπίπτοντος Η.Μ. κύματος. Αυτή είναι η διαδικασία της απορρόφησης.



Εικόνα 2.3. Απορρόφηση.

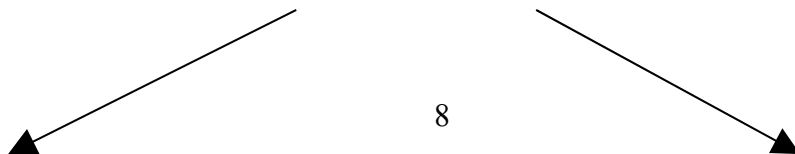
## 2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ LASER

Το laser είναι μια διάταξη που παράγει μια δέσμη σύμφωνου φωτός. Το κάθε laser έχει μια πηγή ατόμων, τα οποία αποτελούν το λεγόμενο **ενεργό μέσο**. Το ενεργό μέσο μπορεί να είναι ένα αέριο, ένα υγρό ή ένα στερεό (στο πρώτο laser είχε χρησιμοποιηθεί ένας κρύσταλλος ρουμπινιού).

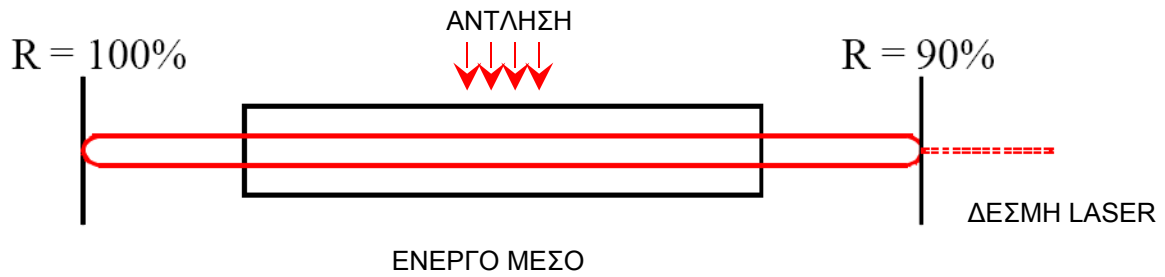
Τα άτομα του μέσου αυτού διεγείρονται σε μετασταθείς καταστάσεις μέσω μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας. Όταν τα περισσότερα άτομα είναι διεγερμένα, ένα μοναδικό φωτόνιο που θα εκπεμφθεί από ένα άτομο που υφίσταται αποδιέγερση μπορεί να πυροδοτήσει μια «αλυσιδωτή αντίδραση». Το φωτόνιο αυτό προσπίπτει σε ένα άλλο άτομο, προκαλώντας εξαναγκασμένη εκπομπή, κ.ο.κ. με αποτέλεσμα τη δημιουργία δέσμης φωτός laser.

Το μεγαλύτερο μέρος του φωτός αυτού διαδίδεται αρχικά σε τυχαίες κατευθύνσεις. Το φως που διαδίδεται, όμως, κατά μήκος του άξονα του laser ανακλάται σε δυο παράλληλα κάτοπτρα με κατάλληλη επίστρωση ώστε να ανακλούν επιλεκτικά το φως ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος. Το ένα κάτοπτρο είναι πλήρως ανακλαστικό, ενώ το άλλο μερικώς. Τα ανακλώμενα κύματα ενισχύονται μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ύστερα από κάθε κύκλο ανακλάσεων ανάμεσα στα δύο κάτοπτρα και δημιουργούν με τον τρόπο αυτό συνθήκες συντονισμού, υπό τις οποίες η ένταση του φωτός αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό. Το φως που διαφεύγει από το άκρο με το ημιπερατό κάτοπτρο αποτελεί τη δέσμη laser.

ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

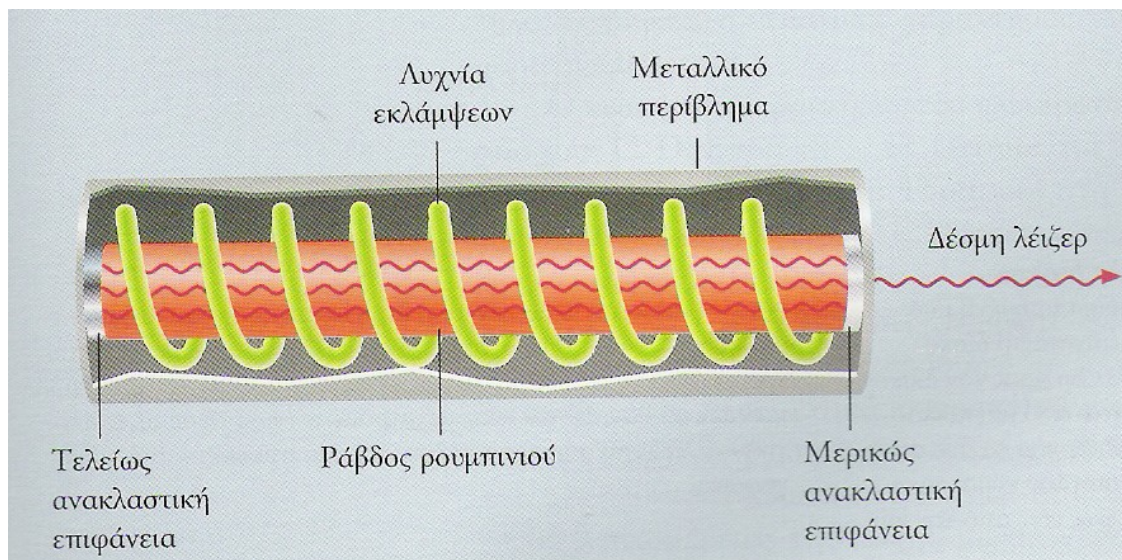






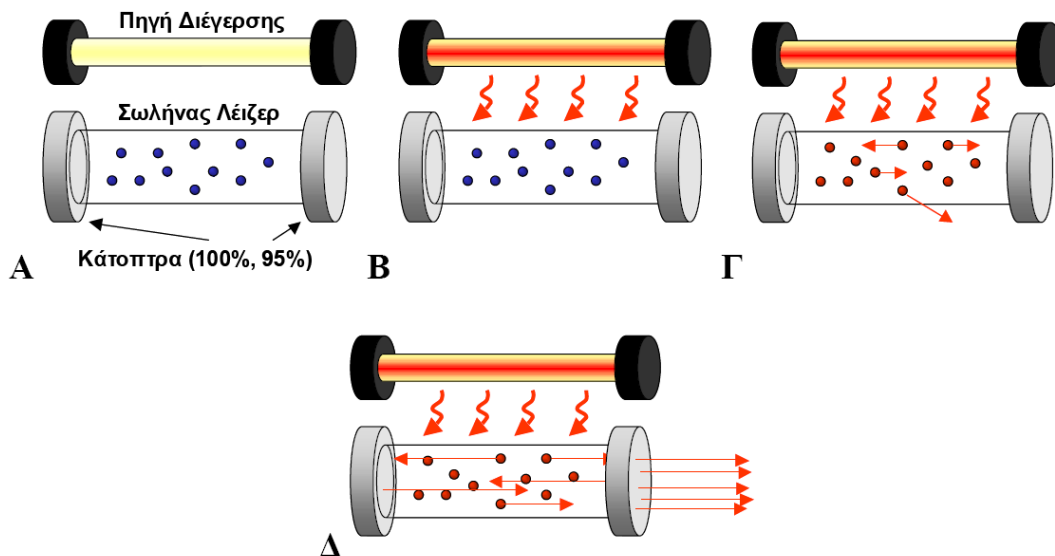
Εικόνα 2.4. Γενική αναπαράσταση laser.

Τα πρώτα laser που αναπτύχθηκαν ήταν τα laser κρυστάλλων και αερίου, και ακολούθησαν τα laser γυαλιού, υγρού, ημιαγωγών, καθώς και τα χημικά laser. Τα σύγχρονα μοντέλα παράγουν δέσμες με μήκος κύματος που εκτείνονται από το υπέρυθρο έως το υπεριώδες.



Εικόνα 2.5. Το Ruby laser είναι το πρώτο laser που εφευρέθηκε.

Στις εικόνες φαίνεται η αρχή λειτουργίας του laser



Εικόνα 2.6. Βήματα για την παραγωγή δέσμης laser

### Βήματα λειτουργίας του laser:

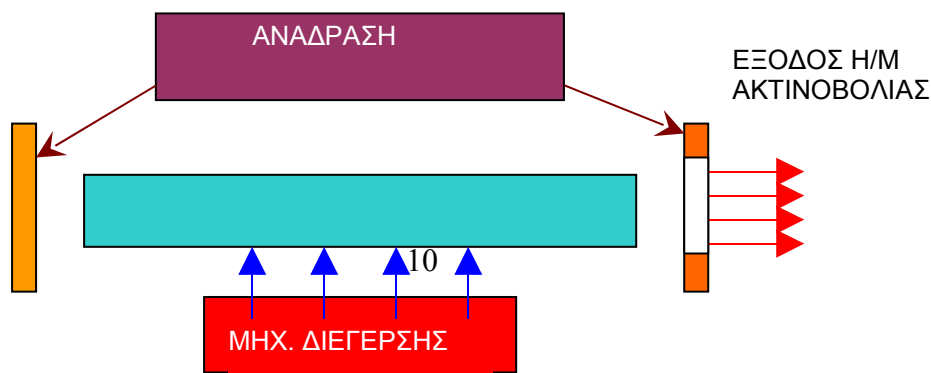
- Laser σε κατάσταση ηρεμίας.
- Η πηγή διέγερσης τίθεται σε λειτουργία
- Τα άτομα του υλικού απορροφούν ενέργεια, περνούν σε κατάσταση διέγερσης και αρχίζουν να ελευθερώνουν φωτόνια.
- Τα φωτόνια ανακλούνται μεταξύ των δυο κατόπτρων, απελευθερώνουν άλλα φωτόνια και, όταν αυξηθούν αρκετά, τότε μερικά ξεφεύγουν.

### 2.3. Τα μέρη ενός τυπικού συστήματος laser

Το laser αποτελείται από:

- Μία κοιλότητα κυλινδρικής μορφής, το σωλήνα laser, που περιέχει σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφή το λεγόμενο **ενεργό μέσο** (που παίζει το ρόλο του οπτικού ενισχυτή).
- Στα άκρα, δύο παράλληλα κάτοπτρα, το ένα ολικής ανάκλασης (100% του φως ανακλάται) και το άλλο μερικής (10-99% του φως ανακλάται) ανάκλασης (**οπτική κοιλότητα του laser**).
- Στο εξωτερικό του σωλήνα laser, μια πηγή διέγερσης του ενεργού υλικού, η οποία λειτουργεί, ανάλογα με το τύπο του laser, με ηλεκτρική εκκένωση, με εκλάμψεις, ή με την εισαγωγή ηλεκτρικών φορτίων.
- Το μηχανισμό εξόδου της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (**συζεύκτης εξόδου**).

Μια απλοποιημένη διάταξη laser φαίνεται στο σχήμα κάτω.





Εικόνα 2.7. Απλοποιημένη διάταξη συστήματος laser.

### 2.3.1. Το ενεργό μέσο

Το ενεργό μέσο ή υλικό αποτελείται από ένα πλήθος ατόμων ή μορίων τα οποία μπορούν να διεγερθούν σε κατάσταση αναστροφής πληθυσμού και με τη βοήθεια της εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας να εκπέμψουν ακτινοβολία.

Το ενεργό μέσο όπως έχουμε δει νωρίτερα μπορεί να είναι σε κάθε κατάσταση της ύλης : στερεό, υγρό ή πλάσμα, ουδέτερο ηλεκτρικά ή ιονισμένο. Ο συνδυασμός ενεργού μέσου και οπτικής κοιλότητας είναι αυτό που θα καθορίσει σε ποιο μήκος κύματος είναι δυνατό να εκπέμψει ένα laser.

Το μήκος κύματος της εκπομπής επιβάλλεται από τις δυνατές μεταβάσεις μεταξύ των ενεργειακών επιπέδων του ενεργού μέσου.

### 2.3.2. Η οπτική κοιλότητα του laser

Ο μηχανισμός ανάδρασης επιτρέπει σ'ένα μέρος, της παραγόμενης μέσα στο ενεργό μέσο ακτινοβολίας laser να παραμείνει μέσα σ'αυτό και να αυξηθεί σε ένταση. Συνήθως, ο μηχανισμός ανάδρασης αποτελείται από δυο ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους κάτοπτρα (μεταξύ των οποίων βρίσκεται το ενεργό μέσο), ούτως ώστε η ακτινοβολία να ανακλάται από το ένα στο άλλο διασχίζοντας το ενεργό μέσο.

Η διάταξη αυτή ονομάζεται **οπτική κοιλότητα**. Τις περισσότερες φορές το ένα κάτοπτρο 100% ανακλαστικό ενώ το άλλο μερικώς ανακλαστικό (από 10 έως 99%, ανάλογα με τον τύπο του laser). Το μέρος της ακτινοβολίας που διαφεύγει από το ημιπερατό κάτοπτρο αποτελεί την ακτινοβολία laser. Η ανάδραση επιτρέπει στα φωτόνια να διασχίσουν πολλές φορές την οπτική κοιλότητα και να πολλαπλασιασθούν, δηλαδή να ενισχυθεί η ακτινοβολία laser.

Εξ αιτίας της γεωμετρίας της οπτικής κοιλότητας μόνο τα φωτόνια που ταξιδεύουν πάνω στον οπτικό άξονα «επιζούν» και ενισχύονται. Αυτό έχει ως συνέπεια την κατευθυντικότητα της δέσμης των ακτίνων laser, που θα αναλυθεί παρακάτω.

**Ο μηχανισμός εξόδου** της δέσμης laser ή **συζεύκτης εξόδου** αποτελείται από ένα ημιπερατό κάτοπτρο όπως είδαμε παραπάνω. Το μέρος της δέσμης που δεν ανακλάται από το κάτοπτρο αυτό μέσα στο ενεργό μέσο, εξέρχεται της κοιλότητας του laser.

Στα laser συνεχούς λειτουργίας (CW) το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται από το ημιπερατό κάτοπτρο και παραμένει μέσα στην κοιλότητα, ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό εξέρχεται της κοιλότητας. Αντίθετα, σε μερικά παλμικά laser το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ακτινοβολίας μια συγκεκριμένη στιγμή εξέρχεται της κοιλότητας με τη μορφή ενός παλμού.

Γενικά, ο ρόλος της οπτικής κοιλότητας είναι να υποστηρίζει τους τρόπους ταλάντωσης της ακτινοβολίας laser, στους οποίους συγκεντρώνεται τελικά όλη η ενέργεια του laser.

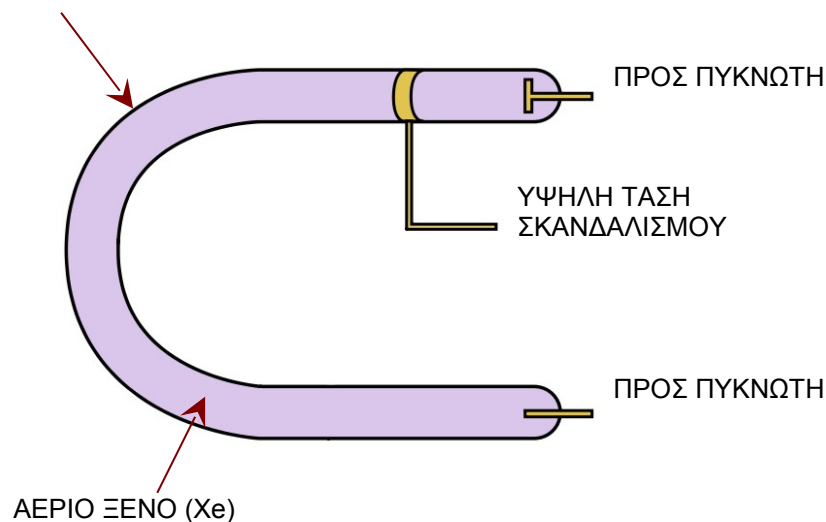
### 2.3.3. Μηχανισμοί διέγερσης του ενεργού μέσου

Ο μηχανισμός διέγερσης που αναφέρεται και με τον όρο **άντληση** είναι η πηγή ενέργειας του συστήματος ώστε να επιτευχθεί η αναγκαία για τη δράση laser αναστροφή πληθυσμών. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να επιτευχθεί αυτό:

**α) Οπτική άντληση – Διέγερση με φωτόνια:** Σε πολλά laser, όπου το ενεργό μέσο είναι στερεό ή υγρό, είναι σύνηθες η απαιτούμενη για τη διέγερση του laser ενέργεια να προσφέρεται υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή φωτονίων. Οι πλέον κοινές πηγές τέτοιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι:

- Λυχνίες εκκένωσης αερίων χαμηλής ή υψηλής πίεσης (π.χ. Xe, Kr, He κτλ. ).
- Άλλα laser (π.χ. excimer laser, laser αζώτου, δυοδικά laser, laser ιόντων αργού κτλ.).

ΓΥΑΛΙΝΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ



Εικόνα 2.8. Λυχνία εκλάμψεων (flash lamp) ξένου (Xe) σχήματος U.

**β) Ηλεκτρική διέγερση αερίου:** Στις περιπτώσεις όπου το ενεργό υλικό είναι αέριο πολύ συχνά χρησιμοποιούνται οι ηλεκτρικές εκκενώσεις μέσα στο αέριο αυτό.

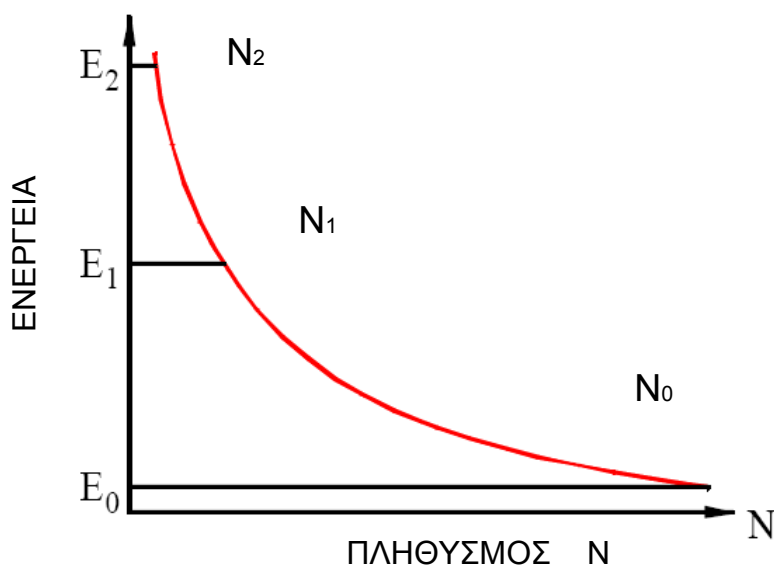
Το αέριο του σωλήνα είναι αρχικά σε ουδέτερη ηλεκτρική κατάσταση, με τα άτομα ή τα μόρια του αερίου στη θεμελιώδη τους κατάσταση. Με την εφαρμογή ενός παλμού υψηλής τάσης και συχνά με την επιπλέον βοηθητική θέρμανση της καθόδου (θερμιονική εκπομπή) παράγονται ηλεκτρόνια, τα οποία ευρισκόμενα στη διαφορά δυναμικού μεταξύ καθόδου και ανόδου επιταχύνονται, συγκρούονται με άλλα άτομα ή μόρια, τα ιονίζουν ή και τους μεταφέρουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας.

Η διαδικασία αυτή παράγει άτομα ή μόρια σε διεγερμένες καταστάσεις και είναι δυνατό να δημιουργηθεί αναστροφή πληθυσμών. Στην αρχή της εκκένωσης είναι απαραίτητο να εφαρμοσθεί υψηλή, ώστε να ξεκινήσει η εκκένωση, ενώ αργότερα μια χαμηλότερη τάση είναι αρκετή για τη διατήρηση της εκκένωσης.

**γ) Διέγερση μέσω κρούσεων με άτομα:** Αποτελεί μια παραλλαγή του προηγούμενου τρόπου διέγερσης, που συναντάται πολύ συχνά στην τεχνολογία laser (π.χ. laser He-Ne, laser CO<sub>2</sub>). Όπως και προηγουμένως, ένα αέριο λαμβάνει ενέργεια από τα ηλεκτρόνια που επιταχύνθηκαν, διεγείρεται και στη συνέχεια την αποδίδει σ' ένα άλλο αέριο μέσω κρούσεων.

**δ) Χημική διέγερση:** Κατά τη διέγερση αυτή η απαραίτητη ενέργεια προσφέρεται από χημική αντίδραση μεταξύ ατόμων ή μορίων.

**ε) Διέγερση με ηλεκτρικό ρεύμα:** Κατά τη διεργασία αυτή, που εφαρμόζεται στα διοδικά laser, η απαραίτητη ενέργεια προσφέρεται από το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το ενεργό μέσο.



Εικόνα 2.9. Κατανομή Boltzmann για τρεις ενεργειακές στάθμες.

#### **2.4. Ιδιότητες της δέσμης laser.**

Η συχνότητα  $\nu$  της αυθόρμητης εκπομπής ηλεκτρομαγνητικού κύματος δίνεται από τη σχέση:  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ , εξαρτάται δηλαδή από την ενεργειακή

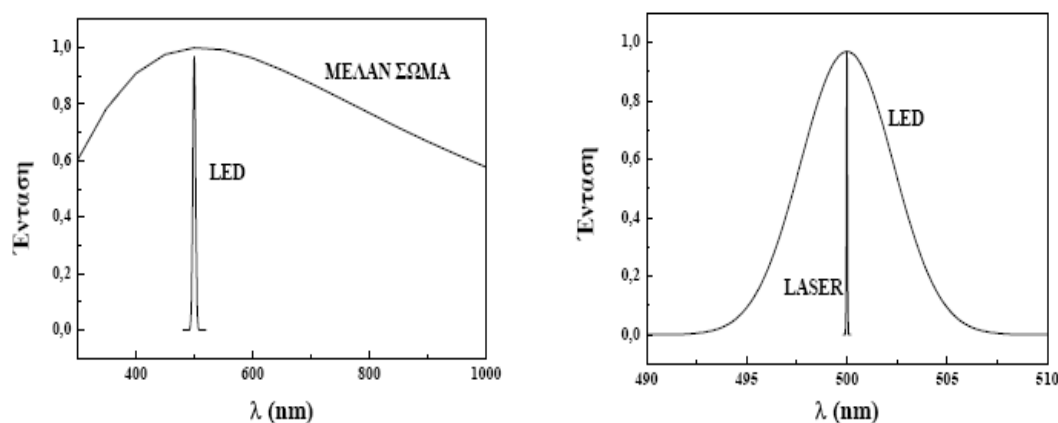
διαφορά  $E_2 - E_1$  των ενεργειακών καταστάσεων όπου έχουμε την αντιστροφή πληθυσμών.

Επομένως η εκπεμπόμενη συχνότητα της ακτινοβολίας από μια συσκευή laser μπορεί να βρίσκεται στην υπέρυθη, ορατή ή υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ανάλογα με το ενεργό υλικό που χρησιμοποιείται. Η ακτινοβολία laser παρουσιάζει τις παρακάτω βασικές ιδιότητες που τη διαφοροποιούν σημαντικά από τις άλλες συνήθεις πηγές ακτινοβολίας.

#### 2.4.1. Μονοχρωματικότητα

Η πιο βασική ίσως ιδιότητα της ακτινοβολίας laser είναι η μονοχρωματικότητα της. Αυτό συμβαίνει διότι μόνο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας  $\nu$  ενισχύεται από το ενεργό μέσο. Αν και καμία φωτεινή πηγή δεν μπορεί να δώσει απολύτως μονοχρωματικό φως τα laser δίνουν την καλύτερη προσέγγιση ως προς αυτό.

Λόγω της αρχής της αβεβαιότητας των κρούσεων και του φαινομένου Doppler η συχνότητα  $\nu$  έχει μια διαπλάτυνση  $\Delta\nu$ . Επίσης οι ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης της οπτικής κοιλότητας, οι οποίες βρίσκονται εντός της  $\Delta\nu$ , θα επιλέξουν τελικά τις συχνότητες των laser.



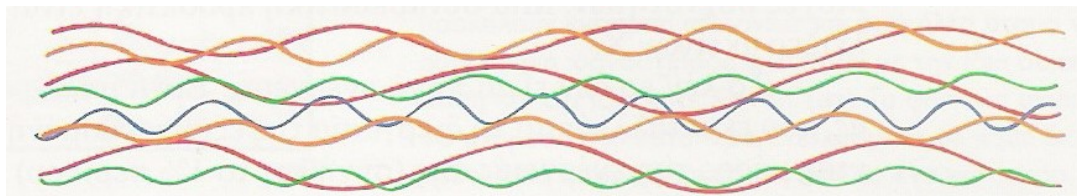
Εικόνα 2.10. Φασματική κατανομή εκπομπής από μέλαν σώμα, LED και LASER.

Η φασματική γραμμή εκπομπής από μια πηγή laser είναι ιδιαίτερα λεπτή, μια ιδιότητα την οποία η επιστήμη δεν είχε καταφέρει να επιτύχει με κλασικές πηγές ακόμα και μετά από προσπάθειες πολλών ετών. Για να γίνει κατανοητή η πρόοδος που πέτυχε το laser, η φασματική γραμμή του βρέθηκε να είναι περίπου ένα εκατομμύριο φορές στενότερη από τα καλύτερα αποτελέσματα των κλασικών πηγών.

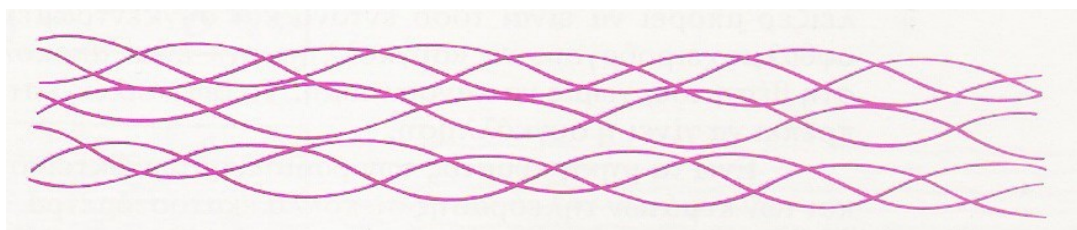
Ένα παράδειγμα πλάτους φασματικής γραμμής εκπομπής κοντά στα 500nm παρουσιάζεται στην εικόνα 2.10. για μέλαν σώμα (εκπομπή λόγω θερμοκρασίας), LED και LASER, όπου είναι εμφανής η τεράστια διαφορά που επιτυγχάνεται με το LASER. Ταυτόχρονα βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι η πολύ στενή φασματική γραμμή συνοδεύεται από μεγάλο αριθμό φωτονίων, συνδυασμός ιδιοτήτων που ήταν αδύνατος χωρίς το laser.

#### 2.4.2 Συμφωνία

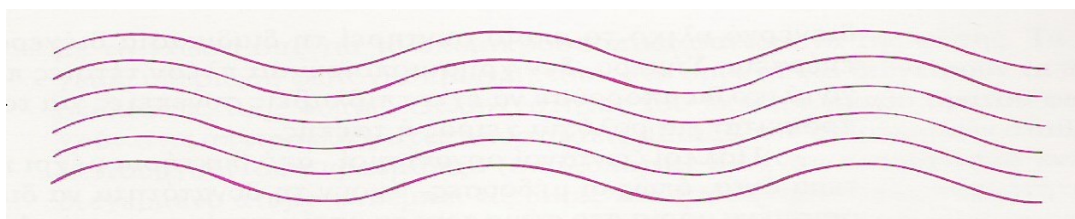
Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της ακτινοβολίας laser είναι η συμφωνία. Τα εκπεμπόμενα κύματα έχουν χωρική και χρονική συμφωνία. Έχουν δηλαδή ακριβώς την ίδια φάση στο χώρο και στο χρόνο. Αυτό συμβαίνει διότι τα διεγερμένα άτομα δεν από-διεγείρονται τυχαία και αυθόρμητα, αλλά με τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής που στην αρχή του κεφαλαίου αναφέραμε. Αυτό έχει σαν επακόλουθο την εκπομπή πανομοιότυπων φωτονίων.



Εικόνα 2.11. Το ασύμφωνο λευκό φως περιέχει κύματα πολλών συχνοτήτων (και μηκών κύματος) που βρίσκονται εκτός φάσης μεταξύ τους.



Εικόνα 2.11. Ακόμη και το φως μιας και μόνο συχνότητας (και ενός μήκους κύματος) εξακολουθεί να περιέχει μια μεγάλη ποικιλία φάσεων.



Εικόνα 2.12. Σύμφωνο φως. Όλα τα κύματα είναι πανομοιότυπα και σε φάση μεταξύ τους.

### 2.4.3. Κατευθυντικότητα

Σε αντίθεση με τις άλλες φωτεινές πηγές, η ακτινοβολία που εξέρχεται από ένα laser διαδίδεται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση με μικρή γωνιακή διασπορά ως προς την κατεύθυνση διάδοσης. Παρουσιάζει, δηλαδή, **κατευθυντικότητα**.

Όσο δε μικρότερη είναι η γωνία απόκλισης, τόσο μεγαλύτερη είναι η κατευθυντικότητα της δέσμης. Ο τύπος του οπτικού αντηχείου, η ποιότητα των καθρεπτών της κοιλότητας καθώς και ο τρόπος άντλησης του laser καθορίζουν το βαθμό κατευθυντικότητας της δέσμης laser.

#### 2.4.4. Λαμπρότητα

Η λαμπρότητα ή φωτεινότητα (brightness) της ακτινοβολίας των διάφορων συστημάτων laser είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να γίνει συγκρίσιμη ή ακόμη και πολύ μεγαλύτερη της λαμπρότητας του ήλιου. Για το λόγο αυτό θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να λαμβάνουμε τις κατάλληλες προφυλάξεις και ποτέ να μην παρατηρούμε δέσμες laser απευθείας.

Τα laser είναι πηγές ακτινοβολίας μεγάλης λαμπρότητας. Έχουν δηλαδή υψηλή ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και περιοχής συχνότητας η οποία οφείλεται κυρίως στην υψηλή κατευθυντικότητα της εκπεμπόμενης δέσμης και την εκπομπή σε περιορισμένο αριθμό ιδιοσυχνοτήτων εντός της φασματικής περιοχής  $\Delta f$ . Για παράδειγμα το γνωστό He-Ne laser εκπέμπει σε τρεις συχνότητες οι οποίες απέχουν 500MHz μεταξύ τους.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι ακόμα και ένα laser μικρής σχετικά ισχύος έχει λαμπρότητα που είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή των λαμπρότερων συνήθων πηγών.

#### 2.5. Τύποι laser

Οι διάφοροι τύποι των lasers καθορίζονται από τα διαφορετικά "υλικά" που χρησιμοποιούνται σαν ενεργά μέσα για την παραγωγή ακτινοβολίας. Τα "υλικά" αυτά πρέπει να πληρούν τουλάχιστον τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Πρέπει να είναι φθορίζοντα. Δηλαδή, πρέπει να αποδίδουν την ενέργεια αποδιέγερσης με τη μορφή φωτονίων.
- Πρέπει να διαθέτουν κατάλληλες ενεργειακές στάθμες, κατάλληλες για την διαδικασία διέγερσης (άντλησης) και αποδιέγερσης (εκπομπής) φωτός.
- Πρέπει να έχουν την ικανότητα να μετασχηματίζουν μεγάλο ποσοστό από την εξωτερική ενέργεια, που χορηγείται για τη διαδικασία της άντλησης, σε φθορίζουσα ακτινοβολία.

Τα "υλικά" που χρησιμοποιούνται σήμερα σαν ενεργά μέσα, και επομένως οι κατηγορίες των laser, είναι :

##### 2.5.1. Laser στερεάς κατάστασης

Όπως δηλώνει και ο τίτλος, στα laser της κατηγορίας αυτής το ενεργό υλικό είναι στερεό, συνήθως υπό τη μορφή πρόσμιξης (κυρίως ιόντων) μέσα σε κάποιον υποδοχέα-κρύσταλλο ( host material ).

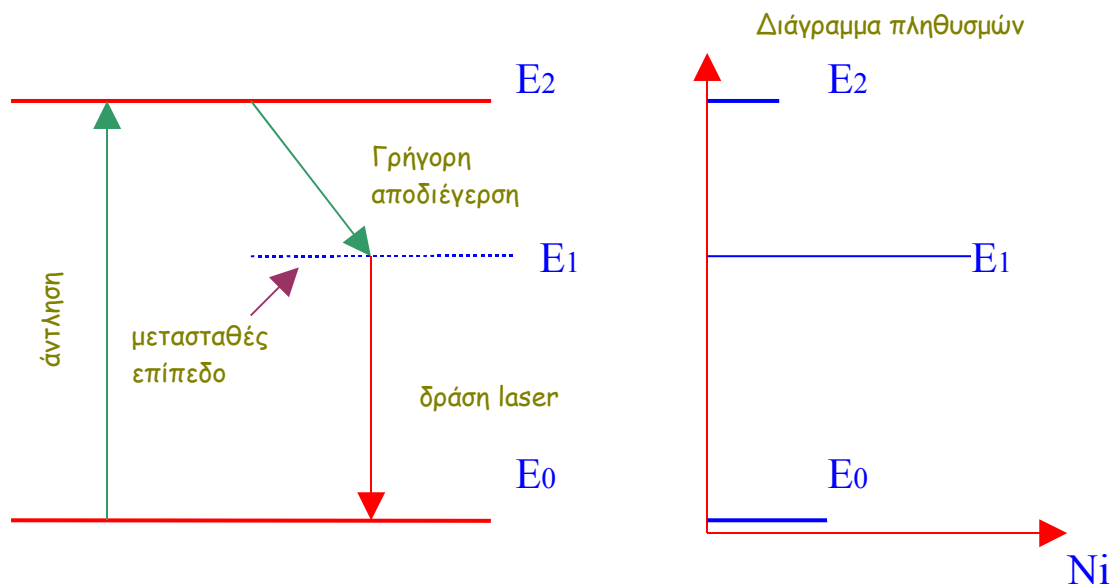
Εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων των ενεργών ατόμων-ιόντων με το πλέγμα του κρυστάλλου, τα ενεργειακά τους επίπεδα είναι διαπλατυσμένα, όπως άλλωστε αντανακλάται από τις ευρείες ζώνες εκπομπής και απορρόφησης που παρουσιάζουν τα φάσματά τους. Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι ότι η άντληση μπορεί να γίνει αποδοτικά τόσο από ειδικές λυχνίες εκκένωσης (ευρείας φασματικής εκπομπής) όσο και από άλλα laser (πηγές στενής φασματικής εκπομπής).

Παρακάτω παρατίθενται μερικά αντιπροσωπευτικά laser στερεάς κατάστασης καθώς και λίγες πληροφορίες για το καθένα.



**Το ruby (ρουβιδίου) laser.** Ο κρύσταλλος ρουβιδίου, που είναι το γνωστό μας ρουμπίνι, είναι το πρώτο ενεργό υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ακτινοβολίας laser από τον T.Maiman το 1958. Το ruby laser εκπέμπει στο ερυθρό, στα 694,3nm.

Από χημική άποψη ο κρύσταλλος του ρουβιδίου είναι οξείδιο του αλουμινίου  $Al_2O_3$  (το ονομαζόμενο ζαφείρι-sapphire), με περίπου 0.05% κατά βάρος πρόσμιξη τρισθενών ιόντων χρωμίου ( $Cr^{3+}$ ). Το υπεύθυνο για τη δράση laser υλικό είναι στην ουσία τα ιόντα του χρωμίου, τα οποία αντικαθιστούν μερικά άτομα Al στο πλέγμα του κρυστάλλου  $Al_2O_3$ . Σ' αυτά εξάλλου οφείλεται και το χαρακτηριστικό ερυθρό χρώμα του κρυστάλλου του ρουβιδίου. Το ruby laser είναι ένα σύστημα τριών επιπέδων, όπου η αναστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται μεταξύ του  $E_1$  και του  $E_0$  θεμελιώδους επιπέδου.



Εικόνα 2.13. Ενεργειακό διάγραμμα και διάγραμμα πληθυσμών συστήματος τριών επιπέδων.

**Τα laser νεοδυμίου (Nd-lasers).** Στα lasers αυτά, τρισθενή ιόντα νεοδυμίου (σπάνια γαία,  $Nd^{3+}$ ) χρησιμοποιούνται ως προσμίξεις (μερικά τοις % κατά βάρος) μέσα σε κάποιο άλλο υλικό-υποδοχέα. Τα υλικά-υποδοχείς που χρησιμοποιούμε στα laser της κατηγορίας αυτής είναι κυρίως τα εξής:

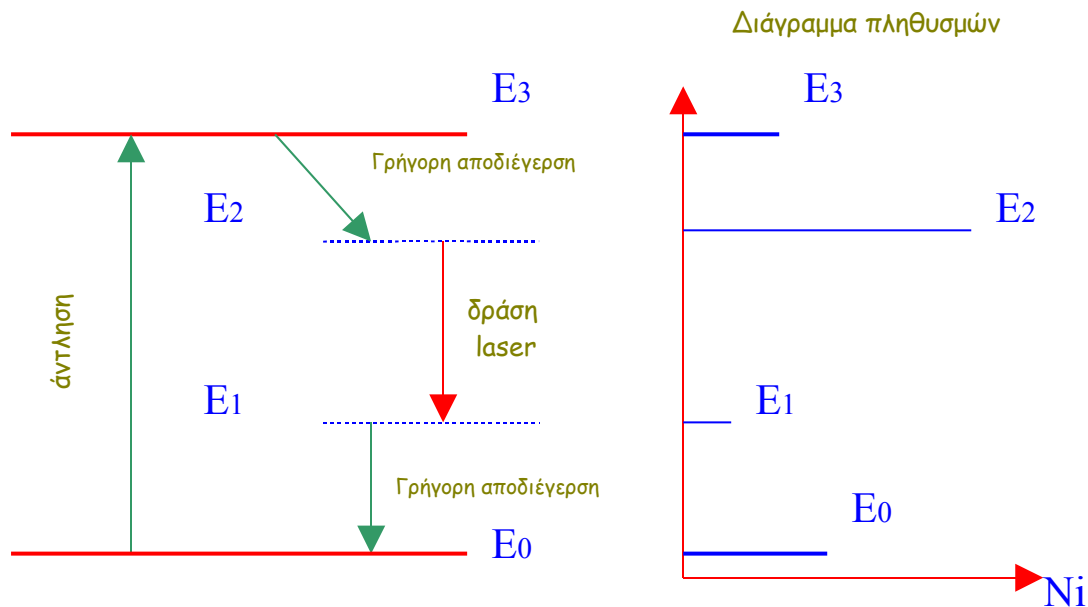
- Ο κρύσταλλος υτρίου-αλουμινίου ( $Y_3Al_5O_{12}$ , Yttrium Aluminum Garnet ή YAG).
- Το γυαλί ( $SiO_2$  και άλλες προσμίξεις).
- Ο κρύσταλλος υτρίου-λιθίου-φθορίου ( $LiYF_4$ , Lithium Yttrium tetra-Fluoride ή YLF).

Η επιλογή του υποδοχέα εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το laser. Έτσι, για παράδειγμα το YAG χρησιμοποιείται όταν επιδιώκουμε υψηλή συχνότητα παλμικής λειτουργίας. Το laser Nd-YAG θα αναπτυχθεί περισσότερο στο επόμενο κεφάλαιο.

**Το laser αλεξανδρίτη (Alexandrite,  $Cr^{3+} : BeAl_2O_4$ ).** Το ενεργό στοιχείο στο laser αυτό είναι το χρώμιο, με τη μορφή τρισθενών ιόντων ( $Cr^{3+}$ ) ως πρόσμιξη σε περιεκτικότητες από 0.01 ως 0.4% κατά βάρος σε κρυστάλλους  $BeAl_2O_4$ .

Το laser αλεξανδρίτη λειτούργησε για πρώτη φορά το 1973 ως σύστημα τριών επιπέδων με μήκος κύματος εκπομπής τα 680nm. Λίγα χρόνια αργότερα ανακαλύφθηκε ότι σε λίγο μεγαλύτερα μήκη κύματος, 720-800nm, το laser δούλευε εξίσου καλά ως σύστημα τεσσάρων επιπέδων και μάλιστα μεταβλητού μήκους κύματος. Έτσι, έχουμε ένα laser στερεάς κατάστασης μεταβλητού μήκους κύματος.

Τα laser αλεξανδρίτη μπορούν να λειτουργούν είτε κατά τρόπο συνεχή επιτυγχάνοντας μέση ισχύ περίπου 20 Watt, ή παλμικά με ενέργεια αρκετών Joule ανά παλμό.



Εικόνα 2.14. Ενεργειακό διάγραμμα και διάγραμμα πληθυσμών συστήματος τεσσάρων επιπέδων.

**Το laser Ti:Sapphire.** Στο laser αυτό τρισθενή ιόντα τιτανίου ( $Ti^{3+}$ ) αντικαθιστούν μερικά άτομα Al μέσα στο πλέγμα του κρυστάλλου  $Al_2O_3$ , σε περιεκτικότητα 0.1% κατά βάρος, δημιουργώντας το ενεργό υλικό  $Ti : Al_3O_2$ . Η δράση laser στο ενεργό αυτό υλικό δείχθηκε για πρώτη φορά το 1982. Τα laser της κατηγορίας αυτής λειτουργούν παλμικά ή και κατά συνεχή τρόπο.

Τα Ti:Sapphire laser είναι μεταβλητού μήκους κύματος (όπως και το laser του αλεξανδρίτη) και παρουσιάζουν τη μέγιστη δυνατότητα μεταβολής μήκους κύματος από όλα τα μέχρι σήμερα γνωστά laser, 660-1180nm.

**Τα laser Cr:LiSAF και Cr:LiCaF.** Τα ενεργά υλικά των laser αυτών είναι οι κρυσταλλοί Cr:LiSrAlF (ή LiSAF σε συντομία) και Cr:LiCaF (ή LiCaF σε συντομία) αντίστοιχα. Οι κρύσταλλοι αυτοί παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τον κρύσταλλο του  $Ti:Al_3O_2$ . Έτσι (1) Έχουν μεγαλύτερους χρόνους ζωής του άνω επιπέδου της μετάβασης laser καθιστώντας δυνατή την άντλησή τους με παλμικές λυχνίες εκκένωσης. (2) Ο LiSAF έχει φασματική περιοχή απορρόφησης (άντλησης) από 300 ως 720nm και είναι δυνατό να αντληθεί ακόμα και με μικρού μήκους κύματος διοδικά laser. Έχουν όμως και πολλά μειονεκτήματα και έτσι η χρήση τους ουσιαστικά έχει καταργηθεί.

Εκπέμπει στην περιοχή 800 ως 1050 nm, αλλά με στενότερο φασματικό εύρος από τον κρύσταλλο  $Ti:Al_3O_2$ . Επιπλέον, οι κρύσταλλοι LiSAF είναι δυνατό να κατασκευάζονται σε μεγαλύτερα μεγέθη, επιτρέποντας έτσι επίτευξη μεγαλύτερων ισχυών εξόδου από το σύστημα laser. (3) Ο LiCaF λειτουργεί σε σχετικά μικρότερα μήκη κύματος και εκπέμπει στην περιοχή 700-900 nm.

**Τα laser χρωματικών κέντρων (Color Center Laser).** Η έκθεση κρυστάλλων των αλκαλικών αλογονιδίων σε ισχυρή ακτινοβολία, όπως για παράδειγμα ακτίνων X ή δεσμών ηλεκτρονίων, δημιουργεί εστίες ανωμαλίας στο σώμα του κρυστάλλου (defects).

Η ανάπτυξη τέτοιων τοπικών ανωμαλιών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή, τη διαταραχή των ενεργειακών ζωνών του κρυστάλλου και τη δημιουργία επιπρόσθετης απορρόφησης, η οποία εκφράζεται με το χρωματισμό (εμφάνιση χρώματος) στο σώμα του κρυστάλλου. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος τα laser αυτά ονομάζονται laser χρωματικών κέντρων.

Τα laser χρωματικών κέντρων αναπτύχθηκαν κυρίως από την ανάγκη κάλυψης με ακτινοβολία laser της φασματικής περιοχής των 0.6-4μm. Αντλούνται από άλλα laser και μπορούν να είναι μεταβλητού μήκους κύματος. Εντούτοις όμως δεν έτυχαν ευρείας χρήσης και αυτό λόγω του ότι δεν είναι αρκετά σταθερά, έχουν σχετικά μικρούς χρόνους ζωής και απαιτείται ψύξη τους σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους είναι η εξαιρετική φασματική καθαρότητά τους.

**Τα laser σπάνιων γαιών.** Τα laser των σπάνιων γαιών χόλμιο (Ho, Holmium), έρβιο (Er, Erbium) και θούλιο (Th, Thulium), αν και ανακαλύφθηκαν και μελετήθηκαν την ίδια χρονική περίοδο, στις αρχές του 1960, με τα laser νεοδυμίου, εντούτοις παρέμειναν για αρκετά χρόνια στην αφάνεια. Αυτό ίσως συμβαίνει γιατί εμφανίζουν μικρότερες αποδόσεις απ' ότι τα laser νεοδυμίου, ή γιατί δεν είχαν ευρεθεί ακόμα εφαρμογές γι' αυτά. Στις μέρες μας πάντως χρησιμοποιούνται αρκετά στους τομείς της ιατρικής και της τηλεμετρίας.

### 2.5.2. Τα laser αερίων

Τα περισσότερα από τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα είναι δυνατό να παράγουν ακτινοβολία laser όταν βρεθούν στην αέρια κατάσταση και κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Επίσης πάρα πολλά μόρια, ιδιαίτερα αυτά με μικρό αριθμό

ατόμων, έχουν χρησιμοποιηθεί ως ενεργά υλικά και έχει δειχθεί η ύπαρξη δράσης laser σ' αυτά. Η πίεση του αέρα είναι συνήθως μερικά mbar. Αυτό υπαγορεύεται από το γεγονός ότι στα laser αερίου συχνά χρησιμοποιούμε την ηλεκτρική εκκένωση για την άντληση. Μεγάλες πιέσεις θα είχαν σαν αποτέλεσμα τη δυσκολία εκκίνησης της εκκένωσης και επιπλέον τη δημιουργία φασματικής διαπλάτυνσης των μεταβάσεων, πράγμα ανεπιθύμητο. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν και laser αερίων όπου η πίεση είναι αρκετά υψηλή.

Τα laser αερίων εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα. Το ενεργό τους υλικό είναι ιδιαίτερα ομογενές, είναι συστήματα σχετικά καλής απόδοσης και παράγουν δέσμες laser καλής οπτικής ποιότητας. Παρουσιάζουν όμως και σοβαρά μειονεκτήματα. Συνήθως έχουν μεγάλο όγκο και απαιτούν ογκώδη τροφοδοτικά (λόγω των μεγάλων πυκνωτών) με χρήση υψηλών ρευμάτων και τάσεων, που τα καθιστά ασύμβατα με τις περισσότερες εφαρμογές και χρήσεις, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη ότι οι σύγχρονες τάσεις είναι για laser μικρού μεγέθους και ηλεκτρικές τροφοδοσίες συμβατές με τα ηλεκτρονικά στερεάς κατάστασης.

Παρακάτω παρατίθενται μερικά αντιπροσωπευτικά laser αερίων καθώς και λίγες πληροφορίες για το καθένα.

**Το laser ηλίου-νέου (He-Ne laser).** Το laser He-Ne είναι ιστορικά το πρώτο laser αερίου. Κατασκευάστηκε σχεδόν αμέσως μετά το laser ρουβιδίου, το 1961, και εξέπεμπε ακτινοβολία laser στα 1.15 $\mu\text{m}$ . Το laser αυτό παράγει μιας μικρής ισχύος ορατή δέσμη που χρησιμεύει σαν οδηγός σε άλλες δέσμες laser που το μήκος κύματος τους δεν βρίσκεται στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα laser He-Ne είναι χαμηλής ισχύος (0.5-50mWatt), εξαιτίας της χαμηλής απολαβής ενεργού υλικού. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε φοιτητικά εργαστήρια για ευθυγραμμίσεις και για όργανα επίδειξης της δράσης laser σε αέρια.

**Τα Laser μεταλλικών ατμών.** Στα laser της κατηγορίας αυτής το ενεργό υλικό είναι μεταλλικοί ατμοί, όπως υποδηλώνει και το όνομα. Διακρίνουμε δυο τύπους, αυτά των οποίων το ενεργό υλικό είναι ηλεκτρικά ουδέτερο (π.χ. ατμών χαλκού, χρυσού) και αυτά των οποίων το ενεργό υλικό είναι ηλεκτρικά φορτισμένο (π.χ. laser ηλίου-καδμίου).

**Το laser ιόντων αργού (Argon Ion-  $\text{Ar}^+$  laser).** Το ενεργό υλικό των laser αυτών είναι τα ιόντα του αργού ( $\text{Ar}^+$ ). Η μετάβαση laser συμβαίνει μεταξύ ενεργειακών επιπέδων του ιόντος. Τα ιόντα έχουν παραχθεί από τον ιονισμό του αργού μέσα στο σωλήνα του laser μέσω κρούσεων με τα ενεργητικά ηλεκτρόνια της καθόδου.

Τα laser των ιονισμένων αερίων είναι τα μοναδικά που παράγουν ακτινοβολία laser διαφόρων χρωμάτων στην περιοχή του ορατού και μάλιστα με αρκετή ισχύ (5-10 Watt). Η απόδοσή τους όμως είναι χαμηλή (0.1%), γιατί ένα μεγάλο μέρος της προσφερόμενης σε αυτά ενέργειας χρησιμοποιείται για τον ιονισμό του ενεργού υλικού.

**Laser μοριακών αερίων.** Στα laser της κατηγορίας αυτής υπάγονται συστήματα των οποίων το ενεργό υλικό είναι μοριακό αέριο. Τα laser που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα σχετίζονταν με μεταβάσεις ηλεκτρονίων από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Στην περίπτωση όμως των μορίων τα πράγματα είναι περισσότερο

σύνθετα, γιατί τα μόρια έχουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας απ' ότι τα άτομα, επειδή έχουν τις σχετικές κινήσεις των ατόμων μεταξύ τους.

Τα laser μοριακών αερίων χρησιμοποιήθηκαν για πολλά χρόνια ως πηγές laser στο μακρινό υπέρυθρο (far-infrared). Σχεδόν όλα τα μόρια έχουν χρησιμοποιηθεί ως ενεργά υλικά και υπάρχουν κατάλογοι με τα μήκη όπου εμφανίζουν δράση laser. Ονομάζονται και περιστροφικά υπέρυθρα laser, εξαιτίας του γεγονότος ότι η δράση laser επιτυγχάνεται μεταξύ περιστροφικών επιπέδων.

**Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub> Laser).** Η δράση laser με ενεργό υλικό το διοξείδιο του άνθρακα δείχθηκε για πρώτη φορά το 1964 σε καθαρό CO<sub>2</sub>. Στη συνέχεια βρέθηκε ότι η προσθήκη και άλλων αερίων, όπως αζώτου και ηλίου, βελτιώνει την απόδοση της λειτουργίας του laser. Συγκεκριμένα, ευρέθηκε ότι μείγμα CO<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> : He σε αναλογία 1:1:8 είναι το καταλληλότερο για συνεχή (RF) λειτουργία.

Σε αυτόν τον τύπο laser θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στα επόμενα κεφάλαια λόγω της ευρείας χρήσης του σε βιομηχανικές εφαρμογές.

**Laser αζώτου (N<sub>2</sub> Laser).** Το ενεργό υλικό των laser αυτών που πρωτοπαρουσιάστηκαν είναι το αέριο άζωτο (N<sub>2</sub>). Είναι τα απλούστερα στην κατασκευή και για το λόγο αυτό εδώ και δεκαετίες κυκλοφορούν κατασκευαστικά σχέδια ακόμη και για οικιακές κατασκευές. Εκπέμπουν παλμικά στην υπεριώδη περιοχή του Η/Μ φάσματος και βρίσκουν χρήση στον τομέα της ιατρικής.

**Laser διεγερμένων διμερών (Excimer lasers).** Στα laser αυτά το ενεργό υλικό είναι διεγερμένα διμερή μόρια αποτελούμενα από ένα άτομο ευγενούς αερίου (Ar, Xe, ή Kr) και ένα άτομο αλογόνου (F, Cl, Br ή I). Η ιδιομορφία των μορίων αυτών οφείλεται στο γεγονός ότι τα δύο άτομα που τα απαρτίζουν, όταν ενωθούν στις θεμελιώδεις ηλεκτρονικές τους καταστάσεις, σχηματίζουν το αντίστοιχο διμερές μόριο (π.χ. ArF, KrF, XeF, XeCl κτλ.) στη θεμελιώδη του κατάσταση, το οποίο όμως είναι εξαιρετικά ασταθές έχοντας πρακτικά μηδέν χρόνο ζωής ( $\sim 10^{-13}$  s). Όταν όμως τα δύο άτομα ενωθούν κάτω από ειδικές συνθήκες και σχηματίσουν το διεγερμένο διμερές μόριο, τότε αυτό είναι μετασταθές έχοντας ικανοποιητικό χρόνο ζωής ( $\sim 6-10$  nsec).

Η ιδιομορφία αυτή των διεγερμένων διμερών έγινε αντιληπτή και κατανοητή το 1971, όταν δείχθηκε για πρώτη φορά εξαναγκασμένη εκπομπή στο μόριο του Xe<sub>2</sub>, και λίγα χρόνια αργότερα, το 1975, κατασκευάστηκε το πρώτο excimer laser XeBr. Το μεγάλο πλεονέκτημα των laser αυτών είναι ότι εκπέμπουν στην περιοχή του υπεριώδους (353-193nm), ακόμα και του υπεριώδους κενού (157nm), με σημαντικές αποδόσεις. Τα laser διεγερμένων διμερών λειτουργούν μόνο παλμικά με τυπικούς χρόνους παλμού 10-30 nsec.

**Laser οργανικών χρωστικών (Dye laser).** Τα laser οργανικών χρωστικών είναι τα μόνα laser όπου το ενεργό υλικό είναι σε υγρή κατάσταση, μεγάλα οργανικά μόρια χρωστικών διαλυμένα σε οργανικούς διαλύτες (μεθανόλη, αιθυλενογλυκόλη, διοξάνη κτλ.) σε συγκεντρώσεις της τάξης 1:10000. Η λειτουργία τους δείχθηκε για πρώτη φορά το 1965 και για πολλά χρόνια ήταν τα μοναδικά laser μεταβλητού μήκους κύματος που υπήρχαν. Τα laser αυτά αντλούνται συνήθως από

άλλα laser (π.χ. συνήθως από excimer laser, τη δεύτερη αρμονική laser Nd:YAG) και σπανιότερα από λυχνίες εκκένωσης (flash pumped).

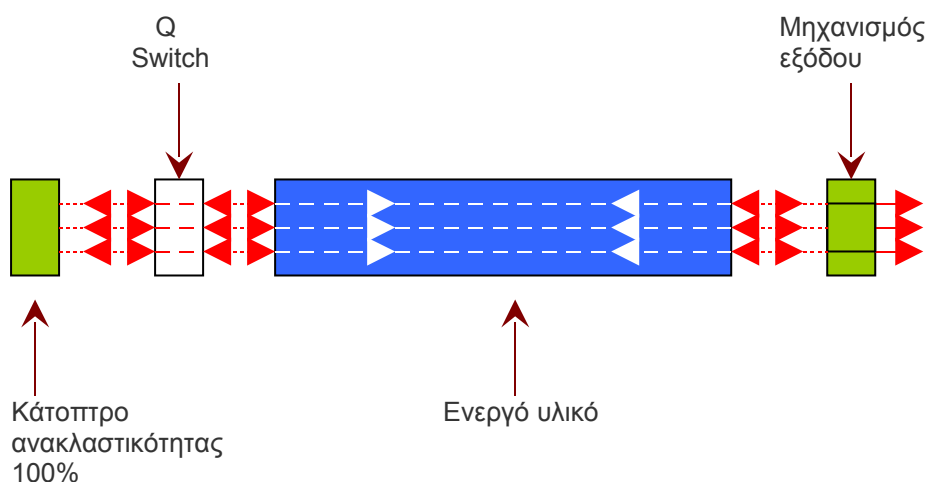
## 2.6. Διαμόρφωση παλμών

### 2.6.1 Η τεχνική της διαμόρφωσης του παράγοντα Q (Q-switching).

Η τεχνική **Q-switching** χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη δημιουργία παλμών laser πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (μερικών nsec έως μερικών δεκάδων nsec) και υψηλής ισχύος κορυφής (από μερικά MW έως πολλές δεκάδες MW). Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής έγκειται στη διαμόρφωση του παράγοντα Q της οπτικής κοιλότητας ενός laser, από μια χαμηλή τιμή σε μια υψηλή τιμή.

Έτσι, για παράδειγμα (εικόνα 2.15), αν υποθέσουμε ότι έχουμε εισάγει ένα διάφραγμα μέσα στην κοιλότητα του laser, τότε, αν το διάφραγμα είναι κλειστό, δεν είναι δυνατό να αναπτυχθεί δράση laser και κατά συνέπεια η αναστροφή πληθυσμών που δημιουργείται με την άντληση του ενεργού υλικού του laser μπορεί να φθάσει σε πολύ μεγαλύτερη τιμή από την που θα έφθανε αν δεν υπήρχε το διάφραγμα στην οπτική κοιλότητα. Αν τώρα το διάφραγμα ανοίξει ξαφνικά, το laser θα έχει μια απολαβή πολύ μεγαλύτερη από τις απώλειες και η αποθηκευμένη στο ενεργό υλικό ενέργεια άντλησης θα απελευθερωθεί με τη μορφή ενός παλμού μικρής χρονικής διάρκειας (εξαρτώμενης από τη ταχύτητα ανοίγματος του διαφράγματος) και μεγάλης έντασης.

Για να επιτύχουμε έναν μόνο παλμό, πρέπει το άνοιγμα του διαφράγματος να γίνει σε μικρό χρονικό σε σύγκριση με το χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία ενός παλμού του laser. Σε περίπτωση βραδείας αλλαγής (slow switching) είναι δυνατό να δημιουργηθούν πολλαπλοί παλμοί. Η κατάσταση αυτή οφείλεται στο ότι για κάθε σταδιακή μεταβολή του συντελεστή Q της κοιλότητας η αποθηκευμένη ενέργεια στο ενεργό υλικό μειώνεται κατά μια ποσότητα η οποία εκπέμπεται σαν ένας επιμέρους παλμός και έτσι η συνολικά αποθηκευμένη ενέργεια θα εκπεμφθεί σταδιακά με τη μορφή σειράς μικρών παλμών και όχι με τη μορφή ενός μεγάλου παλμού.



Εικόνα 2.15. Σχηματικό διάγραμμα Q-switched laser

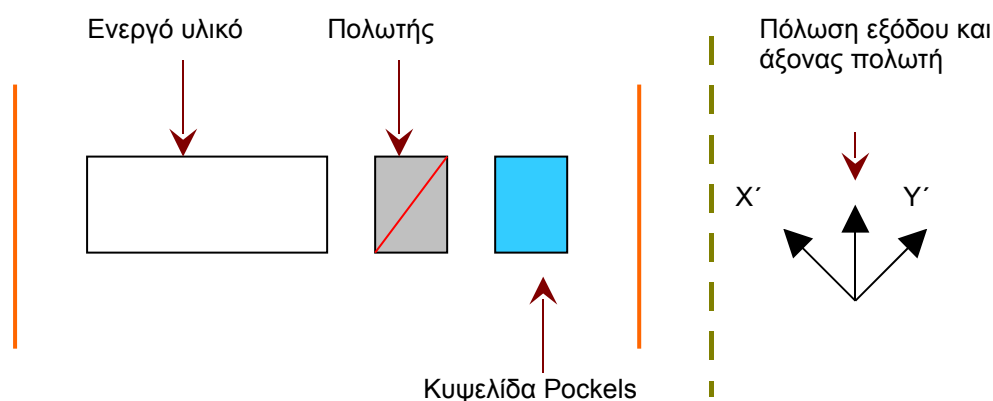
### Μέθοδοι Q-switching

Από την εποχή που εμφανίστηκαν τα πρώτα laser έχουν προταθεί και εφαρμοσθεί διάφορες τεχνικές για τη διαμόρφωση του παράγοντα Q. Οι πλέον γνωστές και διαδεδομένες από αυτές τις τεχνικές είναι οι παρακάτω:

α) **Ηλεκτρο-οπτικά διαφράγματα:** Η βασική αρχή λειτουργίας είναι το ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο. Όταν εφαρμόζεται κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο σ' έναν κρύσταλλο ή ειδικό υγρό, τότε αυτό αποκτά διπλοθλαστικές ιδιότητες. Η διπλοθλαστικότητα επιδρά στη πόλωση του φωτός που διέρχεται μέσα από αυτό. Επιπλέον μέσα στην κοιλότητα είναι αναγκαίο να υπάρχει κάποιο στοιχείο που να ορίζει την πόλωση της διερχόμενης ακτινοβολίας. Ένα τέτοιο στοιχείο συνήθως είναι ένας πολωτής.

Όταν εφαρμόζεται η τάση στον κρύσταλλο ή στην κυψελίδα που περιέχει το υγρό, η πόλωση του διερχόμενου φωτός στρέφεται κατά  $45^\circ$ . Στη συνέχεια το φως ανακλάται από το κάτοπτρο και ξαναπερνά από τον κρύσταλλο ή την κυψελίδα υπό τάση και στρέφεται ακόμα  $45^\circ$ . Έτσι, σε σχέση με την αρχική πόλωση, έχουμε συνολικά στροφή της γωνίας πόλωσης κατά  $90^\circ$  σε σχέση με την αρχική. Η δέσμη με την πόλωση αυτή εύκολα απομακρύνεται από την κοιλότητα (με χρήση του ίδιου πολωτή που αρχικά πόλωσε το φως σε γωνία  $0^\circ$ ) και έτσι έχουμε αυξημένες απώλειες.

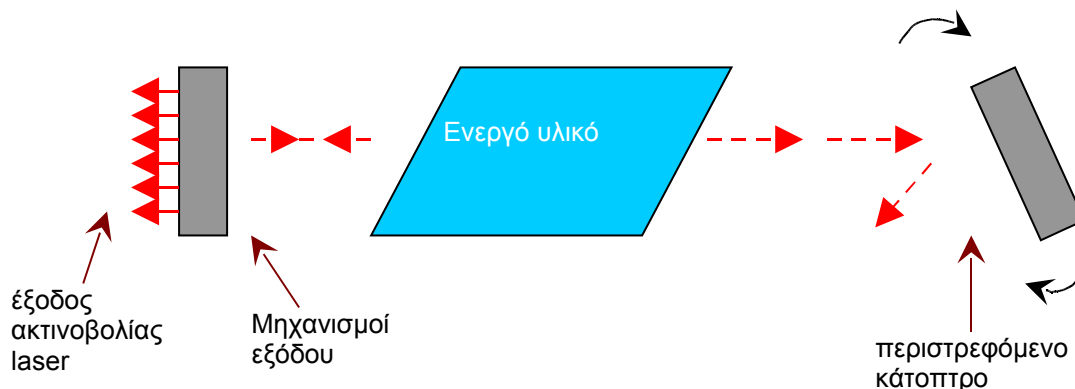
Με μηδενική τάση δεν επηρεάζεται η πόλωση της ακτινοβολίας και έτσι αυτή συνεχίζει να ταξιδεύει χωρίς απώλειες μέσα στην κοιλότητα, με καλό παράγοντα ποιότητας Q. Διακρίνουμε δυο ειδών ηλεκτρο-οπτικές διατάξεις: την κυψελίδα του **Kerr** και την κυψελίδα του **Pockels**. Η κυψελίδα του **Pockels** προτιμάται γιατί χρησιμοποιεί χαμηλότερες τάσεις λειτουργίας.



Εικόνα 2.16. Διάταξη Q-switching με συνδυασμό πολωτή και κυψελίδας Pockels

β) **Μηχανικά διαφράγματα:** Το Q-switching με τη βοήθεια μηχανικών διαφραγμάτων συνίσταται στην περιστροφή ενός από τα κάτοπτρα της κοιλότητας του laser γύρω από άξονα κάθετο ως προς τον άξονα της κοιλότητας, όπως δείχνεται στην εικόνα 2.17. παρακάτω. Έτσι, όταν το κάτοπτρο ανακλά τη δέσμη μέσα στην οπτική κοιλότητα για να εκτελέσει τη συνήθη διαδρομή της, ο παράγων Q έχει μεγάλη τιμή (λέμε ότι ο διακόπτης είναι ανοικτός), ενώ όταν το κάτοπτρο διακόπτει τη διάδοση της δέσμης, ο παράγων Q έχει μικρή τιμή (λέμε ότι ο διακόπτης είναι κλειστός).

Για να αποφευχθεί η πολλαπλή εκπομπή παλμών, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιείται μεγάλη συχνότητα περιστροφής. Για παράδειγμα, σε μια οπτική κοιλότητα μήκους  $L=50\text{cm}$  απαιτούνται περίπου 30.000 στροφές ανά λεπτό. Σήμερα ο μηχανικός αυτός τρόπος μεταβολής του παράγοντα  $Q$  της κοιλότητας δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα.



Εικόνα 2.17. Διάταξη Q-switching με σύστημα περιστρεφόμενου κατόπτρου

γ) **Διαφράγματα κορέσιμου απορροφητή:** Στη μέθοδο αυτή το διάφραγμα έχει αντικατασταθεί από μια κυψελίδα που περιέχει κατάλληλο κορέσιμο απορροφητή (saturable absorber), ο οποίος πρέπει να απορροφά στο μήκος κύματος λειτουργίας του laser. Συνήθως χρησιμοποιείται κάποιος κρύσταλλος ή διάλυμα κορέσιμης οργανικής χρωστικής (π.χ. στα laser Nd: YAG η χρωστική BDN). Η κυψελίδα της χρωστικής τοποθετείται μέσα στη κοιλότητα, συνήθως μεταξύ του ενεργού υλικού και του κατόπτρου 100% ανακλαστικότητας.

Η χρωστική ονομάζεται κορέσιμος απορροφητής, επειδή ο συντελεστής απορρόφησης μειώνεται δραστικά με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας που τη διαπερνά. Το διάλυμα έτσι γίνεται διαπερατό σε υψηλές εντάσεις. Η μείωση του

συντελεστή απορρόφησης δίνεται από τη σχέση: 
$$a = \frac{a_0}{1 - \frac{I}{I_s}}$$
, όπου  $a_0$  η τιμή του

συντελεστή απορρόφησης σε μικρή ένταση και  $I_s$  είναι η ένταση κορεσμού, δηλαδή η τιμή της έντασης για την οποία ο συντελεστής απορρόφησης μειώνεται στο μισό.

Για να είναι μια χρωστική καλός κορέσιμος απορροφητής, πρέπει να φθάνει σε κορεσμό σε σχετικά χαμηλές εντάσεις (μερικά KW έως MW) και να αποκρίνεται γρήγορα.

δ) **Ακουστο-οπτικό Q-switching:** Στην τεχνική αυτή εισάγεται στην κοιλότητα ένας ακουστο-οπτικός διαμορφωτής. Ο ακουστο-οπτικός διαμορφωτής αποτελείται συνήθως από κάποιο οπτικά διαπερατό υλικό (π.χ. γυαλί quartz ή τηγμένος χαλαζίας  $\text{SiO}_2$  για το ορατό, γερμάνιο για το υπέρυθρο), στο οποίο διαδίδεται ένα κύμα υπέρηχων από έναν πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα. Στην πράξη, η μηχανική τάση που επάγεται από το κύμα δημιουργεί χωρική διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης του υλικού. Δηλαδή, δημιουργεί ένα φράγμα περίθλασης. Το φράγμα αυτό έχει χαρακτηριστικά ανάλογα του μήκους κύματος και του πλάτους του ηχητικού κύματος που το δημιουργήσαν.

Εάν μια ακουστό-οπτική κυψελίδα τοποθετηθεί στην οπτική κοιλότητα ενός laser, είναι σαν να εισάγεται μια ελεγχόμενη απώλεια στην κοιλότητα, όταν



τροφοδοτείται κατάλληλα ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Έτσι, ένα μέρος της δέσμης υφίσταται περίθλαση έξω από την κοιλότητα και, εάν η τάση τροφοδοσίας είναι αρκετά μεγάλη, η επιπρόσθετη αυτή απώλεια είναι αρκετή ώστε να σταματήσει τη ταλάντωση laser. Έτσι με την κατάλληλη ηλεκτρονική διάταξη που είναι σε συγχρονισμό με την άντληση μπορούμε να διαμορφώνουμε τις συνθήκες για ελεγχόμενη περιοδική εκπομπή παλμών από την κοιλότητα.

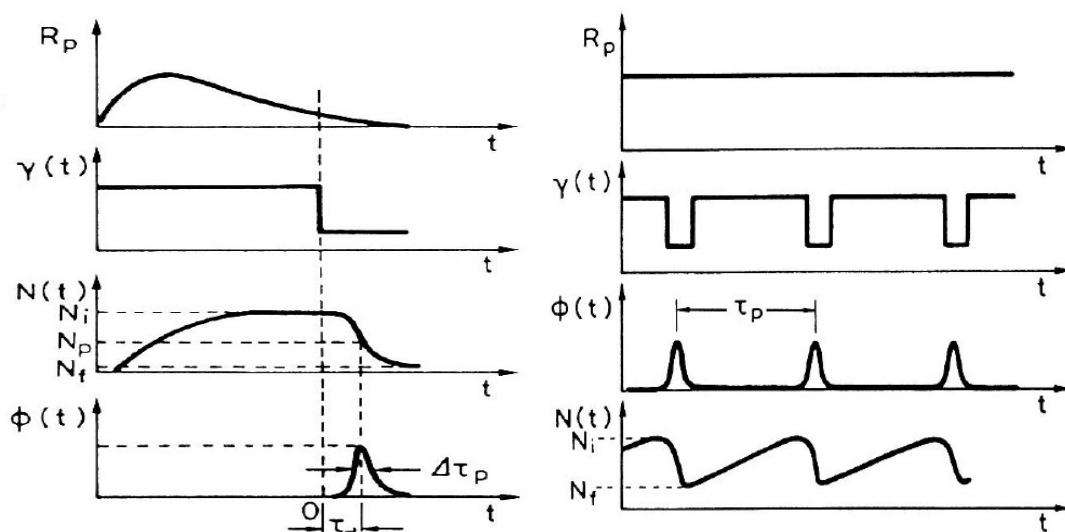
### Συνθήκες λειτουργίας

Η τεχνική Q-switching χρησιμοποιείται από laser τα οποία λειτουργούν είτε παλμικά είτε κατά συνεχή τρόπο.

**α) Laser παλμικής λειτουργίας.** Στη περίπτωση αυτή η άντληση  $R_p$  είναι παλμική. Η αναστροφή πληθυσμών  $N$  αυξάνεται έως μια μέγιστη τιμή και μετά τείνει να σταθεροποιηθεί λόγω της αυθόρμητης εκπομπής. Ο παράγοντας  $Q$  της κοιλότητας μεταβάλλεται τη στιγμή που η αναστροφή πληθυσμών  $N$  αποκτά τη μέγιστη τιμή της, οπότε η κοιλότητα αρχίζει να ταλαντώνεται, ενώ η αναστροφή πληθυσμών αρχίζει να μειώνεται, έως ότου η αναστροφή πληθυσμών φθάσει πάλι σε τιμή χαμηλότερη αυτής που αντιστοιχεί στη συνθήκη κατωφλίου.

Η διαδικασία περιγράφεται σχηματικά στα διαγράμματα της εικόνας 2.18. Όπου  $R_p$  είναι η παλμική άντληση,  $\gamma$  οι απώλειες της κοιλότητας,  $N$  η αναστροφή πληθυσμών και  $\Phi$  το πλήθος των φωτονίων που εκπέμπονται από την κοιλότητα. Κατά την παλμική λειτουργία χρησιμοποιούνται συνήθως ηλεκτρο-οπτικά ή μηχανικά διαφράγματα καθώς επίσης και κορέσιμοι απορροφητές.

**β) Λειτουργία Q-switched laser με συνεχή άντληση.** Στην περίπτωση αυτή η άντληση εφαρμόζεται στο laser συνεχώς και οι απώλειες της κοιλότητας αλλάζουν περιοδικά. Η έξοδος του laser αποτελείται από μια συνεχή σειρά φωτεινών παλμών, ενώ η αναστροφή πληθυσμών ταλαντώνεται με την αντίστοιχη περίοδο. Όταν πρόκειται για συνεχή άντληση, χρησιμοποιούνται μηχανικά διαφράγματα ή συνηθέστερα ακουστό-οπτικοί μετατροπείς.



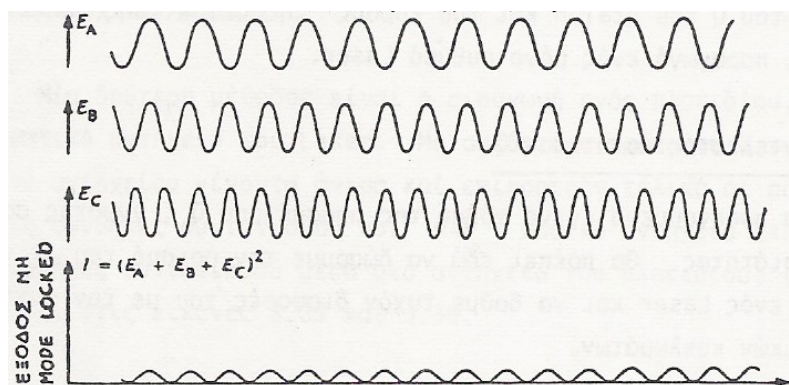
Εικόνα 2.18. Δημιουργία παλμού σε Q-switched laser α) παλμικής άντλησης και β) συνεχή άντληση.

### 2.6.2. Η τεχνική της εγκλείδωσης ρυθμών (mode locked).

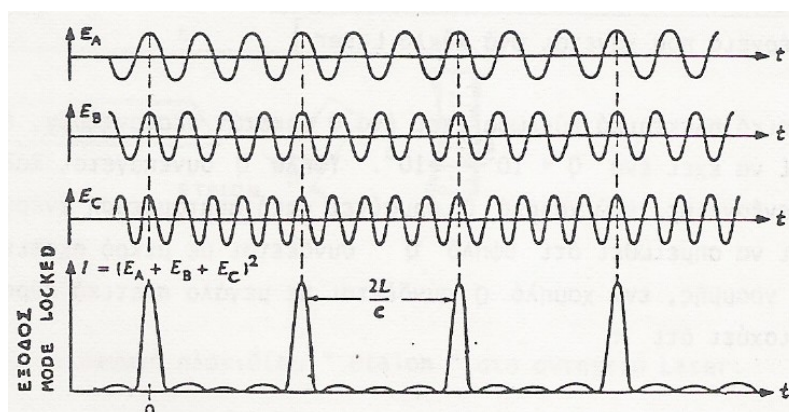
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει παλμούς laser πολύ μεγάλης ισχύος αλλά επίσης και πολύ μικρής χρονικής διάρκειας. Ένα κλασσικό αντηχείο laser μπορεί να συντηρεί ταλαντώσεις πολλών ρυθμών. Η έξοδος ενός τέτοιου laser σαν συνάρτηση του χρόνου εξαρτάται από τις σχετικές συχνότητες, τις φάσεις και τα πλάτη των ρυθμών.

Σ' ένα κλασσικό laser όλοι αυτοί οι παράμετροι μεταβάλλονται με τον χρόνο και η έξοδος του laser μεταβάλλεται τυχαία. Αν όμως ένας εξωτερικός παράγοντας υποχρεώσει τους διάφορους ρυθμούς να διατηρούν σταθερή σχέση φάσης μεταξύ τους, η έξοδος του laser γίνεται επαναλήψιμη και το laser ονομάζεται mode locked. Για να δημιουργηθούν υψηλής ισχύος, μικρής διάρκειας παλμοί πρέπει να υπάρχουν πολλοί ρυθμοί που λειτουργούν. Αυτό είναι μια συνήθεις κατάσταση για τα laser.

Στα διαγράμματα παρακάτω παρουσιάζεται η δημιουργία παλμών σαν αποτέλεσμα αθροίσεως τριών μόνο ρυθμών χαμηλής συχνότητας.



Εικόνα 2.19. Δημιουργία παλμών σαν αποτέλεσμα άθροισης τριών ρυθμών.



Εικόνα 2.20. Δημιουργία παλμών σαν αποτέλεσμα άθροισης τριών ρυθμών.

Στην εικόνα 2.19. τα τρία ημιτονοειδή κύματα αθροίζονται και δίνουν ένα κύμα, το τετράγωνο του οποίου παριστά την έξοδο laser. Οι φάσεις των κυμάτων όπως φαίνεται και στην εικόνα είναι διαφορετικές

Αντίθετα στην εικόνα 2.20, οι φάσεις των τριών κυμάτων είναι μηδενικές για  $t=0$ . Σ' αυτήν την περίπτωση το αποτέλεσμα της άθροισης είναι μια σειρά παλμών με περίοδο  $T = 1/\Delta \nu$ , δηλαδή το αντίστροφο του  $\Delta \nu = C/2L$ .

Επομένως τελικά πρέπει να πληρούνται δυο συνθήκες για να επιτευχθεί σωστή λειτουργία mode locking. Πρέπει να υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός ρυθμών που ταλαντώνονται μέσα στο αντηχείο laser και επίσης πρέπει να υπάρχει κάποιος μηχανισμός που να υποχρεώνει τους ρυθμούς αυτούς να διατηρούν συγκεκριμένη σχέση φάσης μεταξύ τους. Η πρώτη συνθήκη εξασφαλίζεται με τα αντηχεία μεγάλου μήκους και η δεύτερη με το να μεταβάλλονται οι απώλειες του αντηχείου laser σε συχνότητα ίση προς  $C/2L$ . Τέτοιες μεταβολές των απωλειών του αντηχείου laser εξασφαλίζονται με ανάλογες μεθόδους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο του Q-switching και πιο συγκεκριμένα με την μέθοδο ακουστο-οπτικού Q-switching.

## Συνθήκες λειτουργίας

Τα laser εγκλειδωμένων ρυθμών μπορούν να λειτουργήσουν είτε με παλμική είτε με συνεχή (CW) άντληση. Στην περίπτωση παλμικής άντλησης η συνολική χρονική διάρκεια της συστοιχίας των παλμών εγκλειδωμένου ρυθμού καθορίζεται σε μερικές περιπτώσεις από τη διάρκεια του παλμού άντλησης.

Στη παλμική περίπτωση τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα στοιχεία για την εγκλείδωση ρυθμών είναι οι ηλεκτρο-οπτικοί διαμορφωτές κυψελίδας τύπου Pockels ή κυψελίδα κορέσιμου απορροφητή.

Για συνεχή (CW) εγκλείδωση ρυθμών, όπου το laser αντλείται από άλλο συνεχούς λειτουργίας laser, η εγκλείδωση ρυθμών επιτυγχάνεται συνήθως με χρήση κορέσιμου απορροφητή είτε με τη χρήση ακουστο-οπτικού διαμορφωτή.

## 2.7. Εφαρμογές των laser

Σήμερα τα laser χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Μάλιστα λόγω της μεγάλης ποικιλίας των διαθέσιμων laser σήμερα, η χρησιμότητα τους αγγίζει πολλά πεδία επιστημών, αλλά και εφαρμογών. Τα laser σήμερα χρησιμοποιούνται όπου είναι χρήσιμα τα χαρακτηριστικά που τα διέπουν, ενώ γίνεται εντατική έρευνα πάνω σε μελλοντικές εφαρμογές τους, νέα laser, εξέλιξη των υπαρχόντων. Παρακάτω αναφέρονται ονομαστικά οι κυριότερες εφαρμογές των laser που είναι:

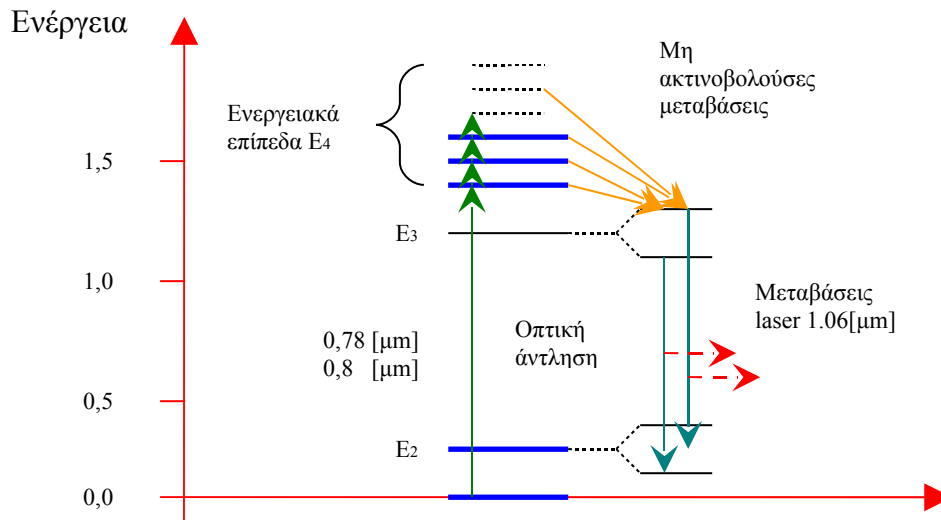
- Τεχνολογία και επιστήμη υλικών.
- Ιατρική.
- Βιομηχανία.

- Διαχωρισμός ισοτόπων.
- Ολογραφία (holography).
- Συστήματα πληροφοριών.
- Οπτικές επικοινωνίες (optical communications).
- Οπτικά Radar.
- Μετρήσεις στο περιβάλλον.
- Συστήματα προσγείωσης (Laser landing system).
- Θερμοπυρηνική σύντηξη.
- Έρευνα στη βιολογία, χημεία, φυσική κλπ.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: LASER ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

### **3.1. LASER Nd:YAG**

Τα lasers νεοδυμίου (Nd) είναι ο πιο δημοφιλής τύπος laser στερεάς κατάστασης. Το ενεργό μέσο του laser Nd:YAG είναι ένας κρύσταλλος  $Y_3Al_5O_{12}$  (κοινά αποκαλούμενο YAG, ακρωνύμιο του **Yttrium Aluminum Garnet**) στον οποίο μερικά από τα ιόντα  $Y^{3+}$  έχουν αντικατασταθεί από  $Nd^{3+}$ . Από το διάγραμμα της εικόνας 3.1. φαίνεται ότι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας laser που εκπέμπει είναι 1.06μm, δηλαδή εκπέμπει στην περιοχή του υπέρυθρου. Αυτό δεν σημαίνει ότι τα laser Nd:YAG δεν μπορούν να ταλαντώνονται και σε άλλες γραμμές, όμως η πιο ισχυρή είναι στα 1.06μm και η οποία χρησιμοποιείται συνηθέστερα.



Εικόνα 3.1. Ενεργειακό διάγραμμα Nd:YAG laser.

Η εκπομπή των laser αυτών όπως προαναφέρθηκε είναι στο κοντινό υπέρυθρο (NIR), στα  $1.06\mu\text{m}$ . Η εικόνα 3.1. δείχνει τα ενεργειακά επίπεδα που σχετίζονται με τη δράση laser. Όπως φαίνεται, το κάτω επίπεδο της μετάβασης laser  $E_2$  βρίσκεται σε ενέργεια  $\sim 2111\text{ cm}^{-1}$  από το θεμελιώδες επίπεδο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σύμφωνα με το νόμο του Boltzmann, ο πληθυσμός του θα είναι κατά ένα παράγοντα  $\exp(-E_2/kT) \approx e^{-10}$  μικρότερος του πληθυσμού του θεμελιώδους επιπέδου, άρα αμελητέος. Ο πληθυσμός του επιπέδου  $E_1$  με τη βοήθεια της άντλησης μεταφέρεται στην ομάδα των επιπέδων  $E_4$ , απ' όπου μέσω πολύ γρήγορων μη ακτινοβολητικών διαδικασιών καταλήγει στο επίπεδο  $E_3$ , το άνω επίπεδο της μετάβασης laser. Επομένως, πρόκειται για ένα σύστημα laser τεσσάρων επιπέδων όπως αναφέρθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο. ( $E_1 \rightarrow E_4 \rightarrow E_3 \rightarrow E_2 \rightarrow E_1$ ).

Μερικά χρήσιμα χαρακτηριστικά του κρυστάλλου είναι τα εξής : οι στενές φασματικά γραμμές απορρόφησης ( $\sim 6\text{ cm}^{-1}$ ), ο χρόνος ζωής (λόγω αυθόρμητης εκπομπής) του επιπέδου  $E_3$  είναι  $255 \times 10^{-6}\text{ sec}$ , ενώ του επιπέδου  $E_2$  είναι  $30\text{ nsec}$ , η ενεργός διατομή της εξαναγκασμένης εκπομπής είναι  $\sigma_{EE} \approx 2.7 - 8.8 \times 10^{-19}\text{ cm}^2$  (εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα του κρυστάλλου σε  $\text{Nd}^{3+}$ ). Συγκρίνοντας με την αντίστοιχη ενεργό διατομή του ruby laser, που είναι  $\sigma_{EE} \approx 2.5 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$ , βρίσκουμε ότι για μια δοσμένη αναστροφή πληθυσμών  $\Delta N$  ο συντελεστής απολαβής  $\gamma_0(\nu)$  του συστήματος θα είναι περίπου 25 φορές μεγαλύτερος απ' ότι στο ruby laser. Γι' αυτό το λόγο τα laser Nd:YAG μπορούν να λειτουργήσουν εύκολα κατά συνεχή τρόπο (CW operation). Τα Nd:YAG laser, σε παλμική λειτουργία, μπορούν να δώσουν ενέργεια μέχρι μερικά Joule ανά παλμό. Λαμβανομένης δε υπόψη, επιπλέον, της χρονικής διάρκειας του παλμού ( $\sim 10\text{ nsec}$ ), η

αντίστοιχη ισχύς είναι της τάξης των  $10^8$  Watts. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του Nd:YAG laser για μήκος κύματος 1.06μm, ανάλογα με τους διάφορους τρόπους λειτουργίας του.

Τρόπος λειτουργίας	Διάρκεια παλμού	Ισχύς παλμού	Ενέργεια παλμού
Ελεύθερη λειτουργία	0,1-10 msec	10 KW	50 J
Q-switched	3-30 nsec	10 MW	1 J
Εγκλειδωση ρυθμών	30 psec	Μερικά GW	0.1 J

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά του Nd:YAG laser.

Την τελευταία δεκαετία με την τεράστια πρόοδο που έχει επιτευχθεί στην ανάπτυξη των διοδικών laser, οι λυχνίες εκκένωσης τείνουν να αντικατασταθούν από τα διοδικά laser ως πηγές άντλησης των laser στερεάς γενικότερα και των Nd:YAG ειδικότερα. Τα πλεονεκτήματα είναι προφανή. Αντί για τις συστοιχίες των πυκνωτών και τα μεγάλα σε μέγεθος τροφοδοτικά που χρησιμοποιούνταν για την ηλεκτρική τροφοδοσία των λυχνιών, τώρα αρκούν οι μικρές μπαταρίες για να τροφοδοτήσουν τα διοδικά laser που εκπέμπουν γύρω από τα 800 nm, και αυτά με τη σειρά τους να αντλήσουν τον κρύσταλλο του Nd:YAG. Αυτό που εύκολα καταλαβαίνει κανείς είναι η δραματική μείωση των διαστάσεων των lasers.

Τα Nd:YAG lasers χρησιμοποιούνται ευρύτατα τόσο στη βασική έρευνα όσο και σε πληθώρα εφαρμογών. Κάποιες από αυτές τις εφαρμογές είναι στους τομείς: της ιατρικής (π.χ. οφθαλμολογία, κοσμητική ιατρική, χειρουργική, οδοντιατρική), των μετρήσεων (π.χ. τηλεμετρία), των στρατιωτικών εφαρμογών (π.χ. καταδείκτες στόχων), της θερμοπυρηνικής σύντηξης, της κατεργασίας υλικών που είναι και αντικείμενο της παρούσας εργασίας (π.χ. διάτρηση, συγκόλληση, κοπή, εγχάραξη, τόννευση, λείανση). Στη βιομηχανία τα laser Nd:YAG έχουν αντικαταστήσει της παραδοσιακές μεθόδους καθώς δίνουν γρήγορα και οικονομικά αποτελέσματα με πολύ καλό έλεγχο στην επεξεργασία των προϊόντων. Το laser Nd:YAG καθώς είναι ένα παλμικό laser οπτικής άντλησης μπορεί να δώσει ισχύ της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων MWatts και είναι κατάλληλα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και ελάχιστο θερμικό αποτέλεσμα (π.χ. συγκολλήσεις μικροκυκλωμάτων, κατασκευή ηλεκτρικών επαφών, κατεργασία στοιχείων μικροκυκλωμάτων κ.τ.λ.).

Με τη χρήση ειδικών οπτικών κρυστάλλων στη διεύθυνση εξόδου της ακτινοβολίας από το laser είναι δυνατό να παραχθεί ακτινοβολία με μήκος κύματος το μισό ή το ένα τρίτο ή το ένα τέταρτο της θεμελιώδους ακτινοβολίας του laser, δηλαδή  $1064/2=532$ ,  $1064/3=355$  και  $1064/4=266$  nm αντίστοιχα. Οι διαδικασίες αυτές ονομάζονται γένεση της δεύτερης, τρίτης, και τέταρτης αρμονικής της θεμελιώδους ακτινοβολίας του laser, αντίστοιχα, και χαρακτηρίζονται ως μη γραμμικές διαδικασίες.

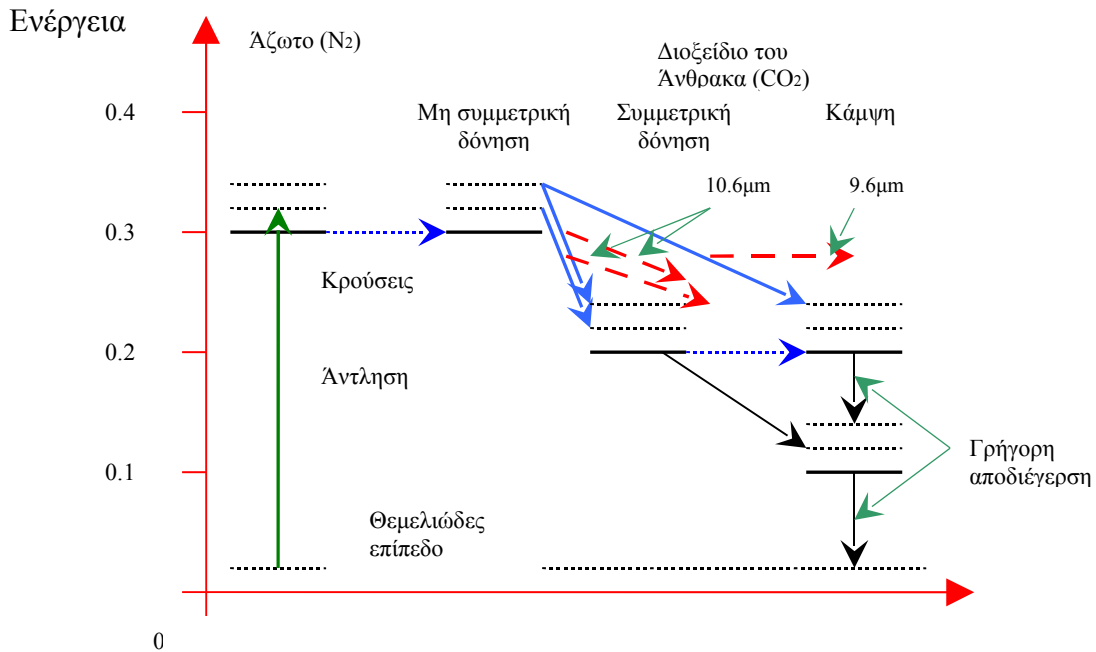
### **3.2. Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub> Laser)**

Το laser  $CO_2$  είναι ο κυριότερος εκπρόσωπος των δονητικών-περιστροφικών lasers. Στο laser αυτό αν και το χρησιμοποιούμενο αέριο είναι μείγμα  $CO_2$ ,  $N_2$  και He, η δράση laser λαμβάνει χώρα μεταξύ των ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης του  $CO_2$ . Το  $N_2$  και το He έχουν ως αποστολή τη βελτίωση της απόδοσης του laser η οποία αυξάνεται μέχρι και 20%. Η παραγόμενη ισχύς του υπό καθεστώς συνεχούς λειτουργίας (CW) φτάνει έως και τα 100 KW, ενώ υπό παλμική λειτουργία έχουν μετρηθεί ενέργειες παλμών έως και 100 KJ και διάρκειας παλμών από nsec έως msec. Λόγω των πολλών και ποικίλων εφαρμογών οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω το laser  $CO_2$  βρίσκεται στο εμπόριο σε αρκετές παραλλαγές κατασκευής. Από άποψη ισχύος το laser  $CO_2$  μπορεί να συγκριθεί μόνο με τα laser CO και HF. Τα μήκη κύματος του  $CO_2$  κυμαίνονται μεταξύ 9 και 11  $\mu m$ .

Από κατασκευαστικής απόψεως τα laser  $CO_2$  διακρίνονται σε laser με αργή διαμήκη ροή, σε σφραγισμένα laser, σε laser κυματοδηγού, σε laser ταχείας ροής αερίου, σε laser διεγερόμενα από υψηλή συχνότητα (RF), σε εγκάρσια διεγερόμενα laser ατμοσφαιρικής πίεσης (TEA), σε laser δυναμικής αερίων και τέλος σε ρυθμιζόμενα laser υψηλής πίεσης. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά καθώς και οι διάφορες εφαρμογές για το καθένα από τα παραπάνω είδη φαίνονται στον πίνακα 3.2.

Η λειτουργία του laser ξεκινά καθώς τα μόρια του αζώτου ( $N_2$ ) διεγερόμενα κατά την ηλεκτρική εκκένωση στο πρώτο δονητικό τους επίπεδο μεταφέρουν την ενέργειά τους στην ασυμμετρική δόνηση  $\nu_3$  του  $CO_2$ , η οποία γίνεται το άνω επίπεδο της μετάβασης laser. Υπάρχουν δυο οδοί δράσης laser, ανάλογα με το ποιο θα είναι κάτω επίπεδο της μετάβασης laser. Η συμμετρική δόνηση  $\nu_1$  ή η δόνηση κάμψης  $\nu_2$  του μορίου. Η πρώτη οδός έχει ως αποτέλεσμα εκπομπή laser στην περιοχή των 10.6  $\mu m$  ενώ η δεύτερη στην περιοχή των 9.6  $\mu m$ . Λέγεται περιοχή, γιατί κάθε δονητικό επίπεδο περιέχει πλήθος περιστροφικών επιπέδων και κατά συνέπεια η μετάβαση laser συμβαίνει μεταξύ δυο δονητικών επιπέδων του μορίου, τα οποία όμως περιλαμβάνουν πλήθος περιστροφικών επιπέδων. Οι εκπομπές αυτές ακτινοβολίας laser ευρίσκονται κατανεμημένες γύρω από τα προαναφερθέντα μήκη κύματος.

Το He εκτός από τη βελτίωση της απόδοσης του laser βοηθά στην ταχεία αποδιέγερση του πληθυσμού του κάτω επιπέδου της μετάβασης laser προς το θεμελιώδες επίπεδο (ώστε να διατηρηθεί η αναστροφή πληθυσμού), υποβοηθά τη σταθεροποίηση της ηλεκτρικής εκκένωσης απάγοντας την εκλυόμενη θερμότητα προς τα τοιχώματα του σωλήνα. Ακόμη το He μέσω των κρούσεων με τα ηλεκτρόνια της εκκένωσης ελέγχει την κινητική τους ενέργεια (δηλαδή την θερμοκρασία των ηλεκτρονίων), η οποία με τη σειρά της ελέγχει όλες τις προαναφερθείσες διαδικασίες.



Εικόνα 3.2. Ενεργειακό διάγραμμα CO<sub>2</sub> laser

Τα laser CO<sub>2</sub> είναι τα πλέον μελετημένα από πλευράς φυσικής των laser και τα πλέον αποδοτικά ως συστήματα παραγωγής σύμφωνης ακτινοβολίας. Τρεις είναι οι βασικοί λόγοι που συντελούν στη καλή απόδοση : (α) Τα επίπεδα της μετάβασης laser ευρίσκονται ενεργειακά κοντά στο θεμελιώδες. (β) Τα μόρια του CO<sub>2</sub> που διεγείρονται από κρούσεις με τα ηλεκτρόνια προς υψηλότερα ενεργειακά επίπεδα τείνουν σε σημαντικότατο βαθμό αποδιεγειρόμενα να καταλήξουν και πάλι στο ενεργειακό επίπεδο της ασυμμετρικής δόνησης  $\nu_3$ . (γ) Το πρώτο δονητικό επίπεδο του N<sub>2</sub> ευρίσκεται στην ίδια ενέργεια με το  $\nu_3$  επίπεδο του CO<sub>2</sub> ευνοώντας την αποδοτική μεταφορά ενέργειας συντονιστικού τύπου (resonant energy transfer) από το ένα μόριο στο άλλο. Ακόμη τα διεγερμένα σε υψηλότερα (από το πρώτο δονητικό) επίπεδα μόρια του αζώτου τείνουν να αποδιεγερθούν πολύ γρήγορα και να καταλήξουν στο πρώτο δονητικό επίπεδο, ώστε να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά μεταφέροντας την ενέργεια τους στα μόρια του CO<sub>2</sub>. Έτσι τα CO<sub>2</sub> laser επιτυγχάνουν σχετικά εύκολα ισχύ πολλών KWatts.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι laser CO<sub>2</sub> όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.2. , διαφοροποιούμενοι ως προς το μηχανισμό διέγερσης, τη δομή τους και το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser. Έτσι για επίτευξη μεγάλης ισχύος εξόδου συνήθως το αέριο ρέει συνεχώς κατά μήκος του σωλήνα του laser, ώστε η εκκένωση να έχει συνεχώς ανανεωμένο, φρέσκο μίγμα χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις για τη χημική καθαρότητα του μίγματος. Αυτού του είδους τα laser ονομάζονται flowing CO<sub>2</sub> lasers. Για την επίτευξη πάρα πολύ μεγάλης ισχύος η ροή του αερίου γίνεται σε κατεύθυνση κάθετη προς τον άξονα του laser (transverse flow CO<sub>2</sub> lasers). Σε περιπτώσεις όπου το αέριο μίγμα περιέχεται σε ερμητικά κλειστό σωλήνα (sealed off CO<sub>2</sub> lasers) χρειάζεται μετά από μερικές χιλιάδες ώρες λειτουργίας ανανέωση του μίγματος λόγω αποδόμησης του CO<sub>2</sub> σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οξυγόνο



(Ο). Έχουν κατασκευαστεί και laser  $CO_2$  που αντί για σωλήνα laser γίνεται χρήση κυματοδηγού και έχουν επιτευχθεί ισχύς συνεχούς λειτουργίας μέχρι και 50W. Στον πίνακα φαίνονται μερικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων laser  $CO_2$ .

Εφαρμογές των laser  $CO_2$ : EY→επεξεργασία υλικών, I→ιατρική, U→παλμοί πολύ βραχείας διάρκειας, ΠΦ→πυρηνική φυσική, Φ→φασματοσκοπία.

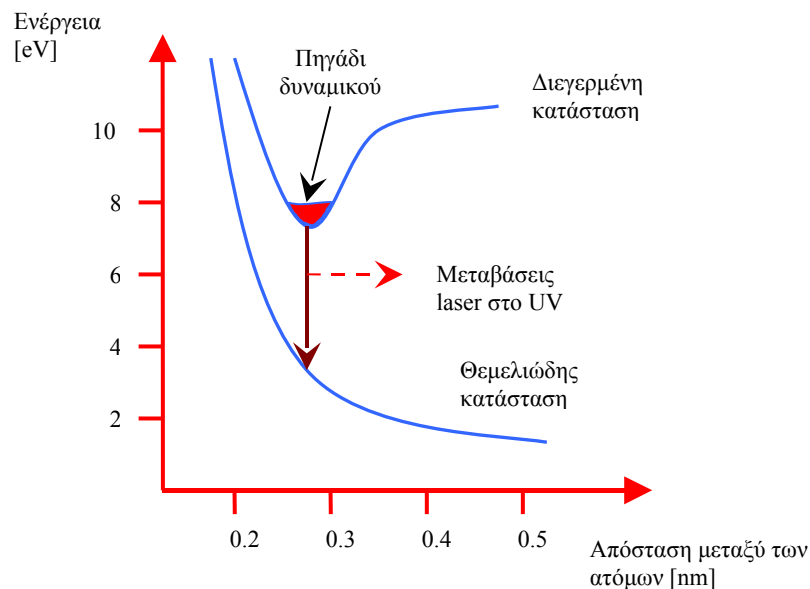
Τύπος laser	Μέση Ισχύς (cw)	Ενέργεια παλμού	Ισχύς παλμού	Διάρκεια παλμού/συχνότητα
Σφραγισμένο laser (EY, I)	50 W	--	KW	--
Laser κυματοδηγού (Φ)	50 W	--	--	--
διαμήκους ροής Αργής	Παλμικός (EY, I)	--	1 J	μs/100Hz
	Q-switched (EY)	KW	--	100 ns/KHz
Ταχείας διαμήκους ροής (EY)	100 KW	--	--	--
TEA laser (EY)	--	10 J	GW	100 ns/KHz
Laser δυναμικής ροής (EY, ΠΦ)	100 KW	10 J	--	--
Laser υψηλής πίεσης (Φ, U)	50 W	10 J	GW	100 ns/KHz

Πίνακας 3.2. Κύρια χαρακτηριστικά των διάφορων τύπων laser  $CO_2$ .

### **3.3. Excimer laser**

Ο όρος excimer προέρχεται από την συνένωση των αγγλικών λέξεων **excited** (διεγερμένο) και **dimer** (διμερές= διατομικό μόριο). Ο όρος αυτός περιγράφει ένα διατομικό μόριο το οποίο είναι ευσταθές, δηλαδή η καμπύλη της δυναμικής του ενέργειας παρουσιάζει ελάχιστο, μόνο κατά τη χρονική διάρκεια που αυτό βρίσκεται στη διεγερμένη του κατάσταση. Όταν αυτό επιστρέφει στη βασική του κατάσταση διασπάται σε δυο άτομα. Συνέπεια της συγκεκριμένης συμπεριφοράς είναι ότι ο χρόνος ζωής της βασικής καταστάσεως είναι ακόμη μικρότερος. Έτσι στα excimer laser, σαν κατώτατο επίπεδο λειτουργίας, έχουμε εκείνο της βασικής του κατάστασης η οποία μένει σχεδόν αυτόματα άδεια και άρα είναι εύκολο να επιτύχουμε αντιστροφή πληθυσμών.

Στα laser αυτά το ενεργό υλικό είναι διεγερμένα διμερή μόρια αποτελούμενα από ένα άτομο ευγενούς αερίου (Ar, Xe, ή Kr) και ένα άτομο αλογόνου (F, Cl, Br, ή I). Η ιδιομορφία των μορίων των μορίων αυτών οφείλεται στο γεγονός ότι τα δυο άτομα που τα απαρτίζουν, όταν ενωθούν στις θεμελιώδεις ηλεκτρονικές τους καταστάσεις, σχηματίζουν το αντίστοιχο διμερές μόριο (π.χ. ArF, KrF, XeF, XeCl κ.τ.λ.) στη θεμελιώδη του κατάσταση, το οποίο όμως είναι εξαιρετικά ασταθές έχοντας πρακτικά μηδέν χρόνο ζωής ( $\sim 10^{-13}$  sec). Όταν όμως τα δυο άτομα ενωθούν κάτω από ειδικές συνθήκες και σχηματίσουν το διεγερμένο διμερές μόριο, τότε αυτό είναι σταθερό έχοντας ικανοποιητικό χρόνο ζωής ( $\sim 6-10$  nsec). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να δημιουργηθούν εύκολα αναστροφές πληθυσμών μεταξύ της διεγερμένης και της βασικής κατάστασης των μορίων αυτών, στο βαθμό που τα αποδιεγειρόμενα στη βασική κατάσταση μόρια διασπώνται αυτόματα, δημιουργώντας μόνιμα έλλειμμα πληθυσμού σ' αυτήν την κατάσταση και άρα κατάλληλες συνθήκες πληθυσμιακής αναστροφής, όπως φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.3, ώστε να εκπεμφθεί ακτινοβολία laser.



Εικόνα 3.3. Ενεργειακό διάγραμμα excimer laser.

Η ιδιομορφία αυτή των διεγερμένων διμερών έγινε αντιληπτή και κατανοητή το 1971, όταν δείχθηκε για πρώτη φορά εξαναγκασμένη εκπομπή στο μόριο του  $Xe_2$ ,

και λίγα χρόνια αργότερα, το 1975, κατασκευάστηκε το πρώτο excimer laser XeBr. Το μεγάλο πλεονέκτημα των laser αυτών είναι ότι εκπέμπουν στην περιοχή του υπεριώδους (353-193 nm), ακόμα και στο υπεριώδες κενού (157 nm), με σημαντικές αποδόσεις. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι την εποχή που ανακαλύφθηκαν και για πολλά χρόνια αργότερα ήταν οι μοναδικές ισχυρές πηγές laser στην περιοχή του υπεριώδους. Επίσης μέχρι πριν από λίγα χρόνια τα laser αυτού του τύπου σχεδόν μονοπωλούσαν την άντληση των laser μεταβλητού μήκους κύματος οργανικών χρωστικών (dye lasers).

Τα laser διεγερμένων διμερών λειτουργούν μόνο παλμικά με τυπικούς χρόνους παλμού 10-50 nsec, με ενέργεια ανά παλμό μέχρι περίπου 1 J και συχνότητα αρκετές εκατοντάδες παλμών ανά δευτερόλεπτο. Το φασματικό εύρος της μετάβασης laser καθορίζεται από το εύρος της καμπύλης δυναμικού της άνω στάθμης όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3. και μπορεί να είναι μεγαλύτερο του 1 nm . Υπάρχουν όμως τεχνικές στις οποίες δεν θα αναφέρουμε και με τις οποίες το πλάτος της καμπύλης απολαβής μπορεί να περιορισθεί σημαντικά και το φασματικό εύρος της δράσης laser να μειωθεί μέχρι 0.003 nm . Στο πίνακα 3.3. παρακάτω φαίνονται τα διάφορα excimer lasers καθώς και τα μήκη κύματος τους.

Τύπος laser	Μήκος κύματος (nm)
KrF	248
KrCl	222
XeCl	308
XeF	351,353
XeBr	282
XeI	253
ArF	193
ArCl	175
F <sub>2</sub>	157

Πίνακας 3.3. Μήκη κύματος εκπομπής διαφόρων excimer laser.

Η άντληση των laser αυτών γίνεται με την ταυτόχρονη ταχύτατη εκκένωση μεγάλης συστοιχίας πυκνωτών, κάθετα προς τον οπτικό άξονα του laser. Η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται είναι το λιγότερο 100 KW/cm<sup>3</sup> μέχρι και αρκετά MW/cm<sup>3</sup>. Τα παραγόμενα ηλεκτρόνια αποκτούν μεγάλες κινητικές ενέργειες, τις οποίες μεταφέρουν με κρούσεις στα μόρια του αλογόνου (τα οποία είναι διατομικά και διασπώνται) και του ευγενούς αερίου (τα οποία διεγείρονται) και έτσι σχηματίζονται τα διεγερμένα διμερή.

Για καλύτερη απόδοση του συστήματος το αέριο κυκλοφορεί συνεχώς μέσα στο σωλήνα του laser και μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας απαιτείται ανανέωση του. Το αέριο είναι μίγμα μερικών mbar αλογόνου με μερικά mbar ευγενούς αερίου

και το υπόλοιπο είναι ήλιο ή νέον μέχρι μέχρι μια συνολική πίεση ~2-3 ατμοσφαιρών, ανάλογα με τον τύπο του laser και των οδηγιών του κατασκευαστή.

Το μεγάλο πρόβλημα των excimer laser είναι η επικινδυνότητα των αλογόνων που χρειάζονται για τη λειτουργία τους και η ισχυρή οξειδωτική δράση των τελευταίων στα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή.

Αρκετά excimer laser απαιτούν ψύξη με άντληση νερού της κλίμακας των 2 έως 10 λίτρων ανά λεπτό (lt/min), με το μέγιστο να φθάνει σχεδόν στα 60 lt/min ενώ άλλα που λειτουργούν με χαμηλότερη ενέργεια παλμού ή συχνότητα, είναι αερόψυκτα.

Η ικανότητα δημιουργίας υψηλής ενέργειας υπεριώδους παλμού, σε ικανοποιητικές συχνότητες και μέσο όρο ισχύος που μπορεί να υπερβεί τα 100 W, έχει δημιουργήσει μια σταθερή ζήτηση των excimer laser σε αρκετά πεδία. Οι εφαρμογές των excimer laser χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

- Επιστημονική έρευνα.
- Βιομηχανικές εφαρμογές.
- Ιατρική.

Στις κύριες επιστημονικές χρήσεις συμπεριλαμβάνονται:

- Άντληση laser οργανικών χρωστικών.
- Υπεριώδης φασματοσκοπία.
- Μη γραμμική φασματοσκοπία.
- Φωτοδιέγερση.
- Έλεγχος εκπομπής μόλυνσης.
- Έρευνα πάνω σε υλικά.
- Αλληλεπιδράσεις μακρινού υπεριώδους.
- Κατασκευή υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας.
- Έρευνα πλάσματος.
- Μετατόπιση Raman.
- Πυρηνική σύντηξη.

Οι βιομηχανικές εφαρμογές των excimer laser με τη πάροδο του χρόνου συνεχώς αυξάνονται. Μερικές από αυτές είναι :

- Χάραξη σε κεραμικά, γυαλιά, πλαστικά και μέταλλα.
- Επιδιόρθωση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- Πυράκτωση και υγροποίηση υπεραγωγών.
- Εναπόθεση λεπτών στρωμάτων.
- Μικρομηχανική και τρύπημα ακριβείας.
- Επιφανειακή επεξεργασία υλικών.
- Χημική εναπόθεση ατμού.

Οι ιατρικές εφαρμογές των excimer laser έχουν προκαλέσει αρκετό ενδιαφέρον και μερικές από αυτές είναι:

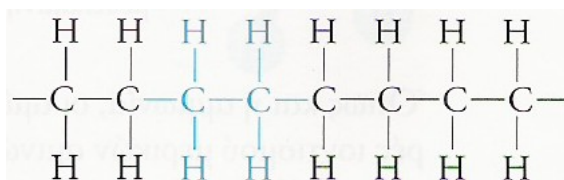
- Επεμβάσεις στην επιφάνεια του κερατοειδούς.

- Απομάκρυνση πλάκας από κλεισμένες αρτηρίες.
- Μικροχειρουργική.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

### **4.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ**

Η λέξη (polymer) πολυμερές προέρχεται από της ελληνικές λέξεις πολλά μέρη. **Πολυμερές** είναι μια χημική οντότητα πολύ μεγάλου μοριακού βάρους η οποία δομείται από πολλές επαναλαμβανόμενες μονάδες μικρού μοριακού βάρους. Καθένα από τα μεμονωμένα μόρια που σχηματίζουν το πολυμερές ονομάζεται **μονομερές**. Ένα απλό παράδειγμα είναι το πολυαιθυλένιο, το οποίο αποτελείται από πολλές μονάδες αιθυλενίου,  $—CH_2CH_2—$ , χημικά ενωμένες μεταξύ τους έτσι ώστε να σχηματίζουν μόρια μακριάς αλυσίδας αποτελούμενα από χιλιάδες μόρια αιθυλενίου. Το όνομα πολυαιθυλένιο είναι σύνθετο από το όνομα του μονομερούς (αιθυλένιο) και το πρόθεμα *πολύ-*.



Εικόνα 4.1. Μια μονάδα αιθυλενίου εμφανίζεται με γαλάζιο χρώμα.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη πολυμερών που μας είναι οικεία και βρίσκουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα πλαστικά, τα ελαστομερή (ή ελαστικά), ίνες, επιχρίσματα, αφρώδη υλικά, και φιλμ. Ανάλογα με τις ιδιότητες του, ένα συγκεκριμένο πολυμερές μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δύο ή και περισσότερες κατηγορίες εφαρμογών. Για παράδειγμα, ένα πλαστικό, εάν είναι διασταυρωμένο και χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης του, μπορεί να αποτελέσει ένα ικανοποιητικό ελαστομερές.

Πιθανότατα, ο μεγαλύτερος αριθμός των διαφόρων πολυμερών υλικών βρίσκονται κάτω από την κατηγορία των πλαστικών. Το **πολυαιθυλένιο**, το πολυπροπυλένιο, το πολυβινυλοχλωρίδιο, το πολυστυρένιο και οι φθοράνθρακες, τα εποξειδικά, τα φαινολικά και οι πολυεστέρες μπορούν όλα να ενταχθούν στην κατηγορία των πλαστικών.

Η λέξη πλαστικά συνήθως σημαίνει υλικά :

- Που έχουν χαμηλή αντοχή (strength) και σκληρότητα (stiffness).
- Που έχουν περιορισμένη θερμοκρασιακή δυνατότητα (temperature limitations).
- Που υπό την επίδραση δύναμης, παραμορφώνονται συνεχώς (deform continuously).

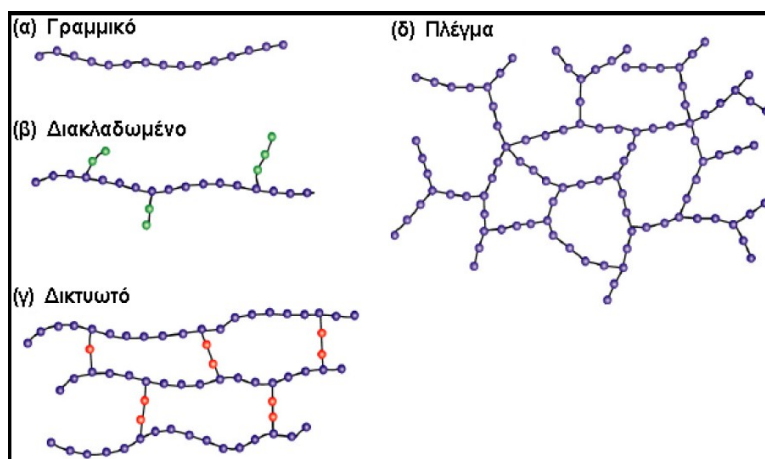
Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι σίγουρα ελαττώματα όταν τα πλαστικά συγκριθούν με συμβατικά υλικά όπως μέταλλα, ξύλα ή κεραμικά. Όμως χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε αυξανόμενη κλίμακα, ενώ η χρήση του σιδήρου ελαττώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι έχουν κάποια προτερήματα που παρατίθενται παρακάτω που τα καθιστούν μοναδικά.

- Τα πλαστικά διαμορφώνονται εύκολα σε πολυσύνθετα σχήματα με ελάχιστο κόστος και τελική επεξεργασία.
- Τα πλαστικά έχουν χαμηλές πυκνότητες (προϊόντα με χαμηλό βάρος).
- Τα πλαστικά είναι καλοί θερμικοί και ηλεκτρικοί μονωτές.

- Τα πλαστικά έχουν μερικές ειδικές ιδιότητες (π.χ. μερικά είναι εύκαμπτα και άλλα διαφανή).
- Έχουν χαμηλό κόστος.
- Είναι ανθεκτικά στην περιβαλλοντολογικές συνθήκες (π.χ. υγρασία).

Η ταξινόμηση των πολυμερών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους και κάποιοι από αυτούς τους τρόπους φαίνονται παρακάτω.

#### Ταξινόμηση ανάλογα με την αρχιτεκτονική της πολυμερικής αλυσίδας.



Εικόνα 4.2. Ταξινόμηση πολυμερών ανάλογα με την πολυμερική αλυσίδα.

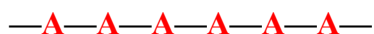
**Γραμμικό πολυμερές (linear):** Τα μόρια του έχουν τη μορφή απλής αλυσίδας και αναπτύσσονται σε μια διάσταση του χώρου (πολυαιθυλένιο, πολυστυρένιο, πολυαμίδια).

**Διακλαδωμένο πολυμερές (branched):** Τα μόρια του έχουν τη μορφή κλάδων δέντρου, αποτελούνται από μια βασική αλυσίδα από την οποία αναπτύσσονται πλευρικές διακλαδώσεις (που δεν ανήκουν στη δομή του μονομερούς) και αναπτύσσονται σε δύο διαστάσεις του χώρου.

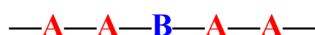
**Δικτυωτό ή διασταυρούμενο (crosslinked) ή πλέγμα (network):** Τα μόρια του αποτελούνται από αλυσίδες που συνδέονται μεταξύ τους με διασταυρούμενες συνδέσεις σχηματίζοντας πλέγμα (πολυεστέρες, πολυουρεθάνες, πολυεποξειδικές ενώσεις, φορμοφαινόλη). Αναπτύσσεται στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Ο όρος **πλέγμα** χρησιμοποιείται συνήθως όταν τα άτομα των συνδέσεων είναι όμοια με εκείνα των αλυσίδων.

#### Ταξινόμηση ανάλογα με το είδος των ατόμων που συμμετέχουν στη δομή της κύριας αλυσίδας.

**Ομοαλυσωτά:** Η αλυσίδα αποτελείται από ένα είδος ατόμων, π.χ.



**Ετεροαλυσωτά:** Η αλυσίδα τους αποτελείται από περισσότερα είδη ατόμων, π.χ.



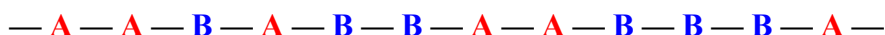
**Ταξινόμηση ανάλογα με την οργάνωση της κύριας αλυσίδας.**

**Ομοπολυμερή (homopolymers) :** Τα μόρια τους αποτελούνται από ένα είδος δομικών μονάδων, π.χ.

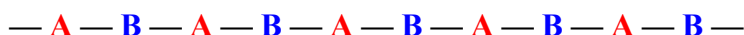


**Συμπολυμερή (copolymers) :** Τα μόρια τους αποτελούνται από δύο (συνήθως) ή περισσότερα είδη δομικών μονάδων. Αν δυο μονομερή A και B πολυμεριστούν μαζί, τότε είναι δυνατές οι ακόλουθες τέσσερις διευθετήσεις στη δομή του προκύπτοντος συμπολυμερους:

- **Τυπικό ή τυχαίο συμπολυμερές (random copolymer) :** Η διάταξη των δομικών μονάδων του είναι τυχαία και τα ομοπολυμερή τμήματα του μικρά, π.χ.



- **Εναλλασσόμενο συμπολυμερές (alternating copolymer) :** Οι δυο δομικές μονάδες ακολουθούν κανονικά εναλλασσόμενη διάταξη, π.χ.

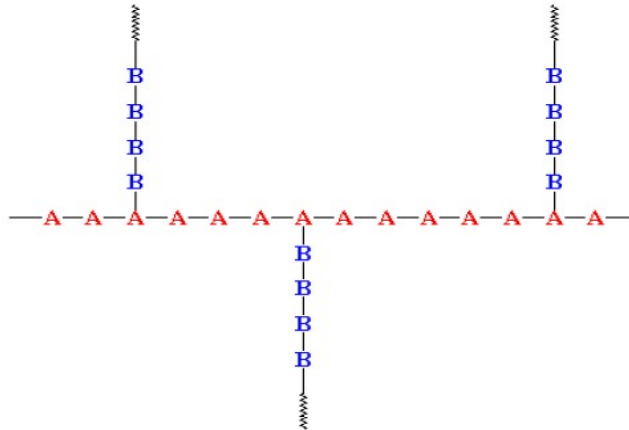


- **Αδρομερές συμπολυμερές (block copolymer) :** Η διάταξη των δομικών μονάδων αποδίδει μόριο που αποτελείται από **αδρά** ομοπολυμερή τμήματα, π.χ.



- **Ενοφθαλμισμένο συμπολυμερές (graft copolymer) :** Η διάταξη των δομικών μονάδων αποδίδει έναν ομοπολυμερή κορμό, από τον οποίο αναπτύσσονται ομοπολυμερή τμήματα από δομικές μονάδες άλλου είδους, π.χ.





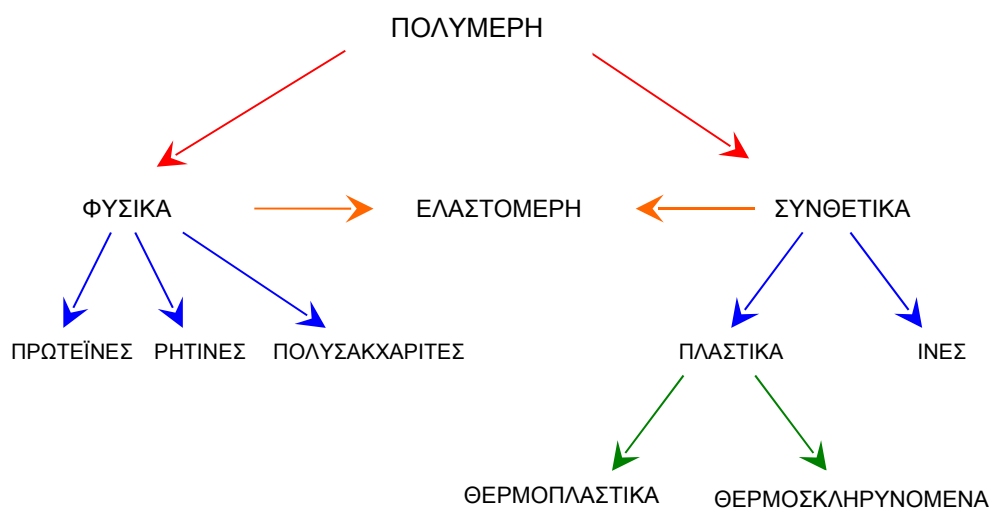
Εικόνα 4.3. Ενοφθαλμισμένο συμπολυμερές.

### Ταξινόμηση ανάλογα με τη προέλευση τους

**Φυσικά :** Λαμβάνονται απευθείας από τη φύση (μαλλί, μετάξι, δέρμα, ξύλο, βαμβάκι, κ.τ.λ.).

**Συνθετικά :** Τα μονομερή που τα συνθέτουν δεν υπάρχουν στη φύση (PVC, Nylon, Teflon, κ.τ.λ.). Διακρίνονται σε:

- Μακρομόρια με ανθρακική αλυσίδα: Υδρογονάνθρακες (πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο, κ.λ.π.), παράγωγα υδρογονανθράκων (πολυβινυλοχλωρίδιο, πολυτετραφθοροαιθυλένιο, κλπ.), πολυβινυλαιθέρες και παράγωγα οξέων (πολυακρυλικοί εστέρες, πολυακρυλονιτρίλιο, κλπ.).
- Μακρομόρια με ετεροάτομα στην αλυσίδα τους: Πολυαιθέρες (πολυαιθυλενοξείδιο, Araldites), πολυακετάλες (Derlin), πολυεστέρες (Diolen, Terylene, Dacron, Trevira, Mylar, κλπ.), πολυαμίδια ( nylon, κλπ.), πολυουρεθάνες (Perlon U, Meltopren, Vulkollan, κλπ.), πολυπαράγωγα του ανθρακικού οξέος (Lexan, Mekrolon) και πολυσιλοξάνια (σιλικόνες).



Εικόνα 4.4. Ταξινόμηση ανάλογα με την προέλευση τους.

### Ταξινόμηση ανάλογα με τη χρήση τους.

**Ευρείας χρήσης πολυμερή (commodity polymers):** Παράγονται σε πολύ υψηλό ποσοστό, είναι φθηνά και έχουν ποικίλα πεδία εφαρμογών στην καθημερινή ζωή.  
Παραδείγματα: πολυαιθυλένιο, πολυστυρένιο, PVC, ABS.

**Τεχνικά πολυμερή (engineering polymers):** Με μηχανικές ιδιότητες σημαντικά ανώτερες από εκείνες των πολυμερών ευρείας χρήσης, χρησιμοποιούνται σε τμήματα μηχανών και κατασκευών σε αντικατάσταση μεταλλικών τμημάτων τους.  
Παραδείγματα: Πολυαμίδια (nylon), πολυανθρακικά (PC), εποξειδικές ρητίνες, κ.ά.

**Προηγμένα πολυμερή (high performance polymers):** Με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και μεγάλη σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, παράγονται σε μικρές ποσότητες και προορίζονται για ειδικές εφαρμογές.  
Παραδείγματα: Πολυϊμίδια, πολυ(αιθερο κετόνη), πολυ(μεθακρυλικό μεθύλιο) (PMMA), πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE).

### Ταξινόμηση ανάλογα με τις μηχανοθερμικές τους ιδιότητες.

**Θερμοπλαστικά ή πλαστομερή ή πλαστικά (thermoplastics):** Αποτελούνται συνήθως από γραμμικά μακρομόρια. Με θέρμανση μαλακώνουν και μετατρέπονται σε ρευστά (χαλάρωση των μοριακών δεσμών), διατηρούν δε την κατάσταση αυτή όσο χρόνο διαρκεί η επίδραση της θερμότητας και στη συνέχεια μπορούν εύκολα να μορφοποιηθούν με άσκηση υψηλών πιέσεων. Η ακολουθούσα απόψυξη αποδίδει στερεό υλικό. Η όλη διεργασία είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά διατίθενται σε υγρή ή στερεά μορφή, είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες και παράγονται με πολυμερισμό προσθήκης ή συμπύκνωσης.

Τυπικά θερμοπλαστικά πολυμερή: Πολυαιθυλένιο (PE), χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), πολυπροπυλένιο (PP), πολυστυρένιο (PS), πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), πολυαμίδια (Nylon), φθοροπολυμερή, κλπ.

**Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (thermosettings):** Αποτελούνται από μη γραμμικά και σχετικά μικρά μακρομόρια. Με θέρμανση ή υπό πίεση αρχικά μαλακώνουν και μορφοποιούνται, αλλά με περαιτέρω κατεργασία αποκτούν πυκνή δικτυωτή δομή και μετατρέπονται σε σκληρά στερεά κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά είναι άμορφα σκληρά στερεά, άτηκτα και δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, παράγονται δε με πολυμερισμό συμπύκνωσης.

Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή: Φαινολικά πολυμερή (φαινολοπλάστες ή βακελίτες), εποξειδικές ρητίνες, αμινοπλάστες, πολυεστέρες, κλπ.

**Ελαστομερή ή ελαστικά (elastomers, rubbers):** Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδιζόμενες αλυσίδες. Εμφανίζουν την ιδιότητα της υπερελαστικότητας, δηλ. κατά τον εφελκυσμό επιδέχονται πολύ μεγάλη επιμήκυνση και κατά την αποφόρτιση ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος.

Τυπικά ελαστικά: Ελαστικό κόμμι, συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, συνθετικό πολυϊσοπρένιο, ελαστικό στυρένιο-βουταδιένιο, πολυγλωροπρένιο, σιλικόνες, κλπ.

## **4.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ**

Τα μεγάλα μακρομόρια των εμπορικά χρήσιμων πολυμερών πρέπει να συντεθούν από ουσίες που περιέχουν μικρότερα μόρια, σύμφωνα με μια διαδικασία που λέγεται **πολυμερισμός**. Επιπλέον, οι ιδιότητες ενός πολυμερούς μπορούν να τροποποιηθούν και να ενισχυθούν με τη συμμετοχή πρόσθετων υλικών. Στη συνέχεια το τελικό προϊόν θα πάρει το επιθυμητό σχήμα με τη διαδικασία της μορφοποίησης. Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν οι διαδικασίες πολυμερισμού, οι διάφορες μορφές των πρόσθετων ουσιών και οι διαδικασίες μορφοποίησης των πολυμερών.

### **Πολυμερισμός**

Η σύνθεση πολυμερών μεγάλου μοριακού βάρους ονομάζεται πολυμερισμός. Είναι απλά η διαδικασία κατά την οποία οι ομάδες μονομερών συνενώνονται η μια μετά την άλλη, για να δημιουργήσουν κάθε ένα από τα γιγαντιαία μόρια που αποτελούν το υλικό. Πιο γενικά, οι πρώτες ύλες των συνθετικών πολυμερών προέρχονται από τα προϊόντα του άνθρακα και του πετρελαίου, τα οποία αποτελούνται από μόρια με χαμηλό μοριακό βάρος. Οι αντιδράσεις με τις οποίες γίνεται ο πολυμερισμός χωρίζονται σε δυο γενικές κατηγορίες, αντιδράσεις προσθήκης και συμπύκνωσης σύμφωνα με το μηχανισμό της χημικής αντίδρασής τους.

### **Πολυμερισμός προσθήκης**

Ο πολυμερισμός προσθήκης (μερικές φορές λέγεται και πολυμερισμός αλυσιδωτών αντιδράσεων) είναι μια διαδικασία κατά την οποία μονάδες μονομερών με δυο δραστικές ομάδες συνενώνονται μεταξύ τους μια προς μια με αλυσιδωτό τρόπο για να σχηματίσουν ένα γραμμικό μακρομόριο. Η σύσταση του τελικού προϊόντος μορίου είναι ένα ακριβές πολλαπλάσιο εκείνου του αρχικού αντιδρώντος μονομερούς. Στο πολυμερισμό προσθήκης υπεισέρχονται τρία διακεκριμένα στάδια, η έναρξη, η διάδοση και ο τερματισμός. Ένα παράδειγμα πολυμερισμού προσθήκης θα αναφερθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο όπου θα μιλήσουμε για το πολυαιθυλένιο.

### **Πολυμερισμός συμπύκνωσης**

Ο πολυμερισμός συμπύκνωσης (ή πολυμερισμός σταδιακών αντιδράσεων) είναι ο σχηματισμός πολυμερών με σταδιακές διαμοριακές χημικές αντιδράσεις που συνήθως περιλαμβάνουν περισσότερα από ένα είδος μονομερή. Υπάρχει συνήθως ένα παραπροϊόν μικρού μοριακού βάρους όπως το νερό, το οποίο αποσπάται. Κανένα αντιδρών δεν έχει το χημικό τύπο της επαναλαμβανόμενης ομάδας μονομερούς, και η διαμοριακή αντίδραση πραγματοποιείται κάθε φορά που σχηματίζεται μια επαναλαμβανόμενη ομάδα μονομερούς.

Οι αντιδράσεις συμπύκνωσης συχνά προϋποθέτουν μονομερή με τρεις δραστικές ομάδες, ικανές να δημιουργούν διασταυρωμένα και δικτυωμένα πολυμερή. Οι θερμοσκληρυνόμενοι πολυεστέρες, τα πολυμερή φαινόλης-φορμαλδεΰδης, τα nylon και οι καρβονικοί πολυεστέρες παράγονται με πολυμερισμό συμπύκνωσης.

## Πρόσθετα των πολυμερών

Οι περισσότερες ιδιότητες των πολυμερών που αναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου, είναι ενδογενείς των συστημάτων, δηλαδή χαρακτηριστικές ή θεμελιώδεις για ένα συγκεκριμένο πολυμερές. Πολλές από αυτές της ιδιότητες σχετίζονται και ελέγχονται από τη μοριακή δομή. Πολλές φορές, όμως, είναι απαραίτητο να τροποποιηθούν οι μηχανικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες σε ένα πολύ υψηλότερο βαθμό από ότι είναι δυνατό μέσω της απλής αλλαγής της θεμελιώδους μοριακής δομής.

Εισάγονται ξένες ουσίες που καλούνται **πρόσθετα**, με σκοπό να ενισχύσουν ή να τροποποιήσουν πολλές από αυτές τις ιδιότητες, και συνεπώς να αποδώσουν ένα πιο ικανό στη χρήση πολυμερές. Τυπικά πρόσθετα περιλαμβάνουν πληρωτικά υλικά, πλαστικοποιητές, σταθεροποιητές, χρωστικές και επιβραδυντικά ανάφλεξης.

## Πληρωτικά μέσα

Τα πληρωτικά υλικά προστίθενται στα πολυμερή περισσότερο για να βελτιώσουν την αντοχή στον εφελκυσμό και τη συμπίεση, την αντοχή στην εκτριβή, την δυσθραυστότητα, τη θερμική σταθερότητα, τη σταθερότητα στις διαστάσεις, και άλλες ιδιότητες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν πληρωτικά μέσα σωματιδιακής υφής περιλαμβάνουν το ξυλάλευρο, (πολύ λεπτά αλεσμένη σκόνη από πριονίδι), τη λεπτοκοκιοποιημένη silica και την άμμο, το γυαλί, τον τάλκη, τον ασβεστόλιθο, ακόμη και μερικά συνθετικά πολυμερή.

Οι διαστάσεις των σωματιδίων κυμαίνονται από 10 nm μέχρι μακροσκοπικές διαστάσεις. Επειδή αυτά τα φθηνά υλικά αντικαθιστούν κάποιο μέρος του όγκου του πιο ακριβού πολυμερούς, το κόστος του τελικού προϊόντος μειώνεται.

## Πλαστικοποιητές

Η ευκαμψία, η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητα ενός πολυμερούς μπορεί να βελτιωθεί με τη βοήθεια πρόσθετων ουσιών που ονομάζονται **πλαστικοποιητές**. Η παρουσία τους επίσης παράγει μείωση της σκληρότητας και της ακαμψίας. Οι πλαστικοποιητές γενικά είναι υγρά που έχουν χαμηλή τάση ατμών και χαμηλό μοριακό βάρος. Τα μικρά μόρια των πλαστικοποιητών καταλαμβάνουν θέσεις μεταξύ των μεγάλων πολυμερών αλυσίδων, αυξάνοντας αποτελεσματικά την απόσταση μεταξύ των αλυσίδων και μειώνοντας τους δευτερογενείς διαμοριακούς δεσμούς.

Οι πλαστικοποιητές συνήθως χρησιμοποιούνται σε πολυμερή που είναι ψαθυρά λόγω της δομής τους σε θερμοκρασία δωματίου, όπως το πολυβινυλοχλωρίδιο και μερικά από τα οξικά συμπολυμερή. Στην πραγματικότητα, ο πλαστικοποιητής χαμηλώνει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, έτσι ώστε σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος τα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που απαιτούν κάποιο βαθμό ευκαμψίας και ολκιμότητας. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν λεπτά φύλλα ή φιλμ, σωλήνες, αδιάβροχα καλύμματα και κουρτίνες.

## **Σταθεροποιητές**

Μερικά πολυμερή υλικά, κάτω από κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος, υποβάλλονται σε ταχεία φθορά, με όρους μηχανικής ακεραιότητας, γενικά. Πιο συχνά, η φθορά αυτή, είναι αποτέλεσμα επίδρασης από το φως, και ειδικά την υπεριώδη ακτινοβολία και επίσης από την οξείδωση. Η υπεριώδης ακτινοβολία αλληλεπιδρά με τους ομοιοπολικούς δεσμούς που βρίσκονται κατά μήκος της μοριακής αλυσίδας και προκαλεί το σπάσιμο ορισμένων από αυτούς, το οποίο μπορεί επίσης να έχει σε κάποιο βαθμό, σαν αποτέλεσμα και το σχηματισμό διασταυρώσεων. Η φθορά λόγω οξείδωσης είναι συνέπεια της χημικής αλληλεπίδρασης μεταξύ ατόμων οξυγόνου και των μορίων του πολυμερούς. Τα πρόσθετα που αναστέλλουν αυτές τις διαδικασίες φθοράς, ονομάζονται **σταθεροποιητές**.

## **Χρωστικές**

Οι χρωστικές αποδίδουν ένα συγκεκριμένο χρώμα στο πολυμερές. Μπορούν να προστεθούν με τη μορφή είτε βαφών είτε χρωστικών διασποράς (pigments). Τα μόρια σε μια βαφή ουσιαστικά διαλυτοποιούνται και γίνονται μέρος της μοριακής δομής του πολυμερούς. Οι χρωστικές διασποράς είναι υλικά πλήρωσης τα οποία δεν διαλυτοποιούνται, αλλά παραμένουν σε μια διαφορετική φάση. Συνήθως έχουν μέγεθος μικρών σωματιδίων, είναι διαφανή και έχουν δείκτη διάθλασης παρόμοιο με εκείνο του μητρικού πολυμερούς. Μερικά από αυτά μπορούν μαζί με το χρώμα, να αποδίδουν και ημιδιαφάνεια στο πολυμερές.

## **Επιβραδυντές ανάφλεξης**

Η ευφλεκτότητα των πολυμερών υλικών είναι ένα μεγάλο ζήτημα που απασχολεί, ειδικά στην κατασκευή των υφασμάτων και των παιδικών παιχνιδιών. Τα περισσότερα πολυμερή είναι εύφλεκτα στην καθαρή μορφή τους. Εξαιρέσεις περιλαμβάνουν εκείνα που περιέχουν σημαντικό ποσοστό χλωρίου ή και φθορίου, όπως το πολυβινυλοχλωρίδιο, και το πολυτετραφθοροαιθυλένιο.

Η αντίσταση στην ανάφλεξη των υπολοίπων εύφλεκτων πολυμερών μπορεί να ενισχυθεί με πρόσθετες ουσίες που ονομάζονται επιβραδυντές ανάφλεξης. Τα επιβραδυντικά αυτά, μπορούν να λειτουργούν παρεμβαίνοντας στη διαδικασία της ανάφλεξης μέσω της αέριας φάσης, ή εκκινώντας μια χημική αντίδραση που τοπικά προκαλεί ψύξη της περιοχής ανάφλεξης και αναστολή της καύσης.

## **Τεχνικές μορφοποίησης πολυμερών**

Στη μορφοποίηση των πολυμερών υλικών χρησιμοποιείται μια μεγάλη ποικιλία από διαφορετικές τεχνικές. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για ένα συγκεκριμένο πολυμερές εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες: (1) εάν το υλικό είναι θερμοπλαστικό ή θερμοσκληρυνόμενο (2) εάν είναι θερμοπλαστικό, η θερμοκρασία αποσκλήρυνσης, (3) η ατμοσφαιρική σταθερότητα του υλικού που θα μορφοποιηθεί και (4) η γεωμετρία και το μέγεθος του τελικού προϊόντος. Υπάρχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ αυτών των τεχνικών και εκείνων που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία των μετάλλων και των κεραμικών.

Η κατεργασία των πολυμερών υλικών συνήθως γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και συχνά με την επιβολή πίεσης. Τα θερμοπλαστικά εάν είναι άμορφα, μορφοποιούνται σε θερμοκρασίες υψηλότερες της θερμοκρασίας υαλώδους

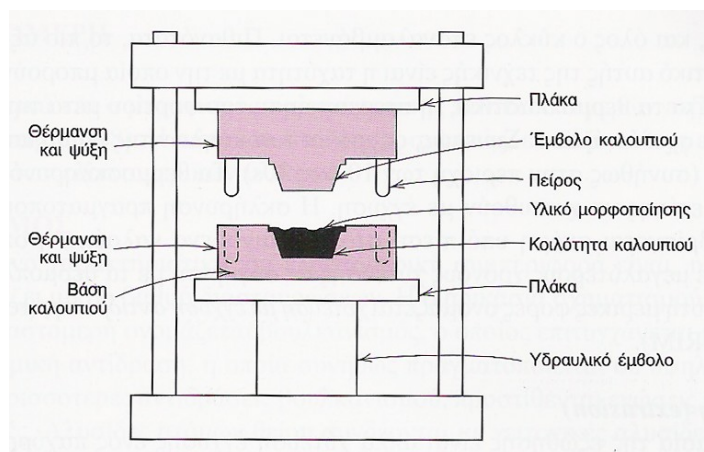
μετάβασης, ενώ εάν είναι κρυσταλλικά σε θερμοκρασίες ανώτερες του σημείου τήξης τους. Η πίεση που επιβάλλεται, πρέπει να διατηρηθεί όσο το υλικό ψύχεται, έτσι το μορφοποιημένο τεμάχιο να διατηρήσει το σχήμα του. Ένα σημαντικό οικονομικό όφελος από τη χρήση θερμοπλαστικών είναι ότι μπορούν να ανακυκλωθούν. Άχρηστα θερμοπλαστικά τεμάχια μπορούν να επανατακούν και να επαναμορφοποιηθούν σε νέα σχήματα.

Η **χύτευση σε καλούπι** είναι η συνηθέστερη μέθοδος για τη μορφοποίηση των πλαστικών πολυμερών. Μεταξύ των διάφορων τεχνικών χύτευσης που χρησιμοποιούνται, περιλαμβάνεται η συμπίεση, η μεταφορά, η εμφύσηση, η έγχυση και η εξώθηση. Για κάθε μια από αυτές, μια ποσότητα λεπτά τεμαχισμένου ή κονιορτοποιημένου πολυμερούς υποχρεώνεται σε υψηλή θερμοκρασία και υπό πίεση, να περάσει μέσα από μια κοιλότητα καλουπιού, να την γεμίσει και να πάρει ο σχήμα της.

### Χύτευση με συμπίεση και μεταφορά (compression and transfer molding)

Για την χύτευση με συμπίεση και μεταφορά, τα κατάλληλα ποσά ενός πολυμερούς, επιμελώς αναμεμιγμένου με τα αναγκαία πρόσθετα, τοποθετείται ανάμεσα σε αρσενικά και θηλυκά τμήματα ενός καλουπιού, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5. Και τα δυο τμήματα του καλουπιού θερμαίνονται. Όμως μόνο το ένα μπορεί να μετακινηθεί. Το καλούπι κλείνει, και εφαρμόζεται θερμότητα και πίεση, τα οποία βοηθούν το πλαστικό υλικό να γίνει ιξώδες και να συμμορφωθεί με το σχήμα του καλουπιού. Πριν τη χύτευση, τα ακατέργαστα υλικά μπορούν να αναμιχθούν και να πιεστούν εν ψυχρώ σε ένα δίσκο, ο οποίος ονομάζεται προφόρμα. Η προθέρμανση της προφόρμας προκαλεί μείωση του χρόνου χύτευσης και της πίεσης, επιμηκύνει το χρόνο ζωής της μήτρας, και δημιουργεί ένα πιο ομοιόμορφο τελικό κομμάτι. Αυτή η τεχνική της χύτευσης χρησιμοποιείται στην κατεργασία των θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Όμως, η χρήση της με τα θερμοπλαστικά είναι πιο χρονοβόρα και δαπανηρή.

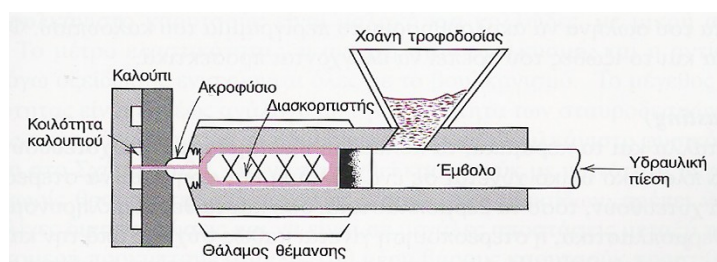
Στη χύτευση με μεταφορά, που είναι μια παραλλαγή της χύτευσης με συμπίεση, τα στερεά συστατικά πρώτα τήκονται σε ένα θερμαινόμενο θάλαμο αποτύπωσης. Καθώς το τηγμένο υλικό εγχύεται μέσα στο θάλαμο του καλουπιού, η πίεση μεταδίδεται ομοιόμορφα επάνω σε όλες τις επιφάνειες. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται με τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή και για τεμάχια με σύνθετη γεωμετρία.



Εικόνα 4.5. Σχηματικό διάγραμμα μιας συσκευής χύτευσης με συμπίεση.

## Χύτευση με έγχυση (injection molding)

Το ανάλογο της χύτευσης με μήτρα (die casting) των μετάλλων στα πολυμερή, είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνική για την κατεργασία των θερμοπλαστικών υλικών. Στην εικόνα 4.6 φαίνεται μια σχηματική διατομή της χρησιμοποιούμενης συσκευής. Η κατάλληλη ποσότητα τεμαχισμένου υλικού τροφοδοτείται μέσω ενός χωνιού τροφοδοσίας μέσα σε ένα κύλινδρο μέσω της κίνησης ενός εμβόλου. Το φορτίο πιέζεται προς ένα θερμαινόμενο θάλαμο, όπου το θερμοπλαστικό υλικό τήκεται με σκοπό να σχηματίσει ένα παχύρρεστο υγρό. Στη συνέχεια, το τηγμένο πλαστικό ωθείται, πάλι με κίνηση εμβόλου μέσω ενός ακροφύσιου μέσα στην εγκλεισμένη κοιλότητα του καλουπιού. Η πίεση διατηρείται μέχρι να στερεοποιηθεί το υλικό. Το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι η ταχύτητα με την οποία μπορούν να παραχθούν τα τεμάχια.



Εικόνα 4.6. Σχηματικό διάγραμμα μιας συσκευής χύτευσης με έγχυση.

## Εξώθηση (extrusion)

Η διαδικασία της εξώθησης είναι απλά χύτευση έγχυσης ενός παχύρρεστου θερμοπλαστικού μέσω μιας μήτρας με ανοικτό άκρο. Ένα έμβολο, προωθεί το τεμαχισμένο υλικό μέσω ενός θαλάμου, το οποίο διαδοχικά συμπιέζεται, τήκεται και μορφοποιείται μέσα σε ένα συνεχές φορτίο ιξώδους υγρού. Η εξώθηση πραγματοποιείται καθώς η τηγμένη αυτή μάζα ωθείται μέσω ενός ακροφύσιου μήτρας. Η στερεοποίηση του εξωθημένου επιμήκους σώματος επιτυγχάνεται με εμφύσηση αέρα, ή με ψεκασμό νερού, αμέσως πριν περάσει μέσα από ένα κινητό μεταφορέα. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα προσαρμοσμένη ώστε να παράγει συνεχή επιμήκη τεμάχια με σταθερές γεωμετρικές διατομές, για παράδειγμα, ράβδους, σωλήνες, μάνικες, φύλλα και λεπτά νήματα.

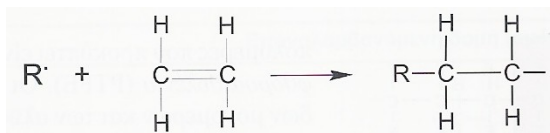
## Χύτευση με εμφύσηση (blow molding)

Κατά αυτήν την διαδικασία και για την παραγωγή πλαστικών δοχείων αρχικά εξωθείται ένα ακατέργαστο κομμάτι πολυμερούς, ή ένα επίμηκες κομμάτι από πολυμερή σωλήνα. Ενώ είναι ακόμη σε ημιτηγμένη κατάσταση, το ακατέργαστο τεμάχιο του πολυμερούς τοποθετείται σε ένα καλούπι δυο τεμαχίων που έχει το επιθυμητό σχήμα του δοχείου. Το κούφιο τεμάχιο σχηματίζεται εμφυσώντας αέρα, ή ατμό υπό πίεση μέσα στο τεμάχιο, υποχρεώνοντας τα τοιχώματα του σωλήνα να ακολουθήσουν το περίγραμμα του καλουπιού. Η θερμοκρασία και το ιξώδες του υλικού πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά.

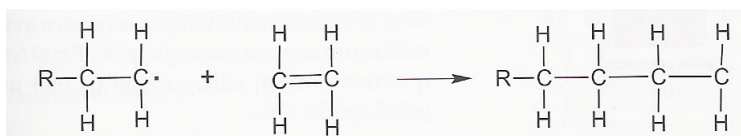
### 4.3. Το πολυαιθυλένιο (PE)

Το πολυαιθυλένιο παρασκευάζεται με πολυμερισμό του αιθυλενίου ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ). Το αιθυλένιο (σημείο ζέσεως  $-104\text{ }^\circ\text{C}$ ) είναι αέριο και παρασκευάζεται με αφυδάτωση της αιθανόλης ή με υδρογόνωση του ακετυλενίου. Επίσης παρασκευάζεται με πυρόλυση προπανίου ή αιθανίου και διαχωρισμό του από τα αέρια παραπροϊόντα που σχηματίζονται (π.χ.  $\text{CH}_4$ ). Πολυμερίζεται με το μηχανισμό προσθήκης. Οι συνθήκες πολυμερισμού έχουν σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του πολυμερούς που παράγεται. Ανάλογα με τις συνθήκες πολυμερισμού που εφαρμόζονται παράγονται δύο τύποι το **πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE)** και το **πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)**.

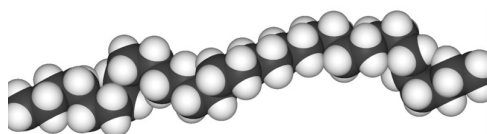
Εάν στο αέριο αιθυλένιο εφαρμοστούν κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης θα μετατραπεί σε πολυαιθυλένιο (PE), το οποίο είναι στερεό πολυμερικό υλικό. Η διαδικασία αυτή αρχίζει όταν ένα ενεργό μονομερές από την αντίδραση μεταξύ ενός εκκινητή ή καταλύτη ( $\text{R}'$ ) και του αιθυλενικού μονομερούς ως εξής:



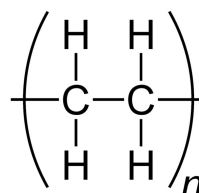
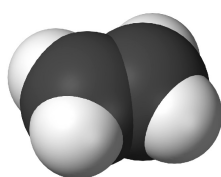
Η πολυμερική αλυσίδα τότε σχηματίζεται από τη διαδοχική προσθήκη μονομερών αιθυλενικών ομάδων σε αυτό το ενεργό κέντρο εκκινητή-ομάδας μονομερούς. Το ενεργό κέντρο, ή ασύζευκτο ηλεκτρόνιο (υποδηλώνεται από  $\cdot$ ), μεταφέρεται στο εκάστοτε τελικό μονομερές καθώς συνδέεται με την αλυσίδα. Αυτό μπορεί να παρασταθεί σχηματικά ως εξής:



Το τελικό αποτέλεσμα, μετά από την προσθήκη πολλών μονομερών ομάδων αιθυλενίου, είναι το μόριο του πολυαιθυλενίου, ένα τμήμα του οποίου φαίνεται στην εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7. Τμήμα πολυαιθυλενίου



Εικόνα 4.8. Το μόριο του αιθυλενίου



Το πολυαιθυλένιο καθώς είναι ένα φθινό υλικό και σε συνδυασμό με τις καλές ιδιότητες του όπως: Αντίσταση στα χημικά, ηλεκτρικά μονωτικό, ανθεκτικό και με σχετικά χαμηλό συντελεστή τριβής, βρίσκει χρήση σε ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως: εύκαμπτα πλαστικά μπουκάλια, παιδικά παιχνίδια, δοχεία, φιλμ περιτυλίγματος, ηλεκτρικές μονώσεις και πολλά άλλα.

### **Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE)**

Ο πολυμερισμός του αιθυλενίου γίνεται στην αέρια φάση σε υψηλές θερμοκρασίες (250 °C) και πιέσεις (100-500 Kg/cm<sup>2</sup>). Τα μακρομόρια του πολυμερούς δεν είναι πλήρως γραμμικά αλλά σε κάποιο βαθμό διακλαδιζόμενα. Η παρουσία μακρομορίων με διακλαδώσεις ελαττώνει την κρυσταλλικότητα της δομής με αποτέλεσμα το πολυαιθυλένιο αυτό να έχει χαμηλότερη πυκνότητα από το πλήρως γραμμικό πολυαιθυλένιο. Παρουσιάζει κρυσταλλική δομή σε ποσοστό 50-60%, σημείο τήξεως 115 °C και πυκνότητα 0,91-0,94 g/cm<sup>3</sup>.

### **Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)**

Ο πολυμερισμός του αιθυλενίου γίνεται ως εξής: Το αιθυλένιο διαλύεται σε βενζίνη όπου πολυμερίζεται παρουσία καταλυτών (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>Al και TiCl<sub>4</sub> σε πίεση 2-6 Kg/cm<sup>2</sup> και θερμοκρασία 60 - 80 °C.

Το πολυαιθυλένιο που σχηματίζεται μετά τον αποχωρισμό από την βενζίνη πλένεται με αλκοόλη, ξηραίνεται και κωνιοποιείται. Η δομή του πολυαιθυλενίου που παράγεται είναι πλήρως γραμμική και κρυσταλλική σε ποσοστό 90%.

Το σημείο τήξεως του είναι 170 °C και η πυκνότητα του 0,95-0,97 g/cm<sup>3</sup>. Η διαφορά του σε ορισμένες ιδιότητες από το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας οφείλεται στην μεγαλύτερη κρυσταλλικότητα της δομής του. Γενικά είναι πιο δύσκαμπτο, έχει μεγαλύτερο σημείο τήξεως και μεγαλύτερη σκληρότητα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ**

### **5.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ**

Οι συγκολλήσεις ανήκουν στη κατηγορία των μόνιμων συνδέσεων ανάμεσα σε τεμάχια. Οι συγκολλήσεις ως μέσο σύνδεσης αντικατέστησαν όλες τις μεθόδους λυόμενων συνδέσεων (κοχλιοσυνδέσεις, ηλώσεις), εκεί βέβαια που δε χρειαζόταν η σύνδεση να είναι λύσιμη. Για την παραγωγή σύνθετων κατασκευών, οι συγκολλήσεις αντικατέστησαν την πολύ δαπανηρή χύτευση.

Τα πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων απέναντι στη χύτευση είναι: οικονομία στο υλικό, μικρότερο κόστος και πραγματοποίηση σύνθετων κατασκευών, που με τη χύτευση είναι αδύνατες ή πολύ δύσκολες. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι συγκολλήσεις σχετίζονται κυρίως με τη συγκολλητικότητα των υλικών, δηλαδή την ιδιότητα ενός υλικού να μπορεί να συγκολληθεί.

Η συγκόλληση των πλαστικών μοιάζει αρκετά με τη συγκόλληση των μετάλλων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στηρίζονται στην πίεση των δύο συγκολλώμενων πλαστικών τεμαχίων με παράλληλη θέρμανση στο σημείο της ένωσης τους. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η συγκόλληση με τριβή, που εφαρμόζεται κυρίως σε ράβδους πλαστικών, η συγκόλληση με υπέρηχους, η συγκόλληση με θερμαινόμενες πλάκες και άλλες.

Μία γενική κατηγοριοποίηση των συγκολλήσεων τις κατατάσσει σε δύο κατηγορίες, τις αυτογενείς συγκολλήσεις και τις ετερογενείς συγκολλήσεις. Στις αυτογενείς συγκολλήσεις απαιτείται τοπικό λιώσιμο των προς συγκόλληση τεμαχίων χωρίς την τοποθέτηση συγκολλητικού μέσου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συγκολλήσεων είναι η οξυγονοκόλληση, η ηλεκτροσυγκόλληση, η συγκόλληση με αντίσταση, με Laser κ.λ.π.. Στις ετερογενείς συγκολλήσεις δε χρειάζεται τοπική τήξη των αντικειμένων, που θα συγκολληθούν, παρά μόνο θέρμανση και εναπόθεση λιωμένου συγκολλητικού υλικού. Τέτοιες συγκολλήσεις είναι η κασσιτεροκόλληση, η μπρουντζοκόλληση κ.λ.π.. Οι ετερογενείς συγκολλήσεις διακρίνονται σε μαλακές και σκληρές. Στις μαλακές συγκολλήσεις η θερμοκρασία συγκόλλησης είναι πολύ χαμηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία που χρησιμοποιείται στις σκληρές συγκολλήσεις. Οι ετερογενείς συγκολλήσεις χρησιμοποιούνται συνήθως για τη συγκόλληση τεμαχίων από διαφορετικά υλικά.

Άλλη μια κατηγοριοποίηση των συγκολλήσεων, που έχει να κάνει με τη διαδικασία της συγκόλλησης και τις κατατάσσει σε δυο κατηγορίες είναι :

- Επεξεργασία που περιλαμβάνει μηχανική κίνηση (συγκόλληση με υπέρηχους, συγκόλληση με τριβή, παλμική συγκόλληση).
- Επεξεργασία που περιλαμβάνει εξωτερική παροχή θερμότητας (συγκόλληση με θερμαινόμενες πλάκες, συγκόλληση με αντιστάσεις και εμφυτεύματα).

Οι διάφορες διαδικασίες συγκόλλησης οι μηχανικοί σύνδεσμοι, και τα συγκολλητικά μέσα (κόλλες), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαμορφώσουν τις ενώσεις μεταξύ των πλαστικών. Οι μηχανικοί σύνδεσμοι μπορούν να ενώσουν δύο τεμάχια γρήγορα, αλλά δεν παρέχουν πολύ καλή ένωση, και η εφαρμοζόμενη πίεση μπορεί να προκαλέσει την απελευθέρωση του πολυμερούς υλικού. Τα συγκολλητικά μέσα μπορούν να παρέχουν καλές ιδιότητες και πολύ καλές ενώσεις, αλλά είναι δύσκολος ο χειρισμός τους και επιβραδύνουν τη διαδικασία της στερεοποίησης.

Επίσης κατά τη σύνδεση με συγκολλητικά μέσα πρέπει να γίνει μια προετοιμασία και ο καθαρισμός της επιφάνειας.

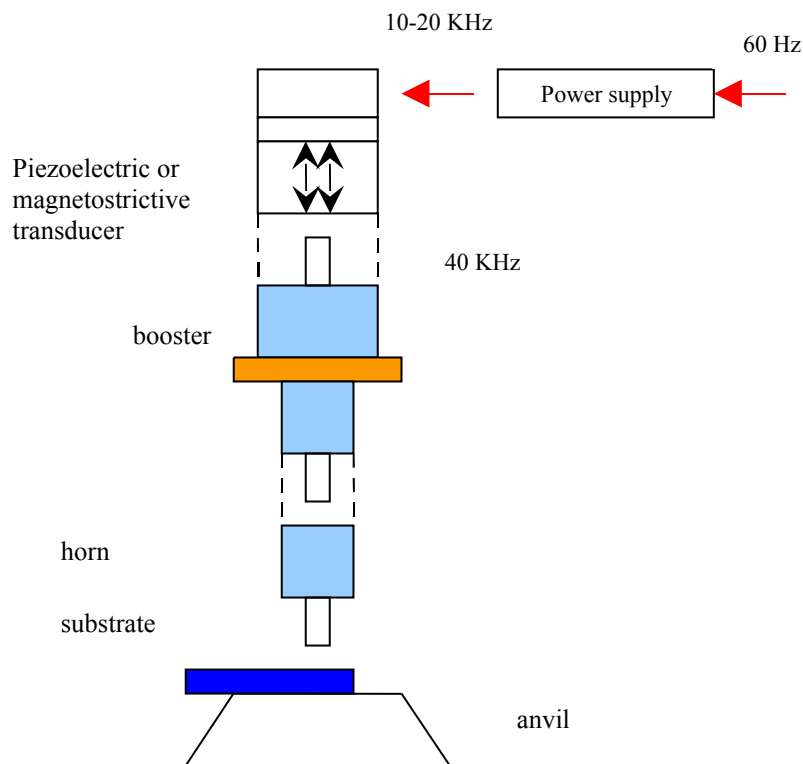
Η αυτογενής συγκόλληση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει ενώσεις με τις μηχανικές ιδιότητες που πλησιάζουν εκείνων του αρχικού υλικού. Η αυτογενής συγκόλληση των πλαστικών περιορίζεται στα θερμοπλαστικά πολυμερή σώματα επειδή αυτά τα υλικά μπορούν να μαλακώσουν με τη θερμότητα. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή σώματα μόλις σκληρύνουν δεν μπορούν να μαλακώσουν πάλι με τη θέρμανση. Η θερμότητα που απαιτείται για την ένωση των θερμοπλαστικών πολυμερών σωμάτων είναι λιγότερη από αυτή που απαιτείται για τα μέταλλα.

## 5.2. Συγκολλήσεις με μηχανικές δονήσεις

### Συγκόλληση με υπέρηχους

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί μηχανικές δονήσεις για να διαμορφώσει την ένωση. Οι δονήσεις αυτές είναι υψηλής συχνότητας. Τα κομμάτια που πρόκειται να συγκολληθούν συγκρατούνται μαζί υπό πίεση ανάμεσα σε ένα σταθερό σημείο π.χ. αμόνι (anvil) και ένα παλλόμενο κέρασ (horn) και υποβάλλεται σε υπερηχητικές δονήσεις συχνότητας 20 έως 40 KHz με την κατάλληλη γωνία για να γίνει σωστά η συγκόλληση. Η υψηλής συχνότητας δονήσεις παράγουν θερμότητα στο σημείο και έτσι επιτυγχάνεται καλής ποιότητας συγκόλληση. Ο εξοπλισμός για αυτήν την διαδικασία είναι αρκετά ακριβός και είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται σε βιομηχανικής κλίμακας παραγωγή

Η συγκόλληση αυτή έχει κάποιους περιορισμούς καθώς χρησιμοποιείται σε μικρά τεμάχια με μήκη συγκόλλησης που δεν υπερβαίνουν τα μερικά εκατοστά. Το εύρος των εφαρμογών αυτής της μεθόδου είναι μεγάλο, από βαλβίδες και φίλτρα για ιατρικό εξοπλισμό μέχρι εξαρτήματα αυτοκινήτων.

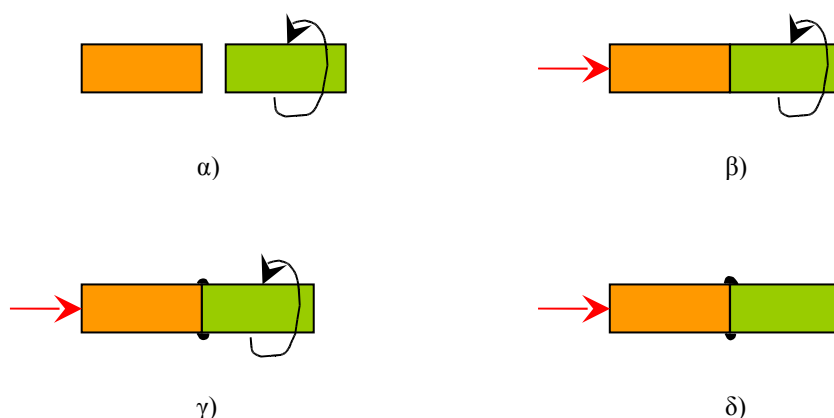


Εικόνα 5.1. Συσκευή συγκόλλησης με υπέρηχους.

## Συγκόλληση με τριβή

Η συγκόλληση με τριβή των θερμοπλαστικών βασίζεται στις ίδιες αρχές που βασίζεται η συγκόλληση των μετάλλων. Κατά την διαδικασία αυτήν το ένα κομμάτι που πρόκειται να συγκολληθεί είναι σταθερό, ενώ το άλλο περιστρέφεται με ελεγχόμενη γωνιακή ταχύτητα. Όταν τα δυο κομμάτια συμπιεστούν το ένα στο άλλο, παράγεται θερμότητα από την τριβή των τεμαχίων που λιώνει και στην συνέχεια κολλάει τα κομμάτια. Σημαντικοί παράγοντες σε αυτήν τη διαδικασία είναι η περιστροφική ταχύτητα, η πίεση που ασκείται στα κομμάτια και η διάρκεια που θα παραμείνουν υπό πίεση τα κομμάτια.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι : η υψηλής ποιότητας συγκόλληση, η απλότητα της μεθόδου, και η επαναληψιμότητα της μεθόδου. Παρακάτω στην εικόνα 5.2. φαίνεται ένα σχέδιο της μεθόδου στην απλούστερη μορφή του.



(α) Το κινητό μέρος ξεκινά την περιστροφή.(β) Τα κομμάτια συμπιέζονται.(γ) Η πίεση διατηρείται για κάποιο χρονικό διάστημα(δ) Η περιστροφή σταματάει, η πίεση διατηρείται για κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να παραχθεί η κόλληση.

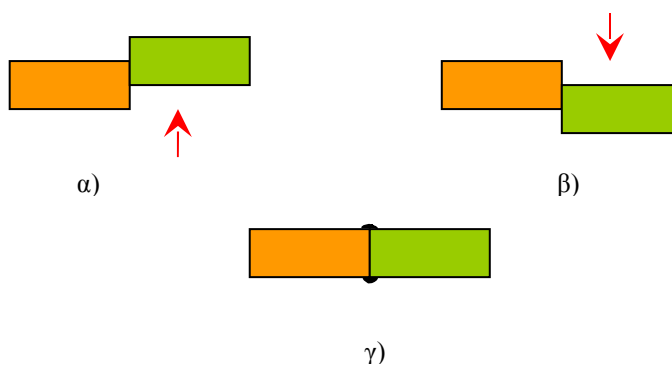
Εικόνα 5.2. Συγκόλληση με τριβή.

## Συγκόλληση με δονήσεις

Αυτή η μέθοδος καλείται επίσης και συγκόλληση γραμμικής τριβής. Δυο θερμοπλαστικά κομμάτια τρίβονται μεταξύ τους υπό πίεση με κατάλληλη συχνότητα και πλάτος, μέχρι να αναπτυχθεί αρκετή θερμότητα ώστε να λιώσουν τα πολυμερή στο σημείο της τριβής. Αφού λιώσουν, σταματούν οι δονήσεις, τα κομμάτια ευθυγραμμίζονται και αφήνονται να στερεοποιηθούν ώστε να σχηματιστεί η κόλληση. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με την συγκόλληση τριβής, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση η κίνηση είναι γραμμική και όχι περιστροφική. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ γρήγορη· οι δονήσεις έχουν συχνότητα 100-240 Hz και πλάτος 1-5 mm.

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα μεγάλων και σύνθετων συγκολλήσεων σε βιομηχανική κλίμακα. Άλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ταυτόχρονη συγκόλληση πολλών τεμαχίων, η απλότητα της

σχεδίασης και η καταλληλότητα της μεθόδου για σχεδόν όλα τα θερμοπλαστικά υλικά. Η συγκόλληση με δονήσεις έχει βρει εφαρμογή στη βιομηχανία αυτοκινήτων και στη βιομηχανία οικιακών συσκευών. Μια απλοποιημένη μορφή της μεθόδου φαίνεται στην εικόνα 5.3.



(α)και(β) Τα κομμάτια τρίβονται μεταξύ τους μέχρι να λιώσουν. (γ) Αφού λιώσουν ευθυγραμμίζονται και στερεοποιούνται

Εικόνα 5.3. Συγκόλληση με δονήσεις

### **5.3. Συγκολλήσεις με εξωτερική παροχή θερμότητας**

#### **Συγκόλληση με θερμαινόμενες πλάκες**

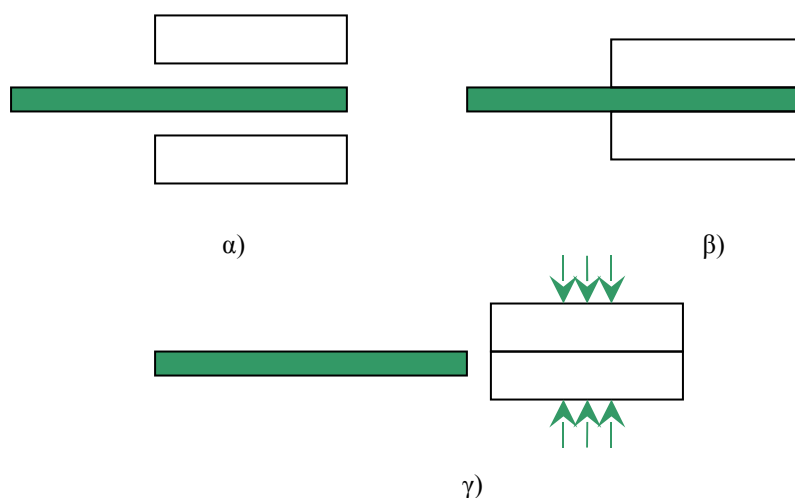
Αυτή είναι η απλούστερη από τις τεχνικές μαζικής παραγωγής. Μια ζεστή πλάκα τοποθετείται ανάμεσα από τις επιφάνειες που επιθυμούμε να συγκολλήσουμε και διατηρείται εκεί μέχρι οι επιφάνειες να μαλακώσουν. Μόλις μαλακώσουν οι επιφάνειες, αποσύρεται η πλάκα και οι επιφάνειες συμπιέζονται υπό ελεγχόμενη πίεση για κάποιο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια οι επιφάνειες κρυώνουν ώστε να διαμορφωθεί η ένωση.

Το θερμαντικό στοιχείο (πλάκα) είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να μην κολλάει σε αυτό το ζεστό ή λειωμένο πλαστικό. Οι θερμοκρασίες της μεθόδου κυμαίνονται γενικά από 180°C έως 230°C εξαρτώμενες από το πάχος και τον τύπο του προς συγκόλληση υλικού. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται συνήθως για να συγκολληθεί στεγανά τις άκρες των πλαστικών σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται στη διανομή νερού, αερίου και λυμάτων αλλά και σε χημικές βιομηχανίες και για τη στεγανή σύνδεση πλαστικών δεξαμενών καυσίμων των αυτοκινήτων.

Πολλά είδη καθημερινής χρήσης παράγονται με αυτήν τη μέθοδο. Ηλεκτρικές σκούπες καθαρισμού, πλαστικά εξαρτήματα πλυντηρίων ρούχων και πιάτων, εξαρτήματα αυτοκινήτων όπως πλαστικά δοχεία υγρών φρένων, φανάρια, ενδεικτικές λυχνίες και άλλα.

Οι χρόνοι συγκόλλησης ποικίλουν από 10 έως 20 sec για μικρά αντικείμενα και 30 min για πολύ μεγάλους σωλήνες. Οι πλάκες για το συνηθισμένο τρόπο συγκόλλησης (μέχρι δηλαδή τους 300°C) είναι κυρίως κατασκευασμένοι από αλουμίνιο. Οι πλάκες για υψηλές θερμοκρασίες συγκόλλησης κατασκευάζονται από κράμα αλουμινίου και χαλκού. Η θερμοκρασία της θερμαινόμενης πλάκας ελέγχεται από ηλεκτρονικά κυκλώματα σταθεροποίησης με αισθητήρες που τοποθετούνται όσο

πιο κοντά γίνεται στις υπό συγκόλληση επιφάνειες. Στην εικόνα 5.4. φαίνεται ένα απλοποιημένο σχέδιο της τεχνικής αυτής.



Εικόνα 5.4. Συγκόλληση με θερμαινόμενες πλάκες.

### Συγκόλληση με καυτά αέρια

Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με τη συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη. Η μόνη διαφορά είναι ότι η ανοιχτή φλόγα της οξυγονοασετυλίνης αντικαθίσταται από ένα ρεύμα καυτού αερίου. Συμπιεσμένος αέρας, άζωτο, υδρογόνο, οξυγόνο, ή διοξείδιο του άνθρακα θερμαίνονται από μια ηλεκτρική σπείρα καθώς περνούν μέσα από το πιστόλι συγκόλλησης.

Η συγκόλληση με καυτά αέρια είναι μια διαδικασία επεξεργασίας των θερμοπλαστικών η οποία εφευρέθηκε στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα και χρησιμοποιεί ένα ρεύμα καυτού αερίου, συνήθως αέρα, για να θερμάνει και να λιώσει το θερμοπλαστικό υπόστρωμα αλλά και τη θερμοπλαστική ράβδο συγκόλλησης. Το υπόστρωμα και η ράβδος καθώς λιώνουν και στη συνέχεια στερεοποιούνται διαμορφώνουν την ένωση. Για να εξασφαλιστεί η σωστή συγκόλληση, πρέπει να εφαρμοστεί επαρκής ποσότητα πίεσης και θερμοκρασίας καθώς και η σωστή θέση και η κατάλληλη ταχύτητα του πιστολιού συγκόλλησης.

Χαρακτηριστικές εφαρμογές της μεθόδου περιλαμβάνουν δοχεία αποθήκευσης χημικών, πλαστικά εξαρτήματα για διοχετεύσεις εξαερισμών και επισκευές σε πλαστικούς προφυλακτήρες αυτοκινήτων. Για ευαίσθητα στο οξυγόνο πλαστικά όπως το πολυαιθυλένιο χρησιμοποιείται το άζωτο ενώ το οξυγόνο χρησιμοποιείται για συγκολλήσεις πιο απαιτητικές σε δυνάμεις. Ο συμπιεσμένος αέρας χρησιμοποιείται πολύ συχνά γιατί δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και είναι αρκετά φθηνός.

Τα πλαστικά, τα οποία συγκολλούνται με αυτήν τη μέθοδο είναι τα PVC, το πολυαιθυλένιο, τα πολυκαρβονικά και τα nylon. Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η κατασκευή μεγάλων και πολύπλοκων κατασκευών. Σαν μειονέκτημα της μεθόδου μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος αυτή είναι αργή και η ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται αποκλειστικά από τις ικανότητες του συγκολλητή. Στην εικόνα 5.5 στην επόμενη σελίδα μπορούμε να δούμε τη συγκόλληση με καυτά αέρια.



Εικόνα 5.5 Συγκόλληση μετάλλων με καυτά αέρια.

### **Συγκόλληση με εμφυτεύματα**

Σε αυτήν τη διαδικασία, μεταλλικά κομμάτια εισάγονται ανάμεσα στα κομμάτια που θέλουμε να συγκολλήσουμε και στη συνέχεια θερμαίνονται μέσω επαγωγής ή μέσω της αντίστασης του μετάλλου στο ηλεκτρικό ρεύμα. Η μέθοδος με τις αντιστάσεις απαιτεί τα καλώδια να τοποθετηθούν κατά μήκος της ένωσης για να μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα στα εμφυτεύματα. Αυτό δεν απαιτείται για την συγκόλληση με επαγωγή. Το θερμοπλαστικό υλικό λιώνει γύρω από τα εμφυτεύματα και ρέει για να δημιουργήσει την ένωση. Η συγκόλληση με εμφυτεύματα εφαρμόζεται σε περίπλοκες ενώσεις μέσα σε μεγάλα εξαρτήματα όπως σε προφυλακτήρες αυτοκινήτων ή εξαρτήματα που υπάρχουν σε ηλεκτρικά οχήματα και μικρά ιστιοπλοϊκά πλοία όπου ο χώρος είναι περιορισμένος.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ LASER**

### **6.1. Μέθοδοι συγκολλήσεων με laser**

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) σε (nm) και τη συχνότητα τους ( $\nu$ ) σε ( $\text{Hz}$  ή  $s^{-1}$ )  $\lambda = c / \nu$ , όπου  $c$  η ταχύτητα φωτός που ισούται με  $c = 300000 \text{ km/sec}$ . Στις μικρότερες συχνότητες η ενέργεια των Η/Μ κυμάτων μπορεί να διεγείρει τις δονητικές ταλαντώσεις των μορίων ενός υλικού και να προκαλέσει θερμικά αποτελέσματα.

Η υπέρυθη ακτινοβολία απορροφάται από τα πλαστικά κυρίως σε μήκη κύματος μεταξύ  $1.7\text{-}15 \mu\text{m}$ . Η απορρόφηση βασίζεται στη διέγερση των μορίων του υλικού η οποία οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας. Τα μόρια του υλικού καθώς έχουν μια σχετική κίνηση ταλάντωσης (ιδιοσυχνότητα του υλικού), διεγερόμενα από την υπέρυθη ακτινοβολία του laser, αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια και σαν επακόλουθο αυτής προκύπτει η αύξηση της θερμοκρασίας.

Η τεχνολογία συγκόλλησης πλαστικών με laser δεν είναι καινούρια, εφαρμόζεται εδώ και είκοσι χρόνια σε περιορισμένες όμως εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια οι εφαρμογές με αυτήν την τεχνική έχουν αυξηθεί λόγω της μείωσης των τιμών των συστημάτων laser και της περαιτέρω κατανόησης των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα.

Υπάρχουν δυο τύποι συγκολλήσεων με laser. Η συγκόλληση με απευθείας τήξη όπως π.χ. με ( $\text{CO}_2$  laser) και η συγκόλληση laser με διερχόμενη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία του  $\text{CO}_2$  laser απορροφάται άμεσα από τα πλαστικά, επιτρέποντας την πραγματοποίηση γρήγορων ενώσεων, αλλά με περιορισμένο βάθος διείσδυσης της δέσμης που περιορίζει την τεχνική αυτή σε εφαρμογές λεπτών φιλμ.

### **Πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με laser**

Αυτή η τεχνική παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους συγκολλήσεων πλαστικών που αναφέρθηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο. Μερικά από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι :

- Διαδικασία χωρίς επαφή με την πηγή. Η πηγή της θερμότητας δεν έχει καμία επαφή με τα πλαστικά κομμάτια που θα συγκολληθούν.
- Υψηλή ταχύτητα. Επιτρέπει τις γρήγορες ταχύτητες επεξεργασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει τριβή ή αντίσταση του υλικού με το «εργαλείο» επεξεργασίας (δέσμη laser).
- Καθαρότητα. Επειδή δεν υπάρχει επαφή, ολόκληρη η διαδικασία είναι πολύ καθαρή, ελεύθερη από θραύσματα και καμένα κομμάτια πλαστικού.
- Ευελιξία. Οι διάφοροι τρόποι μετάδοσης της δέσμης (οπτικές ίνες, καθρέπτες, ρομποτική κίνηση) επιτρέπουν την εύκολη μετάβαση της δέσμης από το ένα δείγμα στο άλλο και άρα γρήγορες ταχύτητες επεξεργασίας.
- Ελέγξιμη διαδικασία. Η δέσμη του laser είναι πολύ εύκολο να ελεγχθεί κάτι που επιτρέπει την μετάδοση της ακριβούς ποσότητας ενέργειας.
- Εύκολη αυτοματοποίηση. Η εφαρμογές με laser είναι γενικά αυτοματοποιημένες κάτι που οδηγεί στην αποφυγή των αδέξιων χειρισμών.



- Αποδοτικότητα. Όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα επιφέρουν υψηλή απόδοση.

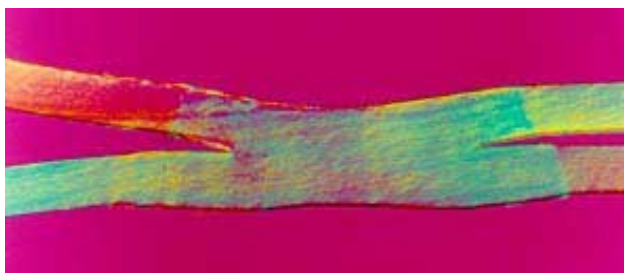
### Εφαρμογές της μεθόδου

Η συγκόλληση πλαστικών υλικών με laser έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην βιομηχανία και συναγωνίζεται επάξια σε ποιότητα και παραγωγικότητα τις συμβατικές μεθόδους συγκολλήσεων πλαστικών. Έτσι όλο και περισσότεροι βιομηχανικοί κλάδοι ενδιαφέρονται να αντικαταστήσουν τις παλαιές μεθόδους συγκολλήσεως των πλαστικών με την συγκόλληση με laser. Μερικές βιομηχανίες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν αυτή τη μέθοδο είναι : βιομηχανίες συσκευασίας, βιομηχανίες ιατρικού εξοπλισμού, βιομηχανίες ηλεκτρονικών συσκευών, βιομηχανίες αυτοκινήτων, βιομηχανίες φωτισμού γενικά, βιομηχανίες πετροχημικών και χημικών και κάθε άλλου τύπου βιομηχανίες που περιλαμβάνουν συγκολλήσεις πλαστικών εξαρτημάτων.

#### 6.1.1. Συγκόλληση με laser CO<sub>2</sub>

Το laser CO<sub>2</sub> είναι ένα καλά καθιερωμένο εργαλείο επεξεργασίας υλικών, διαθέσιμο σε ισχείς μέχρι και 60 KW, και χρησιμοποιούμενο στα επίπεδα αυτά συνήθως σε κοπή μετάλλων. Η ακτινοβολία του laser CO<sub>2</sub> απορροφάται άμεσα από τα επιφανειακά στρώματα των πλαστικών. Η απορρόφηση αυτής της ενέργειας φωτονίων (0.12 eV) βασίζεται στις δονήσεις των μοριακών δεσμών του υλικού. Η θερμοκρασία των πλαστικών αυξάνεται καθώς το laser προκαλεί αύξηση της κινητικής ενέργειας στα μόρια του υλικού. Πρακτικά οι συντελεστές απορρόφησης του laser CO<sub>2</sub> σε όλα σχεδόν τα πλαστικά είναι πολύ μεγάλοι. Έτσι επιτυγχάνονται πολύ γρήγορες ταχύτητες επεξεργασίας με λεπτά πλαστικά φιλμ, ακόμη και σε πολύ χαμηλές ισχείς laser (<1000 W). Λόγω της ταχύτατης απορρόφησης της ενέργειας από τα επιφανειακά στρώματα των πλαστικών, το laser αυτού του τύπου κρίνεται ανεπαρκές για συγκολλήσεις φύλλων πλαστικού με μεγάλο πάχος. Η δέσμη του CO<sub>2</sub> laser δεν μπορεί να μεταδοθεί με συμβατικές οπτικές ίνες, αλλά μπορούμε να τη χειριστούμε με σχετικά πιο πολύπλοκες μεθόδους χρησιμοποιώντας καθρέπτες και κοίλους ρομποτικούς βραχίονες.

Στην εικόνα 6.8. που ακολουθεί φαίνεται συγκόλληση φιλμ πολυαιθυλενίου πάχους 100 μm με ταχύτητα 100 m/min και laser ισχύος 100 W.



Εικόνα 6.8. Συγκόλληση με CO<sub>2</sub> laser

### 6.1.2. Συγκόλληση με διερχόμενη ακτινοβολία laser

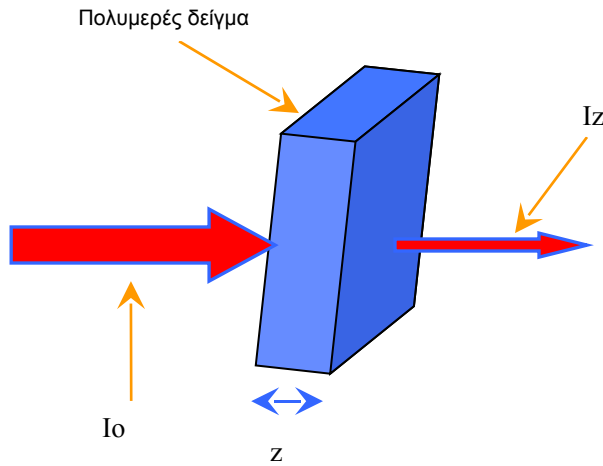
Η τεχνική που ονομάζεται συγκόλληση με διερχόμενη ακτινοβολία laser περιλαμβάνει την ένωση δυο πολυμερών υλικών με την πρόσπτωση ακτινοβολίας από ένα laser του οποίου η δέσμη διέρχεται ελεύθερα στο ένα υλικό ενώ απορροφάται έντονα στο δεύτερο. Το laser παράγει μια έντονη δέσμη ακτινοβολίας (συνήθως στην υπέρυθη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος) η οποία εστιάζεται στο υλικό που πρόκειται να συγκολληθεί. Η απαιτούμενη για την συγκόλληση θερμότητα πρέπει να εντοπίζεται στην διεπαφή των δυο πλαστικών, εκεί που θέλουμε να προκύψει η συγκόλληση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός πολυμερούς που αφήνει να διέλθει η ακτινοβολία του laser και ενός πολυμερούς που την απορροφά και επιφέρει την αύξηση της θερμοκρασίας στη διεπαφή των δυο υλικών. Στην εικόνα 6.1. της επόμενης σελίδας φαίνεται με βήματα η τεχνική.

Σύμφωνα με αυτά εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς ότι η μέθοδος συγκόλλησης με διερχόμενη ακτινοβολία laser είναι κατάλληλη για τη συγκόλληση παχύτερων τεμαχίων από τη συγκόλληση με laser  $CO_2$  και ότι εφόσον η επηρεαζόμενη από τη θερμότητα ζώνη είναι περιορισμένη στο σημείο της ένωσης δεν προκαλούνται αλλοιώσεις στην εξωτερική επιφάνεια των πλαστικών.

#### **Βήματα για την επίτευξη της συγκόλλησης:**

- A. Η δέσμη του laser διαπερνά το πρώτο στρώμα του πλαστικού και απορροφάται από το δεύτερο.
- B. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας του laser δημιουργεί αύξηση της θερμοκρασίας στην διεπαφή των πλαστικών.
- C. Η θερμοκρασία λιώνει τα δυο πλαστικά τα οποία και αναμιγνύονται μεταξύ τους.
- D. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται στην διεπαφή διαμορφώνεται η ένωση των δυο υλικών που στερεοποιούνται.

απορρόφηση του πολυμερούς με βάση το νόμο του Beer. Ο καλύτερος συνδυασμός είναι τα δυο πολυμερή τεμάχια που θα συγκολληθούν να είναι χημικά συμβατά και όπως έχουμε αναφέρει ξανά το ένα να απορροφά και το άλλο να εκπέμπει τη δέσμη του laser.

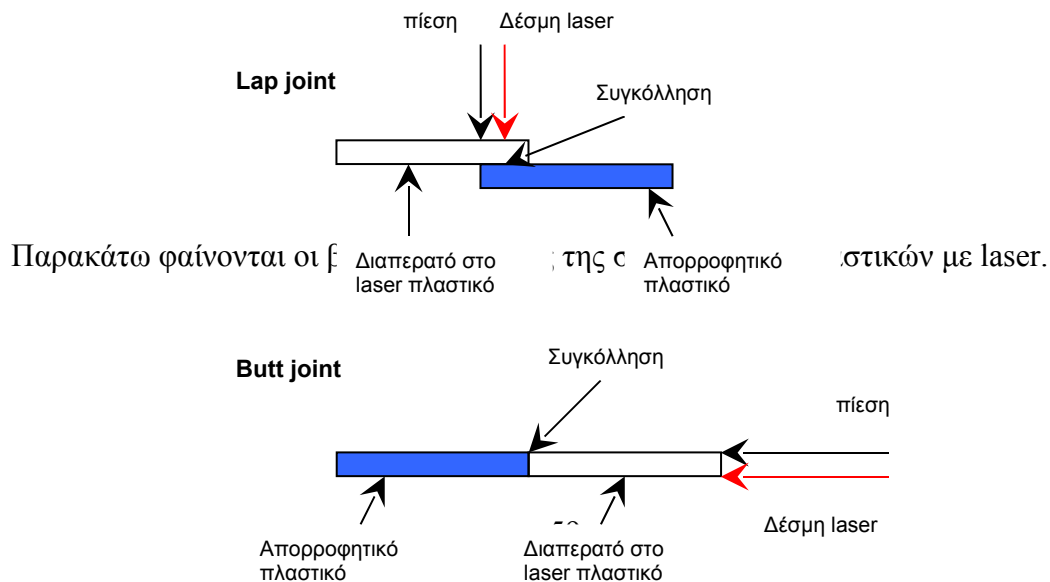


Εικόνα 6.3. Διάταξη δοκιμής διέλευσης ισχύος (power transmission test).

### 6.2.2. Οι διατάξεις της ένωσης

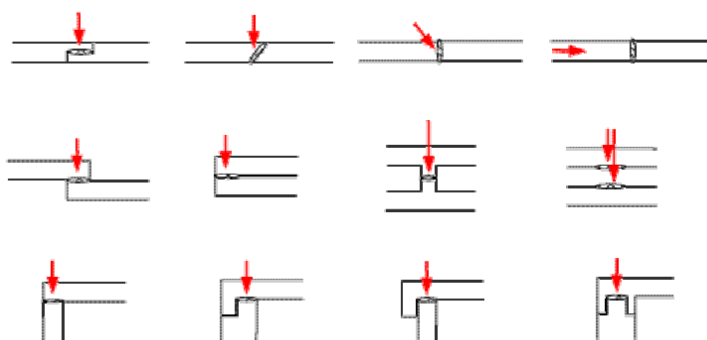
Αφού γίνει η επιλογή των πλαστικών με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά διέλευσης και απορρόφησης, άλλος ένας σημαντικός παράγοντας είναι η γεωμετρική διάταξη της ένωσης. Η πιο βασική διάταξη για συγκόλληση πλαστικών με διέλευση δέσμης είναι η διάταξη αλληλοεπικάλυψης που φαίνεται στην εικόνα 6.4. Η διάταξη αλληλοεπικάλυψης επιτυγχάνεται όταν ένα τεμάχιο πλαστικού που επιτρέπει τη διέλευση στο φως του laser τοποθετείται πάνω από ένα απορροφητικό κομμάτι πλαστικού. Άλλη διάταξη η οποία φαίνεται στην εικόνα 6.4. τις επόμενης σελίδας είναι η διάταξη συναρμογής ακμών (butt joint). Υπάρχουν και άλλες πολλές διατάξεις που αποτελούν παραλλαγές της διάταξης αλληλοεπικάλυψης (lap joint) και της διάταξης ακμών (butt joint) οι οποίες φαίνονται στην εικόνα 6.5.. Η διάταξη συναρμογής ακμών παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες γιατί η επιφάνεια συγκόλλησης στην άκρη του πλαστικού είναι μικρή και αυτό δυσκολεύει την κατάλληλη εφαρμογή της μηχανικής πίεσης που είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας και θα αναλυθεί παρακάτω.

Ανεξάρτητα με τη διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί, δυο κριτήρια πρέπει να ισχύουν. Το πρώτο κριτήριο είναι ότι η δέσμη του laser πρέπει ανεμπόδιστα να μεταβιβάζεται στη διασύνδεση όπου είναι επιθυμητή η συγκόλληση και το δεύτερο ότι πρέπει να υπάρχει επαρκής χώρος για να ασκείται η πίεση που θα συμβάλει στην συγκόλληση.



Εικόνα 6.4. Διατάξεις αλληλοεπικάλυψης (lap joint) και ακμών (butt joint).

Παρακάτω εμφανίζονται οι διάφορες διατάξεις, παραλλαγές της διάταξης επικάλυψης (lap joint) και διάταξης ακμών (butt joint).



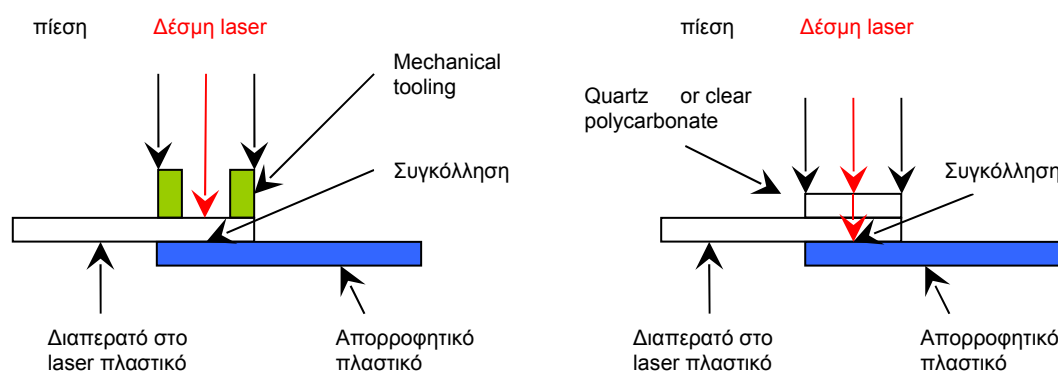
Εικόνα 6.5. Παραλλαγές των διατάξεων lap joint και butt joint

### 6.2.3. Πίεση

Το δεύτερο πιο σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας συγκόλλησης πλαστικών με laser μετά από την επίδραση της δέσμης του laser, είναι η κατάλληλη εφαρμογή της πίεσης ώστε να δημιουργηθεί σωστή συγκόλληση. Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω η διαδικασία απαιτεί δυο πλαστικά τεμάχια, ένα που απορροφά την ακτινοβολία του laser και ένα που επιτρέπει την διέλευση της. Το απορροφητικό τεμάχιο θερμαίνεται από την ακτινοβολία και διαχέει την θερμότητα και στο μη απορροφητικό τεμάχιο το οποίο με τη σειρά του επίσης θερμαίνεται. Καθώς και τα δυο τεμάχια θερμαίνονται αρχίζουν να διαστέλλονται. Η διαστολή των πλαστικών είναι αποτέλεσμα της μοριακής διέγερσης και είναι απαραίτητο να περιοριστεί. Εάν δεν περιοριστεί η διαστολή των πολυμερών, δεν θα προκύψει συγκόλληση και αυτό γιατί δεν θα διασταυρωθούν τα πολυμερή στο σημείο της διασύνδεσης. Η πίεση πρέπει να εφαρμοστεί πολύ κοντά στο σημείο της ένωσης για να μεταδοθεί άμεσα στα σημεία διεπαφής και επίσης για να κρατήσει σταθερά τα κομμάτια αλλά και να περιορίσει την επέκταση και στρέβλωση των πολυμερών που θα είχε ως αποτέλεσμα την ελλιπή ένωση. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της πίεσης είναι η εξαναγκασμένη ανάμιξη των τηγμένων (λιωμένων) πλαστικών υλικών. Ο περιορισμός της εξάπλωσης

θα επιτρέψει στα δυο τεμάχια να διασταυρωθούν (cross-linked) στο σημείο της διασύνδεσης και να επιτευχθεί καλή συγκόλληση.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την εφαρμογή της πίεσης στα τεμάχια. Η βασική αρχή είναι ότι κατά την εφαρμογή της πίεσης δεν πρέπει να παρεμβάλλεται οπτικό εμπόδιο στην πορεία της δέσμης του laser. Έτσι, είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί μηχανική πίεση πολύ κοντά στην διασύνδεση της ένωσης αλλά όχι άμεσα επάνω από τη διασύνδεση. Μια άλλη επιλογή είναι να χρησιμοποιήσουμε για μέσο πίεσης ένα επίπεδο διαφανές και δύστηκτο υλικό το οποίο επιτρέπει τη διέλευση της δέσμης του laser. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο χαλαζίας (quartz) και ο καθαρός πολυάνθρακας (clear polycarbonate). Στην εικόνα που ακολουθεί 6.6. φαίνονται οι παραπάνω διατάξεις.



Εικόνα 6.6. Παραδείγματα εφαρμογής πίεσης.

#### 6.2.4. Το τελευταίο βήμα- Η συγκράτηση

Αφού γίνει ο χαρακτηρισμός των πολυμερών που πρόκειται να συγκολληθούν, επιλεγεί η κατάλληλη διάταξη της ένωσης και ο κατάλληλος τρόπος άσκησης της απαραίτητης για τη συγκόλληση πίεσης, ένα ακόμα βήμα που πρέπει να γίνει είναι η συγκράτηση για κάποιο χρονικό διάστημα της διάταξης ώστε να στερεοποιηθεί το υλικό στο σημείο της συγκόλλησης. Εφόσον η συγκόλληση γίνει και απενεργοποιήσουμε το laser το δείγμα θα είναι ακόμα ζεστό. Εάν σταματήσουμε σε εκείνο το σημείο την εφαρμογή της πίεσης η ποιότητα της ένωσης δεν θα είναι καλή και αυτό γιατί τα πολυμερή δεν θα έχουν τον κατάλληλο χρόνο για να ψυχθούν. Έτσι είναι πολύ σημαντικό για την κόλληση να παραμείνει η εφαρμογή της πίεσης για κάποιο χρονικό διάστημα (π.χ. 10-60 sec) μετά το τέλος της διαδικασίας. Ο επιπλέον αυτός χρόνος εξαρτάται από την έκταση και το σχήμα της συγκόλλησης. Υπάρχουν και κάποιοι βοηθητικοί τρόποι που μπορούν να επιταχύνουν το κύκλο ψύξης των πλαστικών, όπως η προσθήκη κρύου αέρα στο σημείο της συγκόλλησης. Η ψύξη των τεμαχίων δεν πρέπει να γίνει και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα γιατί αυτό θα δημιουργήσει επιπλέον προβλήματα.

Αφού γίνουν όλα τα βήματα που αναφέρθηκαν σε αυτό το υποκεφάλαιο (6.2.) θα έχει ολοκληρωθεί η ένωση των δειγμάτων στο σωστό σημείο και ανάλογα με την διάταξη συγκόλλησης που είχε επιλεγεί η αντοχή μιας σωστής συγκόλλησης πρέπει να συναγωνίζεται σε αντοχές το αρχικό υλικό.

### 6.3 Laser κατάλληλα για συγκολλήσεις πλαστικών με διερχόμενη ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία που παράγεται από τα Nd:YAG lasers και τα lasers διόδων απορροφάται λιγότερο έντονα από τα πλαστικά και έτσι αυτού του τύπου τα lasers είναι κατάλληλα για αποδοτική συγκόλληση μόνο με τη μέθοδο της διερχόμενης ακτινοβολίας laser. Σε αυτού του τύπου την συγκόλληση έχουμε αναφερθεί από την αρχή του κεφαλαίου και αυτού του τύπου η συγκόλληση είναι αντικείμενο του πειραματικού μέρους αυτής της εργασίας. Κατά την μέθοδο αυτή το ένα τεμάχιο πολυμερούς θα πρέπει να επιτρέπει τη διέλευση της δέσμης του laser και το άλλο να την απορροφά για να διασφαλιστεί ότι η εναπόθεση ενέργειας του laser θα εντοπισθεί στο σημείο της συγκόλλησης. Εναλλακτικά μια αδιαφανής επιφάνεια ή κάποιο άλλο υλικό πρόσμιξης μπορεί να τοποθετηθεί ανάμεσα στα δυο πλαστικά και στο σημείο της ένωσης ώστε να συγκολληθούν δυο πλαστικά που επιτρέπουν τη διέλευση στη δέσμη του laser.

### 6.3.1. Συγκόλληση με διερχόμενη ακτινοβολία laser - Nd:YAG laser

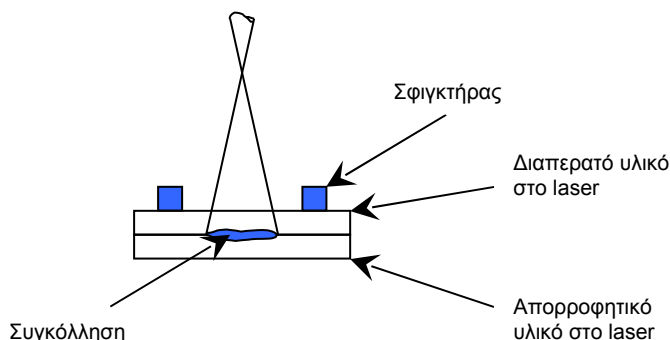
Το Nd:YAG laser είναι ένα καλά καθιερωμένο εργαλείο για την επεξεργασία υλικών και οι πρόσφατες εξελίξεις έχουν οδηγήσει στην αύξηση της διαθέσιμης ισχύς τους σε ισχύ άνω των 6 KW και έχουν μειώσει το φυσικό τους μέγεθος. Γενικά, η δέσμη από ένα Nd:YAG laser απορροφάται λιγότερο εύκολα στα χωρίς χρωστικές ουσίες πλαστικά από ότι το  $CO_2$  laser. Ο βαθμός της απορρόφησης της ενέργειας στο μήκος κύματος του Nd:YAG laser (1.064  $\mu m$ , 1.2 eV) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη παρουσία των πρόσθετων ουσιών στα πλαστικά. Εάν δεν υπάρχουν αυτές οι ουσίες στο υλικό, η δέσμη του laser θα διεισδύσει τουλάχιστον μερικά εκατοστά στο υλικό. Ο συντελεστής απορρόφησης μπορεί να αυξηθεί μέσω της προσθήκης ουσιών όπως οι χρωστικές και οι πληρωτικές ουσίες οι οποίες απορροφούν σε αυτά τα μήκη κύματος και προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας ή σκεδάζουν την ακτινοβολία για πιο αποτελεσματική συνολική απορρόφηση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το laser Nd:YAG μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την θερμοκρασία ορισμένων πλαστικών σε βάθος μερικών χιλιοστών (για πλαστικά χωρίς πρόσθετες ουσίες) ή να αυξήσει την θερμοκρασία σε μικρό βάθος σε κάποια υλικά με μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης (πλαστικά που περιέχουν τις κατάλληλες πρόσθετες ουσίες). Η δέσμη του laser Nd:YAG μπορεί να μεταδοθεί μέσω συμβατικών οπτικών ινών σε αντίθεση με τη δέσμη του  $CO_2$  laser επιτρέποντας την εύκολη και ευέλικτη χρησιμοποίηση του με ρομποτική κίνηση ή με κάποια ατσάλινη βάση.

### 6.3.2. Συγκόλληση με διερχόμενη ακτινοβολία laser - Διοδικά laser

Υψηλής ισχύος διοδικά laser (>100 W) είναι διαθέσιμα από το 1997. Αυτήν την περίοδο είναι διαθέσιμα σε ισχύ μέχρι 6 KW και οι τιμές τους είναι ανταγωνιστικές συγκρινόμενες με τα laser Nd:YAG και  $CO_2$ . Η παραγόμενη δέσμη των διοδικών laser είναι ενεργειακά πολύ πιο αποδοτική (περίπου 30%) από τα laser  $CO_2$  (περίπου 10%) και Nd:YAG (περίπου 3%). Η αλληλεπίδραση των διοδικών laser με τα πλαστικά εφαρμόζοντας την διάταξη επικάλυψης είναι παρόμοια με τα laser Nd:YAG. Η δέσμη από ένα διοδικό laser έχει τυπικά ορθογώνια μορφή, η οποία ενώ είναι ευνοϊκή σε κάποιες εφαρμογές, περιορίζει το ελάχιστο σημείο εστίασης και τη μέγιστη διαθέσιμη πυκνότητα ισχύος και επίσης δυσχεραίνει την μετάδοση μεγάλης ισχύος μέσω απλής οπτικής ίνας. Τα διοδικά laser είναι μικρά σε μέγεθος και

ελαφριά έτσι ώστε εύκολα να στερεώνονται σε ειδικές βάσεις ή ρομποτικές διατάξεις για να υλοποιούν πολύπλοκες επεξεργασίες.



Εικόνα 6.7. Σχηματικό διάγραμμα συγκόλλησης με διερχόμενη ακτινοβολία laser.

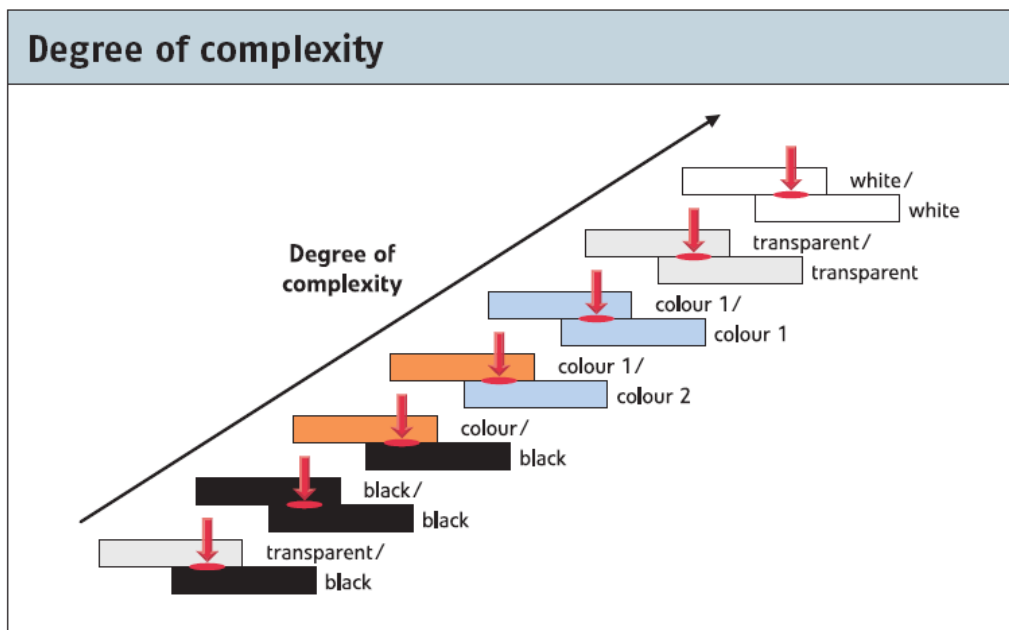
#### **6.4. Η χρήση πρόσθετων απορροφητικών χρωστικών**

Όπως έχουμε αναφέρει σε αυτό το κεφάλαιο αλλά και στο τέταρτο κεφάλαιο, η χρήση πρόσθετων ουσιών βελτιώνει τις ιδιότητες των υλικών και συμβάλλει στην παραγωγή προϊόντων με αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά. Η συγκόλληση με laser είναι μια οπτική διαδικασία. Έτσι οι ιδιότητες της συγκόλλησης εξαρτώνται σημαντικά από τους οπτικούς παραμέτρους της απορρόφησης και σκέδασης.

Τα καθαρά πλαστικά απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ηλεκτρονική διέγερση) και στην υπέρυθη περιοχή από το μήκος κύματος περίπου 1.7μm και πέρα (δονητική διέγερση). Μεταξύ αυτών των δυο περιοχών η απορρόφηση είναι σχεδόν αμελητέα. Το γεγονός ωστόσο ότι πολλά πλαστικά είναι μη διαπερατά οφείλεται στη σκέδαση του φωτός. Για τις συγκολλήσεις με laser χρησιμοποιούνται κατά προτίμηση τα διοδικά laser (808,940 nm) ή τα Nd:YAG lasers (1064 nm). Αυτά τα μήκη κύματος βρίσκονται έξω από τις δυο βασικές περιοχές απορρόφησης (IR,UV) των πλαστικών χωρίς πρόσθετες ουσίες. Σύμφωνα με αυτό η απορρόφηση της δέσμης του laser για συγκολλήσεις πρέπει να ενισχυθεί με την προσθήκη των πρόσθετων ουσιών. Η συγκέντρωση αυτών των ουσιών μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε η να επιτύχουμε την επιθυμητή ποσότητα απορρόφησης του υλικού για τη διαδικασία της συγκόλλησης με laser ή με άλλα λόγια τη μετατροπή της ενέργειας του laser σε θερμότητα όχι όμως στην επιφάνεια του υλικού αλλά σε ένα βάθος από 0.1 μέχρι 1 mm μέσα στο υλικό.

Κατάλληλες πρόσθετες ουσίες για χρήση σαν απορροφητές του laser είναι ο μαύρος άνθρακας (carbon black), οι χρωματιστές χρωστικές (colour pigments), οι βαφές (dyes) και κάποιες ειδικές χρωστικές για laser (special laser pigments). Γενικά όμως, γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ της καλής οπτικής εμφάνισης και τις λειτουργικότητας με στόχο την καλύτερη ικανότητα συγκόλλησης του υλικού.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι διάφοροι συνδυασμοί με τη διάταξη επικάλυψης καθώς και ο βαθμός πολυπλοκότητας τους.



Εικόνα 6.8. Διάφοροι χρωματικοί συνδυασμοί με διάταξη επικάλυψης.

Εκτός από την απορρόφηση, η ιδιότητα της σκέδασης του φωτός των πλαστικών παίζει σημαντικό ρόλο. Η σκέδαση της δέσμης έχει ως αποτέλεσμα το άνοιγμα της εστιασμένης δέσμης του laser και σε εξαιρετικές περιπτώσεις την έξοδο της διασκορπισμένης δέσμης από το σώμα του πλαστικού σε άλλες κατευθύνσεις. Η αιτία της σκέδασης μπορεί να είναι κάποια κρυσταλλικά συστατικά στο σώμα του πλαστικού ή η διαφορετική μορφολογία ή το μέγεθος των πλαστικών. Ακόμα και οι πρόσθετες ουσίες όπως τα πληρωτικά υλικά (π.χ. ίνες γυαλιού) και οι επιβραδυντές ανάφλεξης (π.χ. φωσφόρος, αλογόνα) συνεισφέρουν στην αύξηση της σκέδασης σε κανονικές συγκεντρώσεις.

Κατά τη διαδικασία της προσθήκης των χρωστικών, ειδικά σε πλαστικά που σκεδάζουν την ακτινοβολία, η λανθασμένη επιλογή της κατάλληλης χρωστικής μπορεί να κάνει το πλαστικό τελείως αδιαφανές. Με την σωστή επιλογή όμως της χρωστικής και τη σωστή συγκέντρωση για το πλαστικό επικάλυψης είναι εφικτό να επιτευχθεί μια κατάσταση κατά την οποία η διέλευση της δέσμης επηρεάζεται πολύ λίγο ή και καθόλου. Σε περίπτωση που το πλαστικό επικάλυψης σκεδάζει τη δέσμη αισθητά τότε η πυκνότητα ισχύος στο σημείο της συγκόλλησης είναι σημαντικά μειωμένη και αυτό σημαίνει ότι απαιτείται περισσότερη ισχύς για την επίτευξη της συγκόλλησης και ότι το εύρος του ίχνους στο σημείο της συγκόλλησης είναι μεγαλύτερο.

Η μαύρη καμπύλη στην εικόνα παρακάτω είναι η απορρόφηση που προκύπτει με την προσθήκη συνηθισμένων ουσιών που βοηθούν στο να αυξηθεί η ικανότητα συγκόλλησης των πλαστικών στα κατάλληλα μήκη κύματος laser. Η μπλε καμπύλη είναι η απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα πλαστικά χωρίς προσθήκες και μπορούμε να δούμε ότι η απορρόφηση των πλαστικών στην ορατή και κοντινή υπέρυθη περιοχή είναι φτωχή. Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

### 7.1. Εισαγωγή στην πειραματική εργασία

Αρχικά πριν γίνει η ανάλυση των εργαστηριακών διατάξεων και των πειραμάτων πρέπει να γίνει αναφορά στο laser που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση των συγκολλήσεων, στα δείγματα που πρόκειται να συγκολληθούν και στην διάταξη που έχει επιλεγεί για την υλοποίηση των συγκολλήσεων των δειγμάτων μας.

Το laser που χρησιμοποιήθηκε είναι στερεάς κατάστασης Nd:YAG σε ελεύθερη λειτουργία, αντλούμενο από λυχνία εκκένωσης με μήκος κύματος στο κοντινό υπέρυθρο στα 1064 nm. Σε αυτό το μήκος κύματος, η απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα πλαστικά είναι αμελητέα και γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή σε πολυμερή υλικά με την προσθήκη χρωστικών απορροφητικών ουσιών ώστε να αυξηθεί η ικανότητα συγκόλλησης των δειγμάτων. Στην εικόνα 7.1. φαίνεται το laser Nd:YAG laser που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα. Αναλυτικότερες πληροφορίες για το Nd:YAG laser δίδονται στο κεφάλαιο 3.

Τα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι φύλλα πολυαιθυλενίου (PE) τα οποία έχουμε προμηθευτεί από την κατασκευάστρια εταιρία **PLASTIKA KRITIS**. Τα φύλλα πολυαιθυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα έχουν διαφορετικό πάχος και διαφορετικές πρόσθετες ουσίες ώστε να διερευνηθούν οι κατάλληλες συνθήκες για την υλοποίηση συγκολλήσεων σε λεπτά φύλλα πολυαιθυλενίου αλλά και σε φύλλα με μεγαλύτερο πάχος.

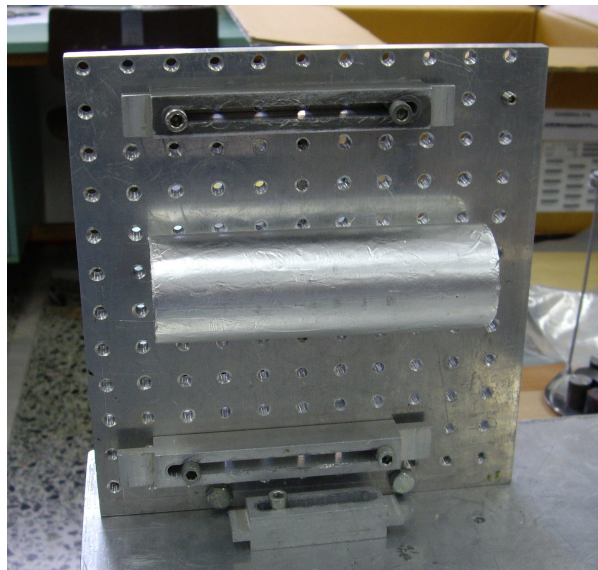


Εικόνα 7.1. Το Nd:YAG laser που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα.

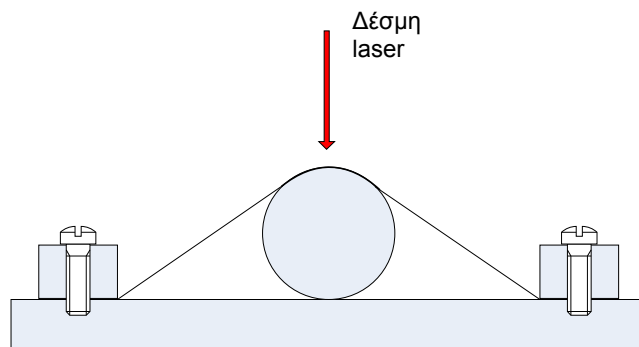
Η διάταξη συγκόλλησης που εφαρμόστηκε στην εργασία αυτή είναι η διάταξη αλληλοεπικάλυψης, κατά την οποία το ένα φύλλο τοποθετείται επάνω από το άλλο. Το πλαστικό κομμάτι που τοποθετείται από επάνω πρέπει να είναι διαπερατό από την ακτινοβολία του laser ενώ το κομμάτι που θα βρίσκεται από κάτω πρέπει να απορροφά την ακτινοβολία του laser. Αυτό επιφέρει την αύξηση της θερμοκρασίας στο πλαστικό και στην συνέχεια το τοπικό λιώσιμο στο σημείο της έκθεσης που ουσιαστικά οδηγεί στη συγκόλληση.

### **7.2. Ανάλυση της πειραματικής διάταξης συγκράτησης-πίεσης των πολυμερών υλικών.**

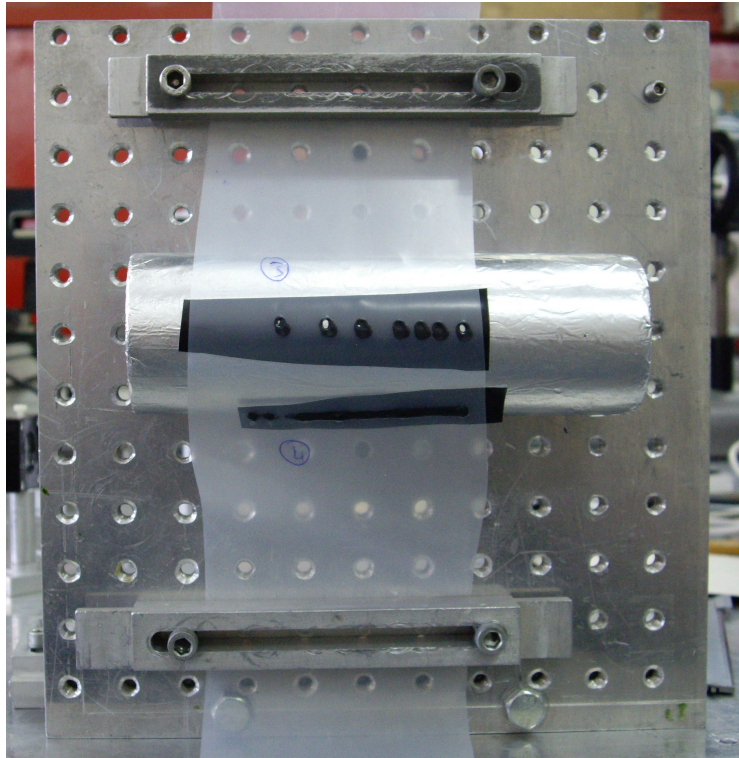
Η πειραματική εργασία χωρίζεται τυπικά σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος έχει να κάνει με συγκολλήσεις φύλλων πλαστικού με μικρό πάχος δηλαδή με εφαρμογές συγκολλήσεων «φιλμ» και το δεύτερο με συγκολλήσεις φύλλων πλαστικού με μεγαλύτερο πάχος. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις συγκολλήσεις λεπτών φύλλων πλαστικού φαίνεται στην εικόνα 7.2. και αποτελείται από μια διάτρητη σταθερή βάση, ένα σωλήνα αλουμινίου και δυο σφικτήρες, οι οποίοι συγκρατούν τα φύλλα των πλαστικών σε συνδυασμό με τον σωλήνα τεντωμένα ώστε να ασκείται επαρκής πίεση μεταξύ των δυο φύλλων για να επιτευχθεί σωστή συγκόλληση. Στην εικόνα 7.3. φαίνεται ένα σχέδιο της διάταξης.



Εικόνα 7.2. Πειραματική διάταξη για συγκολλήσεις πλαστικών.



Εικόνα 7.3. Σχέδιο πλάγιας όψης της πειραματικής διάταξης.

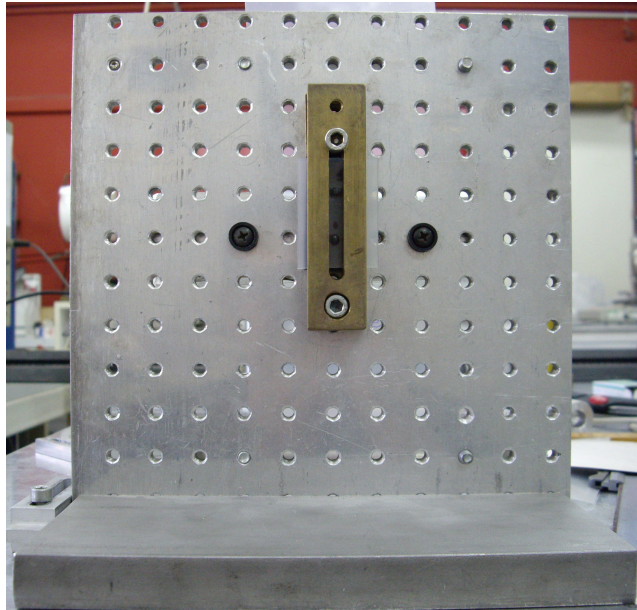


Εικόνα 7.4. Διάταξη συγκολλήσεων πλαστικών φιλμ.

Τα παχύτερα φύλλα πλαστικού δεν είναι δυνατό να συγκολληθούν με τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τα λεπτά φύλλα πλαστικού και γι' αυτό θα χρησιμοποιηθεί εδώ μια άλλη διάταξη. Αυτό συμβαίνει γιατί τα παχύτερα φύλλα δεν είναι εύκολα στο χειρισμό και έτσι η εφαρμογή της πίεσης που είναι απαραίτητη για την υλοποίηση της συγκόλλησης πρέπει να γίνει με διαφορετικό τρόπο. Στη παρούσα εργασία η εφαρμογή της πίεσης για τα πλαστικά με μεγάλο πάχος έχει γίνει με τη χρήση δυο περιμετρικών σφικτήρων. Τα πλαστικά δείγματα τοποθετούνται ανάμεσα από τους δυο σφικτήρες και χρησιμοποιώντας βίδες εφαρμόζεται η κατάλληλη πίεση για την συγκόλληση. Η δέσμη του laser εστιάζεται στην ανοικτή περιοχή των δυο περιμετρικών σφικτήρων όπου τα πλαστικά είναι εκτεθειμένα και έτσι επιλέγοντας της κατάλληλες συνθήκες μπορούμε να συγκρατήσουμε και να συγκολλήσουμε φύλλα πλαστικού με μεγαλύτερο πάχος.



Εικόνα 7.5. Διάταξη συγκράτησης-συγκόλλησης παχύτερων φύλλων πλαστικού.



Εικόνα 7.6. Διάταξη συγκολλήσεων παχύτερων φύλλων πλαστικού.

### **7.3. Υλοποίηση Πειραμάτων συγκόλλησης πολυμερών με laser**

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα γίνεται ένας τυπικός διαχωρισμός στην πειραματική διαδικασία. Αυτός ο διαχωρισμός αναφέρεται στις συγκολλήσεις πλαστικών με μικρό πάχος ή πλαστικών με μεγαλύτερο πάχος.

#### **7.3.1 Συγκολλήσεις πλαστικών με μικρό πάχος**

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων με φιλμ πολυαιθυλενίου. Στην προσπάθεια να ανιχνεύσουμε τις ιδανικές συνθήκες για τις συγκολλήσεις των πλαστικών φιλμ έγιναν διάφοροι συνδυασμοί με τις συνθήκες λειτουργίας του laser αλλά και με διάφορους τύπους πλαστικών φιλμ.

- Αρχικά έγιναν πειράματα συγκόλλησης με διαφανές πολυαιθυλένιο σαν πλαστικό επικάλυψης (άνω στρώμα) και μαύρο φιλμ πολυαιθυλενίου σαν υπόστρωμα που απορροφά την ακτινοβολία του laser. (Μέρος πρώτο)
- Στην συνέχεια έγιναν πειράματα με δυο φύλλα πολυαιθυλενίου τα οποία κανονικά δεν απορροφούν την ακτινοβολία του συγκεκριμένου τύπου laser. Γι' αυτό χρησιμοποιήσαμε χρωστικές ουσίες στην διεπαφή των πλαστικών ώστε να προκαλέσουν την απορρόφηση της ακτινοβολίας του laser και σαν επακόλουθο αυτής να αυξηθεί η θερμοκρασία και να λιώσουν τοπικά τα υλικά στην διεπαφή. (Μέρος δεύτερο)
- Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές για σημειακή συγκόλληση με σκοπό τα αποτελέσματα αυτής να χρησιμοποιηθούν για επιμήκη συγκόλληση του πλαστικού (συρραφή). Σε αυτή τη φάση χρησιμοποιήθηκε σαν πλαστικό φύλλο επικάλυψης (άνω στρώμα) διαφανές πολυαιθυλένιο και σαν υπόστρωμα, η μαύρη πλευρά δίχρωμου (ασπρόμαυρου-διστρωματικού) απορροφητικού φιλμ πολυαιθυλενίου. Σε αυτά τα στάδια μεταβάλλαμε τις συνθήκες του laser (συχνότητα παλμών και τάση λειτουργίας), ώστε να

εντοπίσουμε τις ιδανικότερες συνθήκες για την επίτευξη συγκολλήσεων.  
(Μέρος τρίτο)

Αρχικά πριν την υλοποίηση των πειραμάτων, έγινε μέτρηση της ενέργειας του laser Nd:YAG σε ελεύθερη λειτουργία με κεφαλή ενεργομέτρου και παλμογράφο. Με τάση τροφοδοσίας  $U = 492 \text{ Volt}$ , συχνότητα  $f = 1 \text{ Hz}$  μετρήσαμε στον παλμογράφο παλμό σήματος ενέργειας  $4,5 \text{ div}$ . Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήσαμε έχει μια χαρακτηριστική τιμή μετατροπής σήματος προς ενέργεια ίση με  $6,43 \text{ mV/mJ}$ . Έτσι, η μέτρηση στον παλμογράφο παλμού ηλεκτρικού σήματος ίσο με  $4,5 \text{ div}$  αντιστοιχεί σε  $4,5 \times 200 \text{ mV/div} = 900 \text{ mV}$ . Η τιμή της ενέργειας που αντιστοιχεί σε αυτήν τάση

$$\text{είναι : } \frac{900 \text{ mV}}{6.43 \frac{\text{mV}}{\text{mJ}}} = 139.96 \text{ mJ} \approx 140 \text{ mJ}$$

Στην συνέχεια έγινε μια τελευταία μέτρηση της ενέργειας των παλμών με τάση τροφοδοσίας  $U = 492 \text{ Volt}$  και συχνότητα  $f = 4.3 \text{ Hz}$  όπου εκεί καταγράφηκε στον παλμογράφο παλμός ηλεκτρικού σήματος  $4.8 \text{ div} \times 200 \text{ mV/div} = 960 \text{ mV}$ . Οπότε η

$$\text{ενέργεια που προκύπτει είναι : } \frac{960 \text{ mV}}{6.43 \frac{\text{mV}}{\text{mJ}}} = 149.3 \text{ mJ}$$

Η μέτρηση της ενέργειας των παλμών του laser γίνεται με παλμογράφο και κεφαλή ενεργομέτρου η οποία για να μην υποστεί φθορά ή και καταστροφή, χρησιμοποιούμε μπροστά της έναν αποκλίνοντα φακό. Η παρουσία του φακού δημιουργεί κάποιες οπτικές απώλειες στην δέσμη του laser και καθώς κατά τη πειραματική διαδικασία δεν θα χρησιμοποιηθεί ο φακός, η ενέργεια των παλμών που εκτίθενται τα πλαστικά δείγματα είναι προσαυξημένη κατά μια τιμή ίση με τις οπτικές απώλειες του φακού (δηλαδή περίπου 10%, το 10% του  $149.3 \text{ mJ}$  είναι  $14.93 \text{ mJ}$ ) που σημαίνει ότι η ενέργεια παλμών είναι ίση με  $164 \text{ mJ}$ .

Στην συνέχεια, έγινε μέτρηση της διαμέτρου της δέσμης του laser από το ίχνος που αφήνει η παρατεταμένη επίδραση του πάνω στα πλαστικά δείγματα. Η μέτρηση της διαμέτρου της δέσμης του laser είναι χρήσιμη ώστε να υπολογιστεί η πυκνότητα ή η ροή ενέργειας σε κάθε πείραμα που θα πραγματοποιηθεί. Η πυκνότητα της ενέργειας έχει πολύ μεγάλη σημασία για τον σωστό προσδιορισμό των κατάλληλων συνθηκών συγκόλλησης. Η μορφή του ίχνους των συγκολλήσεων είναι ελλειπτικού σχήματος και έτσι μετρώντας της διαστάσεις του ίχνους, έχουμε (πλάτος  $\alpha = 4.5 \text{ mm}$ ), (ύψος  $\beta = 5.5 \text{ mm}$ ). Έτσι η συνολική επιφάνεια της συγκόλλησης που

$$\text{προκύπτει από το ίχνος είναι: } A = \pi \times \frac{\alpha \times \beta}{4} = \pi \times \frac{4.5 \times 5.5}{4} = 19.44 \text{ mm}^2$$

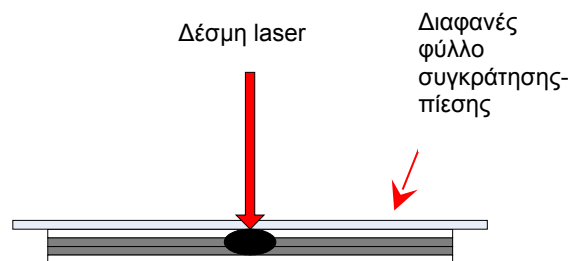
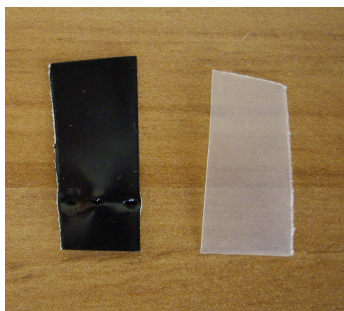
7.7. της επόμενης σελίδας φαίνονται σε σύγκριση και με χάρακα οι διαστάσεις συγκόλλησης.



Εικόνα 7.7. Απεικόνιση μεγέθους του ίχνους των συγκολλήσεων.

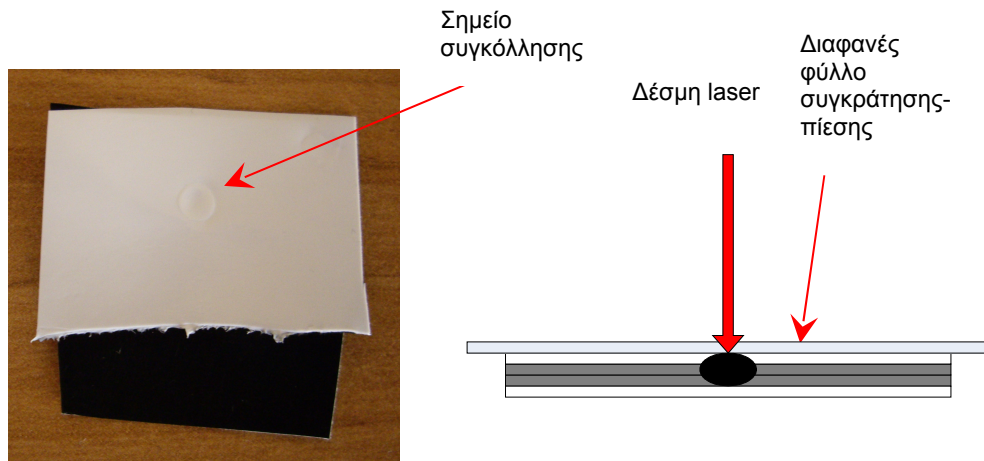
### Συγκολλήσεις με λεπτά φύλλα PE (ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ)

- Το πρώτο πείραμα το οποίο μπορεί να θεωρηθεί και διερευνητικό έγινε με φύλλα πολυαιθυλενίου πάχους  $d = 100 \mu\text{m}$ . Το πλαστικό επικάλυψης είναι διαφανές πολυαιθυλένιο τύπου PE (2701 25 hals) και το απορροφητικό υλικό είναι η μαύρη πλευρά δίχρωμου (ασπρόμαυρου) φύλλου πολυαιθυλενίου. Η απόσταση των δειγμάτων από την κεφαλή του laser δηλαδή την πηγή της ακτινοβολίας είναι 68,5 cm και δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος φακός εστίασης. Η τάση τροφοδοσίας του laser τέθηκε στα  $U = 492 \text{ Volts}$  που αντιστοιχεί σε ενέργεια παλμών 164 mJ και η συχνότητα παλμών του laser ρυθμίστηκε στα  $f = 1 \text{ Hz}$ . Τα δείγματα εκτέθηκαν για 15 παλμούς που αντιστοιχούν σε συνολική ενέργεια 2460 mJ. Η επιφανειακή πυκνότητα(ροή) ενέργειας σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με  $126,54 \text{ mJ}/\text{mm}^2$ . Η επιλογή της συχνότητας σε αυτή την τιμή γίνεται για να έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε αρχικά τα αποτελέσματα στα πλαστικά δείγματα με χαμηλή συχνότητα και στην συνέχεια σταδιακά να αυξήσουμε τις τιμές της, ώστε να εντοπισθούν οι κατάλληλες τιμές της μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων. Με αυτές τις αρχικές συνθήκες πάντως η συγκόλληση που υλοποιήθηκε είναι μηχανικά ασθενής και το ίχνος από την ακτινοβολία ανομοιόμορφο. Σύμφωνα με αυτό πρέπει να αυξήσουμε τις τιμές της συχνότητας ώστε να μην ψύχεται η συγκολλούμενη περιοχή στο χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών παλμών, και τα θερμικά αποτελέσματα να είναι αθροιστικά. Τα δείγματα που χρησιμοποιήσαμε φαίνονται στην εικόνα της επόμενης σελίδας 7.7..



Εικόνα 7.7. Φύλλα πολυαιθυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

- Στην συνέχεια διατηρώντας τα ίδια δείγματα μεταβάλαμε τις συνθήκες του laser. Αυξήσαμε τη συχνότητα λειτουργίας του laser σε  $f = 20$  Hz και σε αυτή τη δοκιμή εκθέσαμε τα δείγματα στην ακτινοβολία του laser για περίπου 25 παλμούς. Η συνολική ενέργεια είναι ίση με 4100 mJ και η συνολική πυκνότητα (ροή) ενέργειας που προκύπτει είναι ίση με  $210,9 \text{ mJ/mm}^2$ . Τα αποτελέσματα από αυτή την συγκόλληση είναι εμφανώς καλύτερα από την προηγούμενη συγκόλληση καθώς σε αυτό το πείραμα έχει αυξηθεί η τιμή της συχνότητας και κατ' επέκταση η συνολική παλμοδότηση και η ροή ενέργειας. Η τυπική διάρκεια μεταξύ των παλμών εξόδου του laser είναι  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20} = 50 \text{ msec}$ , που δεν επιτρέπει στην διεπαφή να ψυχθεί στο ενδιάμεσο διάστημα αυτό, αφού πειραματικά αποδείχθηκε ότι η ψύξη και πήξη του συγκολλούμενου πλαστικού υλικού επέρχεται σε χρόνους της τάξης του sec.
- Το επόμενο πείραμα έγινε με δυο δίχρωμα φύλλα πολυαιθυλενίου (ασπρόμαυρα) πάχους  $d = 100 \mu\text{m}$  τα οποία εφάπτονταν εσωτερικά με τις μαύρες επιφάνειες τους ενώ οι λευκές επιφάνειες βρίσκονται εξωτερικά. Οι λευκές επιφάνειες που βρίσκονται εξωτερικά δεν απορροφούν έντονα την ακτινοβολία και καθώς η δέσμη της διαπερνά απορροφάται έντονα από τις εφαπτόμενες μαύρες πλαστικές επιφάνειες όπου τελικά θα προκληθεί η τήξη του υλικού και κατά συνέπεια η συγκόλληση τους. Η συγκράτηση των δειγμάτων λόγω του μικρού τους μεγέθους γίνεται με τρίτο εξωτερικό διαφανές φύλλο πολυαιθυλενίου τύπου PE (2701 25 hals) με πάχος  $d = 100 \mu\text{m}$  το οποίο δεν απορροφά την ακτινοβολία του laser. Η συγκόλληση αυτή με έναν οπτικό έλεγχο κρίνεται πολύ καλή χωρίς ιδιαίτερες γεωμετρικές ή χημικές αλλοιώσεις στο εξωτερικό μέρος των πλαστικών αλλά είναι δύσκολο τα αποτελέσματα να γίνουν εμφανώς ορατά στην εικόνα που ακολουθεί επειδή η λευκή εξωτερική επιφάνεια διαχέει το φως. Εξετάζοντας και την πίσω πλευρά των δειγμάτων φαίνεται ότι τα δυο εφαπτόμενα στρώματα στο σημείο της συγκόλλησης έχουν αναμιχθεί, κάτι που σημαίνει ότι η συγκόλληση είναι σταθερή. Οι συνθήκες λειτουργίας του laser είναι σε τάση  $U = 492 \text{ Volts}$ , συχνότητα  $f = 20 \text{ Hz}$  για περίπου 60 παλμούς που αντιστοιχούν σε συνολική ενέργεια 9840 mJ. Η ροή ενέργειας που προκύπτει είναι ίση με  $506,2 \text{ mJ/mm}^2$ . Πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι η παρουσία των λευκών διαχυτικών επιφανειών καθιστά την συγκόλληση με laser δυσκολότερη σε σχέση με τα διαφανή πολυμερή διότι η ακτινοβολία διαχέεται και δεν φθάνει 100% (ούτε συγκεντρωμένη) στο σημείο πρόσπτωσης. Στην εικόνα 7.8. φαίνονται τα δείγματα που χρησιμοποιήσαμε καθώς και η σημειακή συγκόλληση που επισημαίνεται με κόκκινο βέλος.

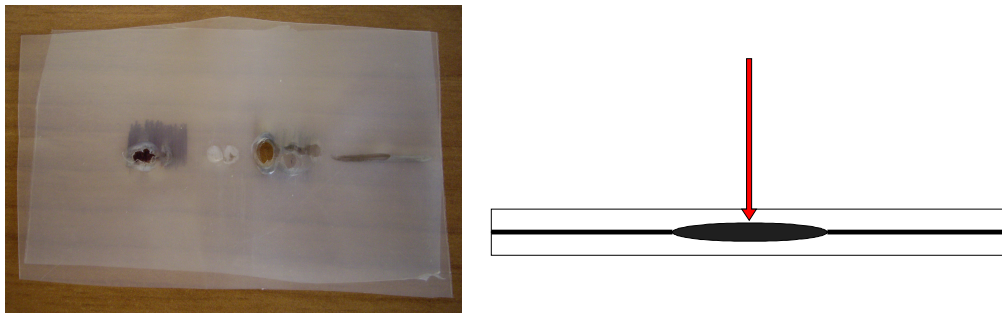


Εικόνα 7.8. Συγκόλληση με ασπρόμαυρα (διστρωματικά) φύλλα πλαστικών.

### Συγκολλήσεις με λεπτά φύλλα PE (ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ)

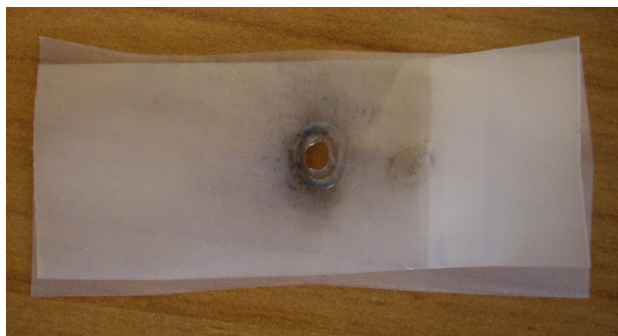
- Το πείραμα αυτό έγινε με τη χρήση δυο φύλλων πολυαιθυλενίου τύπου PE (2701 25 hals) που είναι διαπερατά από την ακτινοβολία του laser και γι' αυτό έγιναν δοκιμές με τη εισαγωγή πρόσθετων χρωστικών απορροφητικών ουσιών στην διεπαφή των πλαστικών ώστε αυτές να προκαλέσουν την απορρόφηση της ακτινοβολίας (κάτι που όπως έχουμε επαναλάβει οδηγεί στην άνοδο της θερμοκρασίας, στη τήξη των πλαστικών και στην υλοποίηση συγκολλήσεων). Οι χρωστικές ουσίες που δοκιμάσαμε σε αυτό το πείραμα ήταν μαύρη μελάνη ή γραφίτης και οι συνθήκες λειτουργίας του laser ήταν : τάση τροφοδοσίας στα  $U = 492 \text{ Volts}$  που αντιστοιχεί σε ενέργεια παλμού εξόδου  $E = 164 \text{ mJ}$  με συχνότητα  $f = 20 \text{ Hz}$  για συνολικά περίπου 60 παλμούς. Η συνολική ενέργεια που ακτινοβολήθηκαν τα πλαστικά δείγματα είναι  $9840 \text{ mJ}$  και η πυκνότητα ενέργειας σε αυτή τη δοκιμή είναι ίση με  $506,2 \text{ mJ/mm}^2$ . Με την προσθήκη της μελάνης δεν πετύχαμε πρακτικά συγκολλήσεις πράγμα που δείχνει ότι πιθανώς η συγκεκριμένη μελάνη έχει ασθενή απορρόφηση στο υπέρυθρο μήκος κύματος αλλά με την προσθήκη του γραφίτη είχαμε πολύ καλά αποτελέσματα. Παρόλο που έχουν διατηρηθεί τα πλαστικά δείγματα, έχουν παράλληλα συγκολληθεί περιφερειακά της οπής και αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρέπει να μειώσουμε την συχνότητα του laser ώστε να επιτύχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Στην εικόνα 7.9. παρακάτω φαίνονται τα δείγματα καθώς και η χρωστικές-απορροφητικές ουσίες που έχουμε προσθέσει.





Εικόνα 7.9. Συγκόλληση φύλλων πολυαιθυλενίου με προσθήκη χρωστικών ουσιών.

- Στη συνέχεια με τα ίδια δείγματα και την επίστρωση σκόνης γραφίτη μολυβιού τύπου 6B μεταβάλλαμε τις συνθήκες λειτουργίας του laser. Διατηρήσαμε την τάση τροφοδοσίας σταθερή στα  $U = 492$  Volts και μειώσαμε την συχνότητα λειτουργίας σε  $f = 8$  Hz και με χρόνο έκθεσης μετρημένο στα 8 sec δηλαδή περίπου 64 παλμούς που αντιστοιχούν σε συνολική ενέργεια 10496 mJ και πυκνότητα ενέργειας  $539,9$  mJ/mm<sup>2</sup> πετύχαμε τα αποτελέσματα της εικόνας 7.10. που ακολουθεί. Όπως φαίνεται στην εικόνα, τα πλαστικά δείγματα έχουν διατηρηθεί και για αυτό το λόγο συμπεράναμε ότι πρέπει στην συνέχεια των πειραμάτων να μειώσουμε την συχνότητα του laser ή τον χρόνο έκθεσης των δειγμάτων ή και τα δυο με αποτέλεσμα να μειωθεί η παλμοδότηση των δειγμάτων και κατά συνέπεια η συνολική ενέργεια και η πυκνότητα της ενέργειας που παίζει και τον σημαντικότερο ρόλο τελικά. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.10. της επόμενης σελίδας έχει γίνει διάτρηση των δειγμάτων πράγμα ανεπιθύμητο για την παρούσα εργασία. Κοιτώντας εκτενέστερα τα δείγματα φαίνεται ότι σε σημεία περιφερειακά της οπής έχει προκύψει συγκόλληση των πλαστικών δειγμάτων και ότι σε αυτά τα σημεία η χρωστική που χρησιμοποιήθηκε έχει ενσωματωθεί στο σώμα του υλικού, κάτι που είναι επιθυμητό για την επίτευξη σωστής συγκόλλησης.

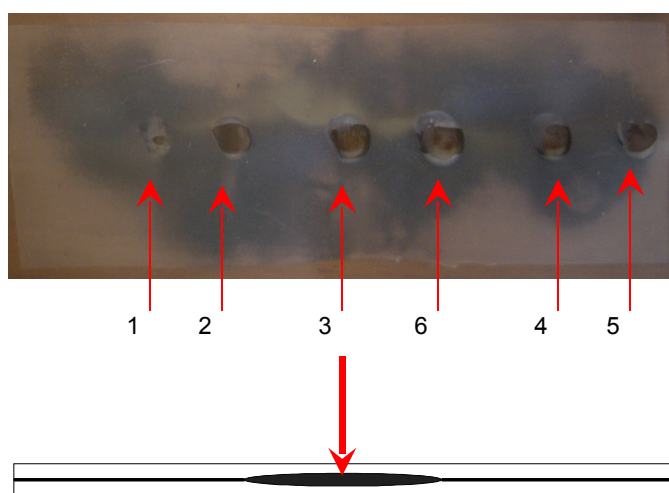


Εικόνα 7.10. Συγκόλληση με τη προσθήκη χρωστικής γραφίτη.

- Στη συνέχεια έχοντας σαν υπόδειγμα το παραπάνω πείραμα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με τα ίδια πλαστικά υλικά δηλαδή διαφανή φύλλα πολυαιθυλενίου τύπου PE (2701 25 hals) ώστε να εντοπιστούν οι καταλληλότερες συνθήκες με τη χρήση της χρωστικής γραφίτη. Οι συγκολλήσεις που υλοποιήθηκαν παρουσιάζονται στην εικόνα 7.11.

παρακάτω. Οι συνθήκες για τα πειράματα φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 7.1.



Εικόνα 7.11. Συγκολλήσεις με τη προσθήκη γραφίτη.

- Η πρώτη συγκόλληση με 25 παλμούς είναι πολύ ασθενής και δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον και έτσι αυξάνουμε τη συχνότητα στα 7.5 Hz (37 παλμοί) όπου σημειώνεται συγκόλληση και φαίνεται με τον αριθμό 2. Η συγκόλληση αυτή με ένα οπτικό έλεγχο δεν φαίνεται ιδιαίτερα ισχυρή καθώς δεν φαίνονται να έχουν αναμιχθεί τα πολυμερή στην διεπαφή τους, πράγμα που είναι απαραίτητο για να υλοποιηθεί ισχυρή συγκόλληση.
- Στην τρίτη συγκόλληση που επιχειρήσαμε, αυξήσαμε τη συχνότητα λειτουργίας του laser στα 10 Hz (50 παλμοί) και η ένωση των πλαστικών φαίνεται πολύ καλή. Τα πλαστικά υλικά έχουν λιώσει και αναμιχθεί στο σημείο της έκθεσης και κατά την στερεοποίηση τους έχουν ενωθεί, κάτι που ήταν και το ζητούμενο.
- Στο επόμενο πείραμα υπ' αριθμόν τέσσερα αλλά και στο υπ'αρ. πέντε, τα αποτελέσματα με έναν οπτικό έλεγχο φαίνονται περίπου τα ίδια. Ένας πρόχειρος μηχανικός έλεγχος δείχνει ότι έχει επέλθει καλή σύντηξη των δυο μερών, τα οποία δεν δείχνουν καμία τάση να αποκολληθούν, χωρίς να διαρρηχθεί το περιβάλλον στρώμα. Αυτό βέβαια δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλήρης έλεγχος, αλλά όπως θα αναφέρουμε και στα επόμενα υποκεφάλαια αυτή η πτυχιακή εργασία δεν μπορεί να καλύψει όλο το εύρος των σχετικών ερευνητικών θεμάτων και μελλοντικά θα μπορούσαν να γίνουν πειράματα και

τα δείγματα να υποβληθούν σε ελέγχους όπου θα μετρηθούν και θα ποσοτικοποιηθούν οι μηχανικές αντοχές των συγκολλήσεων που έχουν υλοποιηθεί. Τα δείγματα έχουν λιώσει στο σημείο εφαρμογής της δέσμης laser και κατά την στερεοποίηση τους έχουν ενωθεί πολύ καλά, κάτι που φαίνεται και στην εικόνα 8.5.-4,5. Η συγκόλληση υπ' αριθμόν 5 φαίνεται να είναι η καλύτερη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πειράματα διότι με έναν λεπτομερή έλεγχο του δείγματος φαίνεται ότι αυτό έχει συγκολληθεί σε όλη την έκταση του ίχνους της δέσμης και έτσι είναι η ανθεκτικότερη συγκόλληση από τις υπόλοιπες.

- Στην τελευταία συγκόλληση των δυο διαφανών υλικών αυξάνουμε την συχνότητα λειτουργίας του laser σε 15 Hz για να δούμε τα αποτελέσματα στη μάζα των πλαστικών με σχετικά αυξημένη ενέργεια κάτι που μπορούμε να το προβλέψουμε με τα δεδομένα των προηγούμενων πειραμάτων. Με αυτές τις συνθήκες και κοιτάζοντας το δείγμα λεπτομερώς διακρίνουμε ότι το δείγμα στο σημείο της συγκόλλησης είναι έτοιμο να υποστεί διάτρηση (κάτι που δεν μπορεί να φανεί στην εικόνα 8.5.-6) πράγμα που επιβεβαιώνει τα
- προαναφερθέντα. Αυτό το τελευταίο πείραμα μας επιβεβαιώνει ότι η καλύτερη συγκόλληση είναι αυτή με τον αριθμό 5 και ότι οι ιδανικότερες συνθήκες είναι εκείνες όπου πραγματοποιήθηκε αυτή, δηλαδή η απαιτούμενη πυκνότητα ενέργειας περίπου στην περιοχή των  $530mJ / mm^2$ .

### Συγκολλήσεις με λεπτά φύλλα PE (ΤΡΙΤΟ ΜΕΡΟΣ)

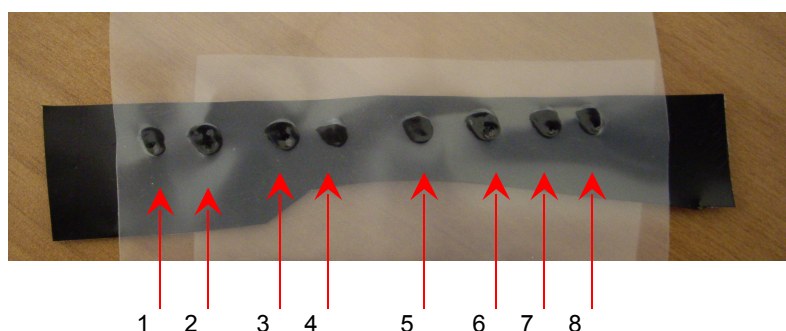
- Η επόμενη σειρά πειραμάτων έγινε με σκοπό να μας υποδείξει τις κατάλληλες συνθήκες για την υλοποίηση συγκολλήσεων κατά μήκος του πλαστικού (συρραφή) και σε αυτό το στάδιο της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήσαμε σαν πολυμερές επικάλυψης διαφανές πολυαιθυλένιο PE (2701 25 hals) με πάχος  $d = 100 \mu m$  και σαν υπόστρωμα την μαύρη πλευρά ασπρόμαυρου φύλλου πολυαιθυλενίου με πάχος  $d = 100 \mu m$ . Στο πρώτο από τη σειρά αυτή των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε τρία φύλλα πολυαιθυλενίου, δυο διαφανή (τύπου PE (2701 25 hals) με πάχος  $d = 100 \mu m$ ) που βρίσκονται εξωτερικά και στο εσωτερικό το ασπρόμαυρο φύλλο που θα απορροφήσει και τη δέσμη του laser από την μαύρη πλευρά του. Η τάση τροφοδοσίας είναι  $U = 492 \text{ Volts}$  που αντιστοιχεί σε ενέργεια παλμών  $E = 164 \text{ mJ}$ . Σε αυτό το πρώτο πείραμα, θα συγκολληθούν και τα τρία πλαστικά φύλλα καθώς η θερμότητα διαχέεται και στο διαφανές φύλλο που βρίσκεται πίσω από το διστρωματικό ασπρόμαυρο υπόστρωμα. Με αυτήν την διάταξη, ελέγχουμε καλύτερα την διάχυση της θερμότητας που επάγεται από την απορροφητική (μαύρη επιφάνεια) του διστρωματικού πλαστικού προς την λευκή επιφάνεια αλλά και προς το διαφανές πλαστικό που βρίσκεται στο πίσω μέρος. Ακόμη το τρίτο φύλλο που τοποθετείται πίσω από το απορροφητικό στρώμα χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την υψηλή θερμοκρασία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να συμβάλει ώστε η συγκόλληση να είναι πιο σταθερή. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, βλέπουμε ότι έχουν υλοποιηθεί καλές συγκολλήσεις και με τα τρία πλαστικά φύλλα πράγμα που δείχνει ότι έχει γίνει καλή διάχυση της θερμότητας και προς την λευκή επιφάνεια αλλά και προς το διαφανές πλαστικό και μάλιστα τόση, ώστε να προκαλέσει την τήξη του. Το τρίτο διαφανές πλαστικό φύλλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την σειρά πειραμάτων, δεν είναι αναγκαίο για την υλοποίηση συγκολλήσεων και χρησιμοποιείται μόνο σε αυτήν την σειρά πειραμάτων δοκιμαστικά, για να

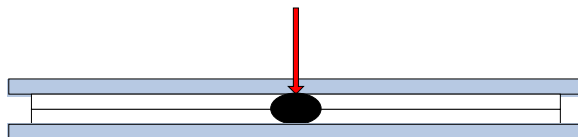
καταδείξει και την δυνατότητα ταυτόχρονης συγκόλλησης περισσότερων των δύο φύλλων πολυμερών με laser. Σε αυτή τη σειρά των πειραμάτων μεταβάλλονται η συχνότητα λειτουργίας του laser αλλά και η διάρκεια έκθεσης των δειγμάτων στην ακτινοβολία του laser. Στην εικόνα 7.12. φαίνονται οι συγκολλήσεις που επιτεύχθηκαν με συνθήκες που αναφέρονται στον πίνακα παρακάτω.

α/α	N (παλμοί)	f (Hz) (Συχνότητα)	t (sec) (Χρόνος έκθεσης)	Συνολική ενέργεια (mJ)	Ροή ενέργειας ( mJ / mm <sup>2</sup> )
1.	25	5	5	4100	211
2.	37	7.5	5	6068	312
3.	32	6.5	5	5248	270
4.	20	6.5	3	3280	169
5.	22	7.5	3	3608	186
6.	35	10	3.5	5740	295
7.	27	9	3	4428	228
8.	28	7	4	4592	236

Πίνακας 7.2.

Οι καλύτερες συγκολλήσεις με τη χρήση τριών φύλλων είναι αυτές με τους αριθμούς 4 και 5 και με συνθήκες : 20 παλμοί (6,5 Hz × 3 sec., Συνολική ενέργεια 3280mJ και πυκνότητα ενέργειας 169 mJ / mm<sup>2</sup>) και 22 παλμοί (7,5 Hz × 3 sec., Συνολική ενέργεια 3608mJ και πυκνότητα ενέργειας 186 mJ / mm<sup>2</sup>).





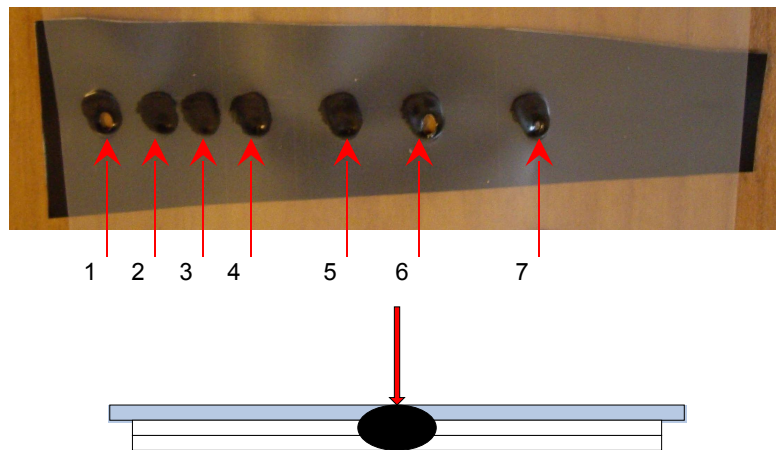
Εικόνα 7.12. Συγκολλήσεις μεταξύ τριών φύλλων πολυαιθυλενίου.

- Στο δεύτερο βήμα από τη σειρά αυτή των πειραμάτων θα πραγματοποιήσουμε βελτιστοποιημένες σημειακές συγκολλήσεις με δυο φύλλα πολυαιθυλενίου, το ένα εκ των οποίων έχει ενσωματωμένη οπτικά-απορροφητική χρωστική. Το διαπερατό από το laser πλαστικό που χρησιμοποιείται σαν φύλλο επικάλυψης

α/α	N (παλμοί)	f (Hz) (Συχνότητα)	t (sec) (Χρόνος έκθεσης)	Συνολική ενέργεια (mJ)	Ροή ενέργειας ( mJ / mm <sup>2</sup> )
1.	33	6,5	5	5412	278
2.	25	5	5	4100	211
3.	20	6,5	3	3280	169
4.	22	7,5	3	3608	186
5.	23	9	2,5	3772	194
6.	30	10	3	4920	253
7.	27	9	3	4428	228

(άνω στρώμα) είναι τύπου PE (2701 25 hals) με πάχος  $d = 100 \mu\text{m}$  και το φύλλο υπόστρωμα θα είναι η μαύρη πλευρά (δίχρωμο ασπρόμαυρο) πολυαιθυλενίου πάχους  $d = 100 \mu\text{m}$ . Η τάση τροφοδοσίας του laser είναι στα  $U = 492 \text{ Volts}$  που αντιστοιχεί σε ενέργεια παλμού εξόδου ίση με  $164 \text{ mJ}$ . Τα αποτελέσματα από αυτό το πείραμα θα χρησιμοποιηθούν για τη υλοποίηση συγκόλλησης κατά μήκος του πλαστικού (συρραφής), οι δε συνθήκες μεταβάλλονται όπως στο προηγούμενο πείραμα. Με τη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του laser και του χρόνου έκθεσης των δειγμάτων θα υλοποιηθούν σειρά συγκολλήσεων και από αυτές θα επιλεγεί η καλύτερη ώστε με τις συνθήκες που προσδιορίστηκαν να προχωρήσουμε σε συγκόλληση κατά μήκος του πλαστικού. Στο πίνακα παρακάτω φαίνονται οι συνθήκες όπου υλοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις που φαίνονται στην εικόνα 7.13..

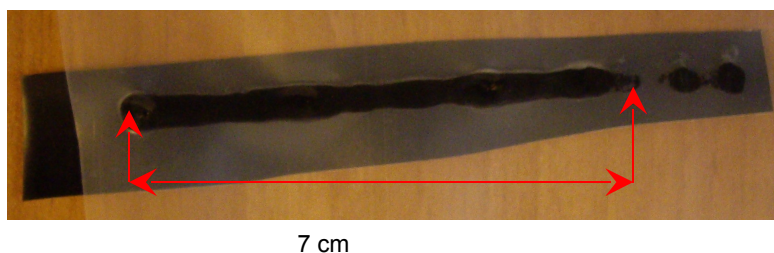
Πίνακας 7.3.



Εικόνα 7.13. Συγκολλήσεις με δυο φύλλα πολυαιθυλενίου.

- Στην πρώτη συγκόλληση το δείγμα όπως φαίνεται και στην εικόνα παραπάνω έχει υποστεί διάτρηση, κάτι που σημαίνει ότι η ενέργεια είναι πολύ αυξημένη και πρέπει να μειωθεί ή η συχνότητα λειτουργίας του laser ή ο χρόνος έκθεσης του δείγματος. Με την μείωση της συχνότητας στο δεύτερο πείραμα παρατηρούμε ότι τα πλαστικά υλικά δεν έχουν υποστεί διάτρηση και έχουν πλέον συγκολληθεί πολύ καλά. Στην συνέχεια δοκιμάζουμε να αυξήσουμε ελαφρώς την συχνότητα του laser αλλά μειώνοντας παράλληλα τον χρόνο έκθεσης του δείγματος και να διερευνήσουμε τα αποτελέσματα. Η συγκόλληση με αυτές τις συνθήκες φαίνεται πάρα πολύ καλή καθώς δεν έχει διατρηθεί το δείγμα αλλά και η οπτική εμφάνιση της συγκόλλησης είναι πολύ καλή. Στην συνέχεια υλοποιείται η συγκόλληση με τον αριθμό 4 όπου αυξάνουμε ελαφρώς την συχνότητα λειτουργίας του laser με σταθερό τον χρόνο έκθεσης του δείγματος στα 3 sec . Αυτή η συγκόλληση είναι αρκετά καλή και κοιτώντας το πίσω μέρος του δείγματος φαίνεται να είναι περισσότερο αλλοιωμένο γεωμετρικά από την προηγούμενη συγκόλληση, πράγμα που φανερώνει την πληρέστερη τήξη χωρίς όμως πάλι να έχει τρυπήσει το δείγμα. Στην επόμενη συγκόλληση με τον αριθμό 5 αυξάνουμε την συχνότητα στα 9 Hz και μειώνουμε ελαφρώς τον χρόνο έκθεσης στα 2.5 sec. Η συγκόλληση αυτή είναι επίσης πολύ καλή οπτικά έχει μεγάλη μηχανική αντοχή και παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από τα αποτελέσματα που έχουν επιτευχθεί ως αυτή τη στιγμή. Στα επόμενα δυο πειράματα με τους αριθμούς 6,7 όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.7. τα δείγματα έχουν διατρηθεί και αυτό μας καταδεικνύει ότι οι συνθήκες πλέον έχουν ξεπεράσει την βέλτιστη περιοχή των προηγούμενων πειραμάτων. Η συγκόλληση που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι αυτή με τον αριθμό 5 και με συνθήκες : 23 παλμοί ,συχνότητα  $f = 9 \text{ Hz}$  και χρόνο έκθεσης του δείγματος στα 2.5 sec με πυκνότητα ενέργειας  $194 \text{ mJ} / \text{mm}^2$ .
- Το τελευταίο πείραμα με τα λεπτά φύλλα πολυαιθυλενίου είναι η συγκόλληση κατά μήκος του πλαστικού (συρραφή). Η επίτευξη καλής συγκόλλησης έχει πολύ μεγάλη σημασία για βιομηχανικές εφαρμογές της μεθόδου. Από το προηγούμενο πείραμα επιλέγεται η καλύτερη σημειακή συγκόλληση και οι συνθήκες όπου επιτεύχθηκε η συγκόλληση αυτή θα χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουμε την συγκόλληση κατά μήκος του πλαστικού που φαίνεται στην εικόνα 7.14.. Οι συνθήκες που επιλέχθηκαν είναι: τάση τροφοδοσίας του

laser στα  $U = 492$  Volts και συχνότητα  $f = 9$  Hz με χρόνο έκθεσης τα 2.5 sec., οπότε η πυκνότητα ενέργειας στην συγκόλληση ανέρχεται σε  $194 \text{ mJ} / \text{mm}^2$ . Σύμφωνα με αυτό και για μήκος συγκόλλησης 7 εκατοστών δεχόμαστε ότι στο κάθε εκατοστό θα πρέπει να παραμείνει η δέσμη του laser για 2.5 sec., Έτσι η συνολική διάρκεια της συγκόλλησης πρέπει να διαρκέσει περίπου 18 sec (  $2.5 * 7 = 17.5$  sec.). Όπως φαίνεται και από την εικόνα 7.14. παρακάτω, το αποτέλεσμα της συρραφής των πλαστικών φύλλων με laser είναι πολύ καλό και συμφωνεί με τους υπολογισμούς.



Εικόνα 7.14. Συγκόλληση-συρραφή κατά μήκος του πλαστικού.

Η παραπάνω συγκόλληση όπως φαίνεται και από την εικόνα είναι πάρα πολύ καλή και παρατηρώντας τα πλαστικά δείγματα βγάζουμε το συμπέρασμα ότι οι υπολογισμοί που έγιναν είναι σύμφωνοι με το αποτέλεσμα. Τα δείγματα δεν έχουν τρυπήσει σε κανένα σημείο και δεν έχουν υποστεί ιδιαίτερες γεωμετρικές παραμορφώσεις, κάτι που πιθανότατα σημαίνει ότι είναι δυνατόν να επιτευχθούν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα με επιπλέον πειράματα, βελτιστοποιώντας την διάταξη συγκόλλησης, τον ρυθμό μετακίνησης της δέσμης του laser αλλά και το ίδιο το laser καθώς η δέσμη του προς το παρόν δεν είναι ομοιόμορφη. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν ιδιαίτερη σημασία, αν αναλογιστούμε ότι το Nd:YAG laser δεν είναι το εξ' ορισμού κατάλληλο laser για συγκολλήσεις πλαστικών, ενώ στην εργασία αυτή καταδείχθηκε ότι με την κατάλληλη μεθοδολογία και τις κατάλληλες συνθήκες μπορεί να δώσει πολύ καλά αποτελέσματα.

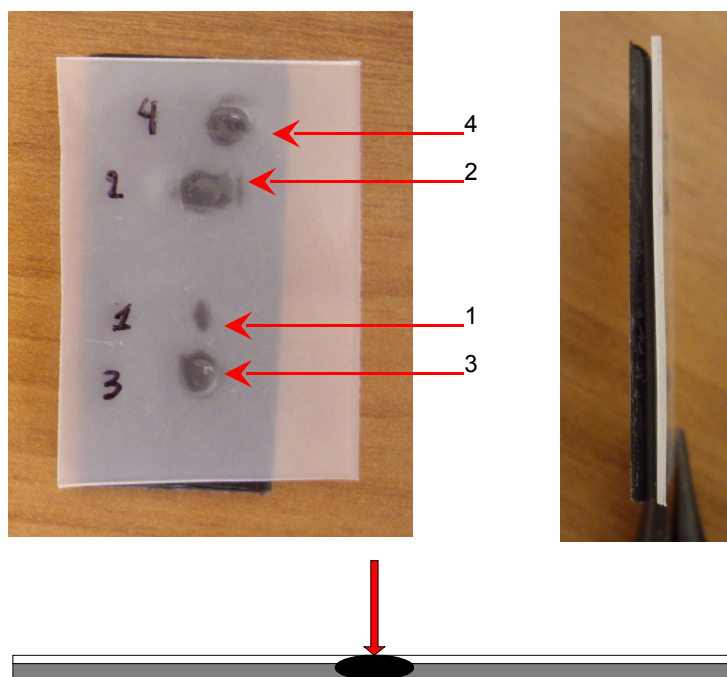
### 7.3.2. Συγκολλήσεις πλαστικών με μεγάλο πάχος.

#### Συγκολλήσεις με παχύτερα φύλλα PE (ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ).

Σε αυτό το στάδιο της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις φύλλων πολυαιθυλενίου με μεγαλύτερο πάχος από ότι στα προηγούμενα πειράματα. Για την υλοποίηση των πειραμάτων δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος φακός εστίασης ενώ έγιναν μεταβολές στις συνθήκες λειτουργίας του laser αλλά και στο χρόνο έκθεσης των δειγμάτων.

Η διάταξη για τις συγκολλήσεις των παχύτερων πλαστικών είναι απλούστερη από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για της συγκολλήσεις των λεπτών φύλλων πλαστικού καθώς αποτελείται από δυο σφικτήρες οι οποίοι έχουν ένα κενό στο κέντρο τους και από το οποίο θα περάσει η δέσμη του laser για να συγκολλήσει τα πλαστικά δείγματα. Η συγκεκριμένη διάταξη έχει πολύ εύκολη προσαρμογή στη σταθερή βάση που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα με τα λεπτά πλαστικά. Η διάταξη αυτή φαίνεται στις εικόνες 7.5 και 7.6. .

Η πρώτη σειρά δοκιμών συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ως άνω στρώμα καθαρό πολυαιθυλένιο πάχους 1 mm και υλικό υπόστρωμα (που απορροφά την ακτινοβολία του laser) μαύρο πολυαιθυλένιο πάχους 2.5 mm τύπου PE (LS 835 1% ) με ενσωματωμένη μαύρη χρωστική. Στην εικόνα 7.15. παρακάτω φαίνονται οι συγκολλήσεις που επιτεύχθηκαν κατά την πρώτη σειρά των πειραμάτων.



Εικόνα 7.15. Συγκολλήσεις πλαστικών με μεγαλύτερο πάχος.

1. Το πρώτο από αυτή τη σειρά των πειραμάτων το οποίο μπορεί να θεωρηθεί και διερευνητικό έγινε με τάση τροφοδοσίας laser  $U = 421$  Volts, που αντιστοιχεί σε ενέργεια παλμού εξόδου  $E = 85,2$  mJ και συχνότητα  $f = 9$  Hz με χρόνο έκθεσης του δείγματος τα 5 sec. δηλαδή για περίπου 45 παλμούς. Η πυκνότητα ενέργειας είναι ίση με  $197 \text{ mJ} / \text{mm}^2$ . Το αποτέλεσμα από αυτό το πείραμα φαίνεται στην εικόνα 7.15. με τον αριθμό 1. Όπως είναι εμφανές, η τήξη των φύλλων ήταν ανεπαρκής και η ποιότητα συγκόλλησης μέτρια. Σύμφωνα με αυτό, κρίνεται απαραίτητη η αύξηση της έκθεσης των δειγμάτων σε περισσότερους παλμούς. Αναλυτικά οι συνθήκες που υλοποιήθηκε η συγκόλληση αυτή, αναφέρονται στον πίνακα 8.4..
2. Το δεύτερο πείραμα, αφού εκτιμήθηκε το αποτέλεσμα του πρώτου έγινε με τάση τροφοδοσίας του laser  $U = 421$  Volts και συχνότητα  $f = 9$  Hz αλλά σε αυτήν την περίπτωση αυξήθηκε ο χρόνος έκθεσης του δείγματος στα 10 sec (90 παλμοί). Το αποτέλεσμα αυτού του πειράματος φαίνονται στην εικόνα 7.15. με τον αριθμό 2 και οι συνθήκες της συγκόλλησης, αναλυτικά στον πίνακα 8.4.. Η συγκόλληση με αυτές τις συνθήκες είναι εμφανώς καλύτερη από αυτή του προηγούμενου πειράματος και παρατηρούμε ότι έχει επέλθει πληρέστερη τήξη των υλικών με αποτέλεσμα η ποιότητα της συγκόλλησης να είναι ανώτερη. Στην συγκόλληση no 2 διακρίνεται μια τοπική παραμόρφωση στο φύλλο επικάλυψης που είναι αποτέλεσμα της τήξης και της διαστολής των δειγμάτων, πράγμα που μας επιβεβαιώνει την υλοποίηση καλής συγκόλλησης. Ακόμα μπορούμε να διακρίνουμε ότι έχει επέλθει



χρωματική αλλαγή γύρω από το σημείο που έχει σχηματιστεί η συγκόλληση. Όλα τα παραπάνω συνηγορούν στο ότι οι συνθήκες που έχουμε επιλέξει είναι καλύτερες και ότι στο επόμενο πείραμα δεν πρέπει να «απομακρυνθούμε» πολύ από αυτές.

3. Στο τρίτο από αυτή την σειρά των πειραμάτων έχοντας υπόψη μας τα παραπάνω μεταβάλλαμε την τάση τροφοδοσίας του laser σε  $U = 475$  Volts δηλαδή αυξήσαμε την ενέργεια των παλμών εξόδου του laser. Με συχνότητα παλμών  $f = 9$  Hz και για χρόνο έκθεσης του δείγματος 10 sec (90 παλμοί) πετύχαμε την συγκόλληση που φαίνεται στην εικόνα 7.15. με τον αριθμό 3. Οι συνθήκες που υλοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις αλλά και η συνολική ενέργεια που δέχθηκε το δείγμα και η πυκνότητα ενέργειας βρίσκονται συγκεντρωμένες στον πίνακα 8.4.. Η συγκόλληση που πετύχαμε με αυτές τις συνθήκες, με έναν οπτικό έλεγχο δείχνει παρόμοια με την συγκόλληση του προηγούμενου πειράματος νο 2. Τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος παρατηρώντας και την εικόνα 7.15.-3 στην προηγούμενη σελίδα δεν διαφέρουν πολύ από το προηγούμενο πείραμα υπ'αρ 2. Έχει προκύψει και σε αυτό το δείγμα παραμόρφωση στο σημείο της έκθεσης στο φύλλο επικάλυψης που όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο πείραμα είναι αποτέλεσμα της τήξης και διαστολής του υλικού. Η συγκόλληση που έχει προκύψει είναι πολύ καλή και εφελκύνοντας τα δυο πλαστικά στο σημείο της συγκόλλησης, βλέπουμε ότι η συγκόλληση παρουσιάζει σημαντική αντοχή. Στο επόμενο πείραμα θα αυξήσουμε επιπλέον την συχνότητα του laser, ώστε τα δείγματα να ακτινοβοληθούν για περισσότερους παλμούς διατηρώντας τον χρόνο έκθεσης σταθερό.
4. Στο τέταρτο και τελευταίο από αυτή την σειρά των πειραμάτων διατηρήσαμε την τάση τροφοδοσίας σταθερή στα  $U = 475$  Volts και αυξήσαμε την συχνότητα στα  $f = 15$  Hz με χρόνο έκθεσης σταθερό στα 10 sec (150 παλμοί). Το αποτέλεσμα αυτής της συγκόλλησης φαίνεται στην εικόνα 7.15. με τον αριθμό 4. Όμως σε αυτή τη περίπτωση και παρατηρώντας την εικόνα 7.15.-4 φαίνεται ότι το δείγμα εκτέθηκε στο σημείο της συγκόλλησης περισσότερο χρόνο από τον βέλτιστο καθώς έχει προκύψει μια παραμόρφωση στο σημείο της έκθεσης στο άνω στρώμα, το οποίο φαίνεται να έχει εγκλωβίσει αέρα στο εσωτερικό του κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης ενώ κατά την στερεοποίηση του υλικού έχει απομείνει ένας «κρατήρας». Η συγκόλληση αυτή δεν είναι ποιοτικά τόσο καλή όσο οι προηγούμενες με τα νούμερα 2 και 3 οι οποίες εκτός από σημαντική αντοχή παρουσιάζουν και καλή εμφάνιση. Με την υλοποίηση αυτής της συγκόλλησης παρατηρούμε ότι οι συνθήκες δείχνουν να έχουν ξεπεράσει τις βέλτιστες όσο αφορά την συνολική ροή ενέργειας laser, πράγμα που σημαίνει ότι περαιτέρω αύξηση των συνθηκών λειτουργίας του laser θα οδηγήσει σε διάτρηση του δείγματος.

### **Συγκολλήσεις με παχύτερα φύλλα PE (ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ).**

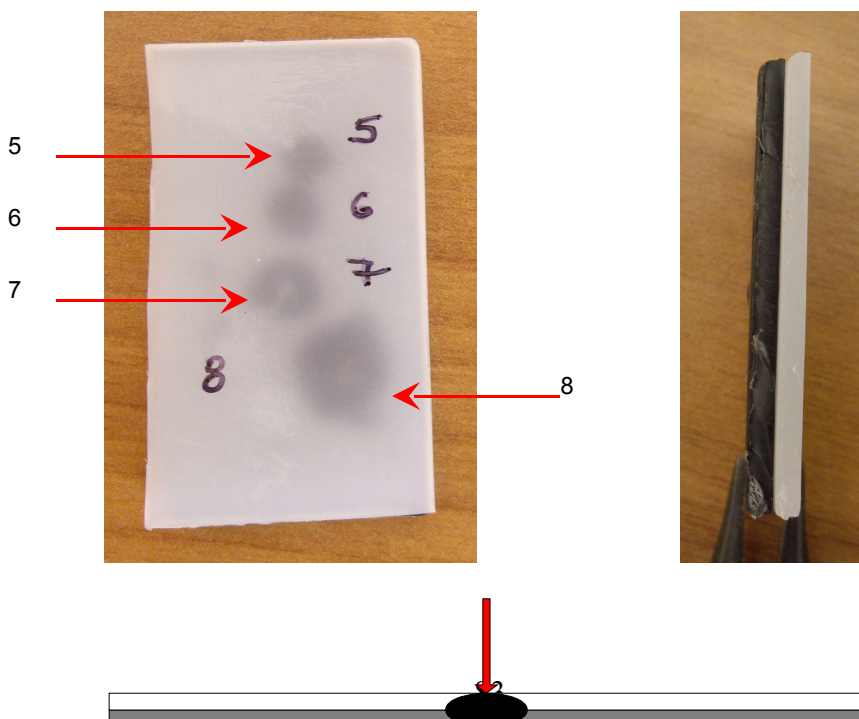
Η δεύτερη σειρά δοκιμών συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ως άνω στρώμα καθαρό πολυαιθυλένιο πάχους 2.5 mm και σαν υλικό υπόστρωμα που απορροφά την ακτινοβολία του laser πολυαιθυλένιο τύπου PE

(LS 835 1% ) με ενσωματωμένη μαύρη χρωστική και πάχος 3 mm. Για την υλοποίηση των πειραμάτων δεν χρησιμοποιήθηκε φακός εστίασης και έγιναν δοκιμές με διάφορες συνθήκες λειτουργίας του laser αλλά και με τους χρόνους έκθεσης των δειγμάτων. Στην εικόνα 7.16. της επόμενης σελίδας φαίνονται οι συγκολλήσεις που επιτεύχθηκαν κατά την δεύτερη σειρά των πειραμάτων.

5. Το πρώτο από αυτή τη σειρά των πειραμάτων που ουσιαστικά λειτουργεί και σαν οδηγός για τα μετέπειτα πειράματα έγινε με τάση τροφοδοσίας του laser  $U = 475$  Volts που αντιστοιχεί σε ενέργεια παλμών εξόδου 143,9 mJ και με συχνότητα  $f = 9$  Hz με χρόνο έκθεσης στα 20 sec (180 παλμοί). Αναλυτικά οι συνθήκες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4.. Το αποτέλεσμα αυτής της δοκιμής φαίνεται στην εικόνα 7.16. της επόμενης σελίδας με τον αριθμό 5. Παρατηρώντας το αποτέλεσμα από αυτή την συγκόλληση, βλέπει κανείς ότι η επηρεασμένη περιοχή από την επίδραση της ακτινοβολίας του laser είναι μικρή που σημαίνει ότι στο επόμενο πείραμα θα πρέπει να αυξήσουμε την ενέργεια στην οποία θα εκτεθεί το δείγμα. Η συγκόλληση φαίνεται αρκετά καλή οπτικά και με καλή μηχανική αντοχή με έναν στοιχειώδη έλεγχο. Οι επηρεαζόμενες επιφάνειες στην διεπαφή των δειγμάτων δεν είναι εύκολο να παρατηρηθούν παρά μόνο με την αποκόλληση των δειγμάτων. Την ύπαρξη όμως συγκόλλησης μας την επιβεβαιώνει εκτός από την αντίσταση που προβάλλουν τα δείγματα στην προσπάθεια αποκόλλησης τους, η αλλαγή της χρωματικής απόχρωσης που μπορούμε να διακρίνουμε στο πλαστικό επικάλυψης στο σημείο ακριβώς της συγκόλλησης που φαίνεται και στην εικόνα 7.16..
6. Στη δεύτερη δοκιμή έχοντας σαν υπόδειγμα το πρώτο πείραμα διατηρήσαμε σταθερή την τάση τροφοδοσίας του laser  $U = 475$  Volts, αυξήσαμε την συχνότητα  $f = 15$  Hz και μειώσαμε τον χρόνο έκθεσης του δείγματος στα 15 sec (225 παλμοί). Το αποτέλεσμα αυτής της δοκιμής φαίνεται στην εικόνα 7.16. με τον αριθμό 6. Σε αυτό το πείραμα η επηρεαζόμενη επιφάνεια από την ακτινοβολία του laser είναι λίγο μεγαλύτερη από το προηγούμενο πείραμα, πράγμα που σημαίνει ότι και η συγκόλληση που έχει προκύψει θα είναι ισχυρότερη. Η συγκόλληση που υλοποιήθηκε δεν διαφέρει πολύ από αυτή του προηγούμενου πειράματος όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.16.-6.. Είναι πολύ καλή με ένα οπτικό έλεγχο και από όσο μπορούμε να διακρίνουμε δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες γεωμετρικές αλλοιώσεις. Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, έτσι και σε αυτό υπάρχει αλλαγή της απόχρωσης στην διεπαφή των δειγμάτων και μάλιστα σε μεγαλύτερο βαθμό από την προηγούμενη συγκόλληση πράγμα που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα πλαστικά υλικά έχουν τηχθεί, αναμιχθεί και στερεοποιηθεί. Οι εξωτερικές επιφάνειες των πλαστικών δεν έχουν υποστεί παραμορφώσεις κάτι που σημαίνει ότι δεν έχουμε ξεπεράσει το όριο διάτρησης των δειγμάτων.
7. Στο τρίτο πείραμα αυτής της σειράς θέλοντας να παρατηρήσουμε τις επιπτώσεις με αυξημένη ακτινοβολία επάνω στα πλαστικά υλικά αυξήσαμε την τάση τροφοδοσίας του laser αλλά και την συχνότητα και τον χρόνο έκθεσης του δείγματος στην ακτινοβολία. Έτσι με τάση τροφοδοσίας του laser  $U = 500$  Volts που αντιστοιχεί σε ενέργεια παλμών εξόδου 173,7 mJ και συχνότητα  $f = 18$  Hz με χρόνο έκθεσης στα 19sec (342 παλμοί) πετύχαμε την συγκόλληση που φαίνεται στην εικόνα 7.16. με αριθμό 7. Η πυκνότητα ενέργειας που προκύπτει είναι ίση με

$3056mJ/mm^2$ . Σε αυτήν την περίπτωση, έχουμε πλησιάσει το όριο διάτρησης που αναφέραμε στο προηγούμενο πείραμα και στο υλικό εμφανίζονται παραμορφώσεις που με περαιτέρω αύξηση των συνθηκών θα οδηγήσει στην διάτρηση των δειγμάτων. Παρατηρώντας το σημείο συγκόλλησης, βλέπουμε μια χρωματική αλλοίωση σε μια εκτεταμένη περιοχή, γύρω από το σημείο πρόσπτωσης της ακτινοβολίας από το laser. Αυτό σημαίνει ότι έχει επέλθει η τήξη εκτός από το σημείο της συγκόλλησης και στη γύρω από αυτή περιοχή που είναι αποτέλεσμα της αυξημένης ενέργειας παλμού, συχνότητας και του χρόνου έκθεσης του δείγματος. Στο σημείο πρόσπτωσης της δέσμης παρατηρείται και ένα σημείο στο οποίο έχει δημιουργηθεί κάποια «φυσαλίδα» (εγκλωβισμένα αέρια), αποτέλεσμα της ισχυρής αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας-ύλης αλλά και στην πίσω πλευρά του απορροφητικού πλαστικού υπάρχει μια παραμόρφωση που οφείλεται και αυτή στον ίδιο λόγο. Σύμφωνα με τα ευρήματα από αυτό το πείραμα, αυξάνοντας επιπλέον τις συνθήκες λειτουργίας του laser θα προκύψει διάτρηση του οπτικά-απορροφητικού τεμαχίου.

8. Στο τέταρτο και τελευταίο πείραμα της σειράς αυξήσαμε επιπλέον την τάση τροφοδοσίας του laser σε  $U = 580$  Volts αλλά και την συχνότητα σε  $f = 20$  Hz με ταυτόχρονη μείωση του χρόνου έκθεσης του δείγματος στα 15 sec (300 παλμοί). Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 7.16. με τον αριθμό 8. Σε αυτό το πείραμα σκοπίμως αυξάνουμε τις παραμέτρους εξόδου του laser, ώστε να προκληθεί η διάτρηση του υλικού με αυτοσκοπό να παρατηρήσουμε τις αλλοιώσεις που έχουν προκύψει από την αυξημένη έκθεση των υλικών στην ακτινοβολία του laser. Σε αυτό το πείραμα και με αυτές της συνθήκες επηρεάστηκε από την ακτινοβολία μια πολύ μεγάλη περιοχή γύρω από το σημείο της έκθεσης όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.16-8. Παρατηρώντας και το πίσω μέρος του οπτικά-απορροφητικού υλικού φαίνεται ότι έχει σημειωθεί διάτρηση και αλλοίωση του δείγματος. Άρα με τα ευρήματα από αυτή την συγκόλληση συμπεραίνουμε ότι έχουν ξεπεραστεί οι βέλτιστες συνθήκες για την υλοποίηση συγκολλήσεων σε αυτά τα πλαστικά δείγματα και η περαιτέρω αύξηση των συνθηκών δεν επιφέρει ουσιαστικό και πρακτικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 7.16. Συγκολλήσεις πλαστικών με μεγαλύτερο πάχος.

Οι καλύτερες συγκολλήσεις σε αυτή τη σειρά των πειραμάτων με ένα οπτικό έλεγχο είναι αυτές με το νο. 5 (180 παλμοί με  $U = 475$  Volts ( $9 \text{ Hz} \times 20 \text{ sec.}$ , με συνολική ενέργεια 25902 mJ και πυκνότητα ενέργειας  $1332 \text{ mJ/mm}^2$ )) και νο.6 με (225 παλμοί με  $U = 475$  Volts ( $15 \text{ Hz} \times 15 \text{ sec.}$ , με συνολική ενέργεια 32377mJ και πυκνότητα ενέργειας  $1665 \text{ mJ/mm}^2$ )). Με την περαιτέρω αύξηση της τάσης (που όπως προαναφέραμε αντιστοιχεί σε αύξηση ενέργειας εξόδου) και της συχνότητας αλλά και του χρόνου έκθεσης των δειγμάτων, παρατηρείται διάτρηση των δειγμάτων.

Συμπερασματικά, με πλαστικά υλικά μεγαλύτερου πάχους, έχουν υλοποιηθεί πολύ καλές συγκολλήσεις τόσο στην πρώτη, όσο και στην δεύτερη σειρά πειραμάτων. Αυτά τα αποτελέσματα μας επιβεβαιώνουν και την καταλληλότητα του Nd:YAG laser για συγκολλήσεις πλαστικών υλικών με μεγάλο πάχος. Οι συγκολλήσεις που επιτεύχθηκαν, παρουσιάζουν σημαντικές μηχανικές αντοχές αλλά και πολύ καλή οπτική εμφάνιση κάτι που είναι βέβαια ένα δευτερεύον κριτήριο.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα συζητηθούν γενικότερα ο βαθμός επιτυχίας των πειραμάτων, τα προβλήματα που ανέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία αλλά και οι λύσεις που δόθηκαν σε αυτά τα προβλήματα. Ακόμα συζητούνται οι προοπτικές βελτίωσης της εργασίας αυτής και τέλος γίνεται μια επισκόπηση όλης της εργασίας και καταλήγουμε στα συνολικά εξαγόμενα συμπεράσματα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 :ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **8.1. Βαθμός επιτυχίας, προβλήματα, προτεινόμενες λύσεις και προοπτικές βελτίωσης**

#### **8.1.1. Βαθμός επιτυχίας**

Στην εργασία αυτή, και μόνο η επίτευξη συγκολλήσεων μπορεί να χαρακτηριστεί ως επιτυχία καθώς όπως έχουμε προαναφέρει, το laser που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή το Nd:YAG δεν θεωρείται το πλέον κατάλληλο laser για συγκολλήσεις πλαστικών.

Οι συγκολλήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί είναι πολύ καλές και πολύ ενθαρρυντικές για επιπλέον πειράματα. Έχουμε καταφέρει να συγκολλήσουμε λεπτά φιλμ πολυαιθυλενίου αλλά και φύλλα πολυαιθυλενίου με μεγαλύτερο πάχος σε διάφορες παραλλαγές. Ξεκινώντας το πειραματικό μέρος, για την υλοποίηση των πειραμάτων έπρεπε να διερευνηθούν οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας του laser, ώστε ακόμα και αν δεν πετυχαίναμε συγκολλήσεις των δειγμάτων στα αρχικά πειράματα, να βγάzaμε χρήσιμα συμπεράσματα και να παίρναμε σωστές ενδείξεις για την συνέχεια των πειραμάτων. Στην πορεία των πειραμάτων, βελτιώναμε συνεχώς τις συνθήκες μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας του laser, την συχνότητα λειτουργίας αλλά και τον χρόνο έκθεσης των πλαστικών δειγμάτων, σύμφωνα με την εικόνα των αμέσως προηγούμενων πειραμάτων. Σημαντική ένδειξη του βαθμού επιτυχίας των πειραμάτων, είναι ότι πετύχαμε συγκολλήσεις με όλα τα διαφορετικά πλαστικά δείγματα που επιχειρήσαμε να συγκολλήσουμε και μάλιστα σε μερικά δείγματα τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά, όπως η υλοποίηση συγκόλλησης κατά μήκος του πλαστικού (συρραφή).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, αλλά και με την επισύναψη ότι επιτεύχθηκαν αξιοσημείωτα πειράματα συγκολλήσεων από τα αρχικά ακόμη πειράματα, μπορούμε να πούμε ότι όλη η πτυχιακή εργασία είχε υψηλό βαθμό επιτυχίας.

#### **8.1.2. Προβλήματα που ανέκυψαν**

Τα προβλήματα που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε κατά την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας ήταν αρκετά και διαφορετικού είδους.

Το πρώτο πρόβλημα που κληθήκαμε να αντιμετωπίσαμε ήταν η θεωρητική ακαταλληλότητα του laser Nd:YAG ιδιαίτερα για συγκολλήσεις λεπτών φύλλων (φιλμ) πλαστικού. Το laser Nd:YAG με μήκος κύματος της εκπεμπόμενης δέσμης στο κοντινό υπέρυθρο (NIR) στα 1064 nm δεν χρησιμοποιείται ευρύτατα στις συγκολλήσεις πλαστικών και η επιλογή του ήταν μια πρόκληση για το πειραματικό μέρος. (Σαν το πλέον κατάλληλο laser για συγκολλήσεις πλαστικών φύλλων λεπτού πάχους σε βιομηχανικές εφαρμογές θεωρείται το laser αερίου διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) με μήκος κύματος εκπεμπόμενης δέσμης στο μακρό υπέρυθρο στα 10,6 μm). Το laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) αντίθετα δεν θεωρείται το κατάλληλο laser για την υλοποίηση συγκολλήσεων με παχύτερα πλαστικά φύλλα καθώς η ακτινοβολία

του laser απορροφάται από όλο το πάχος και τη μάζα των πλαστικών δημιουργώντας αλλοιώσεις, παραμορφώσεις ή και καταστροφή των υλικών κάτι που είναι σαφώς ανεπιθύμητο. Η λύση που δόθηκε για την υλοποίηση των συγκολλήσεων με λεπτά πλαστικά φύλλα με το Nd:YAG laser, ήταν η χρήση πλαστικών υλικών με ενσωματωμένες απορροφητικές χρωστικές ουσίες, ώστε να αυξάνεται η ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας και συγκόλλησης των δειγμάτων ή η προσθήκη ουσιών στην διεπαφή των πλαστικών για δείγματα που απορροφούν ελάχιστα την υπέρυθη ακτινοβολία του Nd:YAG laser.

Τέτοιες ουσίες που δοκιμάστηκαν στα πειράματά μας ήταν η σκόνη γραφίτη και η μαύρη μελάνη. Αυτός ο τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος κάνει τελικά το laser Nd:YAG να πλεονεκτεί έναντι του CO<sub>2</sub> laser γιατί πρώτον η θερμότητα εντοπίζεται ακριβώς στην περιοχή συγκόλλησης και δεύτερον με την μέθοδο αυτή μπορούν να συγκολληθούν και παχύτερα κομμάτια πλαστικού χωρίς να καταστραφούν σε όλο τους το βάθος από την θερμότητα, πράγμα που δεν είναι εφικτό με το laser CO<sub>2</sub>.

Το δεύτερο πρόβλημα που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε ήταν η συγκράτηση των δειγμάτων αλλά και η κατάλληλη εφαρμογή πίεσης στα δείγματα, που είναι απαραίτητη για την υλοποίηση συγκολλήσεων. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την κατασκευή μιας ειδικής για την περίπτωση κατασκευής που συγκρατεί τα δείγματα και επιβάλλει την πίεση που χρειάζονται αυτά, ώστε να συγκολληθούν. Η διάταξη αυτή φαίνεται στην εικόνα 7.5. και 7.6. του κεφαλαίου 7. Στα πλαστικά με μεγαλύτερο πάχος, λόγω της δυσκαμψίας των δειγμάτων δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η παραπάνω διάταξη και έτσι χρειάστηκε να κατασκευάσουμε μια νέα διάταξη που θα συγκρατεί και θα επιβάλλει την κατάλληλη πίεση.

### 8.1.3 Προοπτικές βελτίωσης.

Οι συγκολλήσεις των πολυμερών υλικών με laser είναι ένας πολύ ευρύς τομέας και αυτή η πτυχιακή εργασία αποτελεί ένα πολύ μικρό κομμάτι πάνω σε αυτό το θέμα. Θα μπορούσαν να γίνουν πολλές βελτιώσεις με βάση αυτήν την εργασία ώστε να περάσει σε ένα άλλο επίπεδο με στόχο την βιομηχανική εφαρμογή. Προεκτάσεις θα μπορούσαν να γίνουν μελλοντικά σε διάφορα τμήματα της εργασίας αυτής.

- Επιπλέον πειράματα. Τα πειράματα που έχουν γίνει είναι σχετικά λίγα και μελλοντικά θα μπορούσαν να γίνουν πολλά περισσότερα με διαφορετικά πλαστικά υλικά αλλά και με διαφορετικές πρόσθετες απορροφητικές ουσίες με διαφορετικά πάχη, ώστε να έχουμε πολύ περισσότερα αποτελέσματα και να καταλήξουμε σε ασφαλέστερα συμπεράσματα.
- Πειράματα αντοχής των συγκολλήσεων. Σε αυτήν την εργασία δεν έχουν διερευνηθεί ποσοτικά οι αντοχές των συγκολλήσεων που έχουν υλοποιηθεί και το μόνο διαθέσιμο κριτήριο ήταν η καλή εμφάνιση των συγκολλήσεων και ένα πρόχειρος έλεγχος της αντοχής τους που γινότανε, εφελκύνοντας τα συγκολλημένα δείγματα προς αντίθετες κατευθύνσεις. Όμως η ποσοτικοποίηση των αντοχών των συγκολλήσεων είναι αναγκαία, ώστε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα και να επιλεγούν οι κατάλληλες συγκολλήσεις με αυστηρότερα κριτήρια. Σύμφωνα με αυτές τις απαιτήσεις θα πρέπει οι

συγκολλήσεις που έχουν υλοποιηθεί να υποβληθούν σε πειράματα εφελκυσμού ώστε να ποσοτικοποιηθούν οι μηχανικές αντοχές τους.

- Αυτοματοποιήσεις στην πειραματική διάταξη. Πολλές βελτιώσεις θα μπορούσαν να γίνουν και στην πειραματική διάταξη η οποία θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων με τους οποίους θα ήταν δυνατό να προσδιορίσουμε και την ταχύτητα συγκόλλησης των δειγμάτων αλλά και να προσδώσει άλλη διάσταση σε αυτήν την εργασία. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι απλή και σαν σκέψη αλλά και σαν κατασκευή χωρίς να θέλουμε να υποβαθμίσουμε την αποτελεσματικότητα της αλλά η δημιουργία μιας νέας και αναβαθμισμένης διάταξης με την χρήση κινητήρων αλλά και στοιχείων ελέγχου θα οδηγούσε την εργασία αυτή σε άλλη διάσταση.
- Βελτιώσεις του laser. Θα μπορούσαν να γίνουν πολλές βελτιώσεις σχετικές με τη δέσμη του laser που θα βελτιώσουν και θα κάνουν ευκολότερη την υλοποίηση των πειραμάτων. Σαν πρώτη βελτίωση θα αναφέρουμε την μετάδοση και χειρισμό της δέσμης του laser μέσα από οπτική ίνα. Με αυτό τον τρόπο θα γίνεται εύκολα ο χειρισμός της δέσμης και έτσι η ευθυγράμμιση της δέσμης του laser με το επιθυμητό σημείο πρόσπτωσης (δηλαδή το σημείο συγκόλλησης) δεν θα χρειάζεται να γίνεται μετακινώντας τα δείγματα όπως έγινε σε αυτήν την εργασία. Μια άλλη λύση που θα μπορούσε να μας διευκολύνει πάνω σε αυτό το πρόβλημα είναι η ενσωμάτωση μιας ορατής "δέσμης-οδηγού", ώστε να φαίνεται το σημείο (ίχνος) πρόσπτωσης της υπέρυθρης (αόρατης) δέσμης εκ των προτέρων. Σαν δεύτερη βελτίωση θα μπορούσαμε να αναφέρουμε την ομογενοποίηση της δέσμης του laser καθώς παρουσιάζει έντονη ανομοιογένεια και κάνει δυσκολότερη την υλοποίηση των πειραμάτων συγκόλλησης. Η ανομοιογένεια της δέσμης φαίνεται από το ίχνος των συγκολλήσεων που έχουν επιτευχθεί καθώς σε ένα σημείο των συγκολλήσεων φαίνεται ότι η πυκνότητα ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα σημεία. Η ομογενοποίηση της δέσμης είναι ένα δύσκολο πρόβλημα των συστημάτων laser που θα μπορούσε να λυθεί με την χρήση ειδικών εξωτερικών οπτικών στοιχείων που παρεμβάλλονται στην δέσμη του laser αλλά και με την χρήση ειδικών καθρεπτών (γκαουσιανής κατανομής ανακλαστικότητας) που τοποθετούνται στην οπτική κοιλότητα του laser. Μια τρίτη βελτίωση που θα μπορούσε να γίνει, είναι η ενσωμάτωση ενός μετρητή ενέργειας παλμού που θα μπορούσε να μας δείχνει απευθείας της αλλαγές της ενέργειας των παλμών εξόδου με την μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας της λυχνίας. Οι μετρήσεις αυτές σε αυτήν την εργασία έγιναν όπως αναφέρεται και στο κεφ. 7 με την χρήση κεφαλής ενεργομέτρου και παλμογράφου, κάτι που είναι αρκετά χρονοβόρο, ενώ με την υλοποίηση μιας τέτοιας διάταξης οι μετρήσεις αυτές θα γίνονται άμεσα.

Όλες οι παραπάνω βελτιώσεις θα μπορούσαν να συνεχίσουν την εργασία αυτή σε άλλο επίπεδο, ώστε να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα και να κατασκευαστεί και μια καλύτερη διάταξη με τελικό σκοπό την ένταξη της στην βιομηχανική παραγωγή.

## **8.2 Συμπεράσματα**

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών συγκολλήσεων, κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάπτυξη της εργασίας αυτής με την υλοποίηση περισσότερων πειραμάτων καθώς οι συγκολλήσεις που έχουν υλοποιηθεί μέχρι αυτό το στάδιο είναι πολλά υποσχόμενες. Έχουν πραγματοποιηθεί πολύ καλές συγκολλήσεις με λεπτά φύλλα πολυαιθυλενίου αλλά και με πλαστικά υλικά με μεγαλύτερο πάχος.

Με τα πλαστικά φιλμ αρχικά πραγματοποιήθηκαν διερευνητικές συγκολλήσεις χρησιμοποιώντας σαν υλικό επικάλυψης διαφανές για την δέσμη του laser πολυαιθυλένιο και σαν υλικό απορροφητικό στη δέσμη του laser δίχρωμο (ασπρόμαυρο) πολυαιθυλένιο. Από αυτά τα πειράματα εξάχθηκαν χρήσιμα συμπεράσματα για της συνθήκες του laser αλλά και για την ικανότητα συγκόλλησης των δειγμάτων που βοηθούν στα επόμενα πειράματα.

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφανή στην ακτινοβολία του laser φύλλα πολυαιθυλενίου και στην διεπαφή των πλαστικών υλικών προστέθηκαν απορροφητικές χρωστικές ουσίες ώστε να αυξηθεί η ικανότητα συγκόλλησης των δειγμάτων. Με την προσθήκη τέτοιων υλικών είχαμε πολύ καλά αποτελέσματα σε όλες της πειραματικές συγκολλήσεις. Ακόμη τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν πολύ καλή εμφάνιση αλλά και σημαντικές αντοχές, που είναι και ο σημαντικότερος παράγοντας.

Στην τελευταία σειρά πειραμάτων με τα λεπτά φύλλα πολυαιθυλενίου, χρησιμοποιήθηκε διαφανές στη δέσμη του laser πολυαιθυλένιο σαν φύλλο επικάλυψης και σαν απορροφητικό υπόστρωμα δίχρωμο (ασπρόμαυρο) πολυαιθυλένιο. Αυτή η σειρά των πειραμάτων είναι συνέχεια των πειραμάτων της πρώτης φάσης όπου και εκεί είχαν χρησιμοποιηθεί ουσιαστικά τα ίδια πλαστικά υλικά. Τα αποτελέσματα από αυτά τα πειράματα είναι εντυπωσιακά, καθώς εκτός από πολύ καλές σημειακές συγκολλήσεις, επιτεύχθηκε και συγκόλληση κατά μήκος του πλαστικού υλικού (συρραφή) που είναι και ένας βασικός σκοπός αυτής της εργασίας.

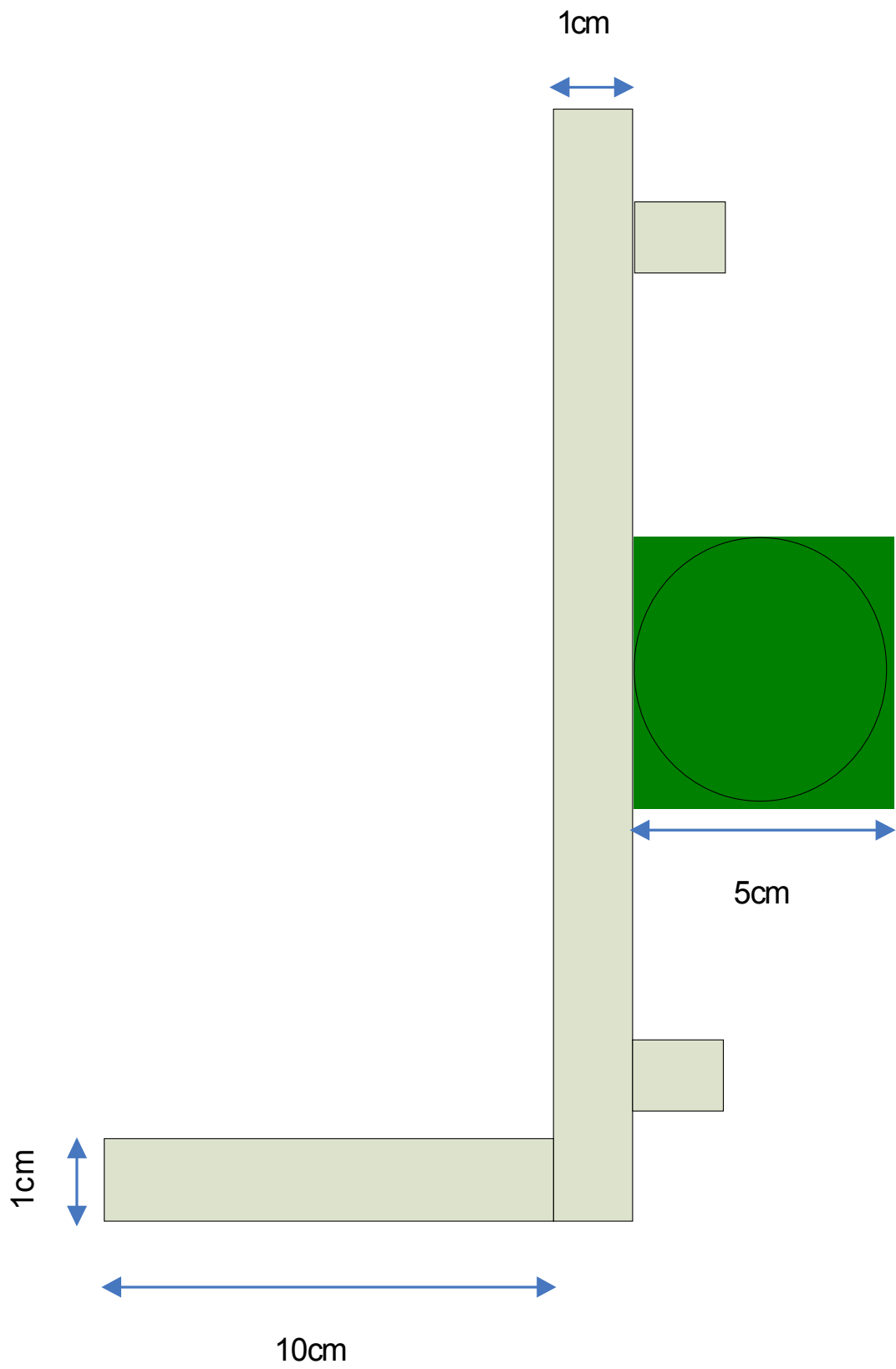
Με φύλλα πολυαιθυλενίου μεγαλύτερου πάχους πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές πειραμάτων χρησιμοποιώντας σαν υλικό επικάλυψης (άνω στρώμα) διαφανές στη δέσμη του laser πολυαιθυλένιο. Στην πρώτη σειρά των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε διαφανές πολυαιθυλένιο με πάχος  $d = 1 \text{ mm}$  ενώ στην δεύτερη σειρά παχύτερο πλαστικό με  $d = 2.5 \text{ mm}$ . Το πλαστικό υλικό που χρησιμοποιείται σαν υπόστρωμα είναι μαύρο πολυαιθυλένιο με ενσωματωμένη μαύρη χρωστική απορροφητική ουσία με πάχος  $d = 2.5 \text{ mm}$ . Με αυτά τα δείγματα πραγματοποιήθηκαν πολύ καλές σημειακές συγκολλήσεις οι οποίες συνδυάζουν την καλή εμφάνιση με την πολύ καλή αντοχή. Με αυτά τα δείγματα θα μπορούσε στην συνέχεια να επιχειρηθεί και συγκόλληση κατά μήκος των πλαστικών κάτι που θα ήταν ένα πολύ καλό πείραμα για την συνέχιση της εργασίας.

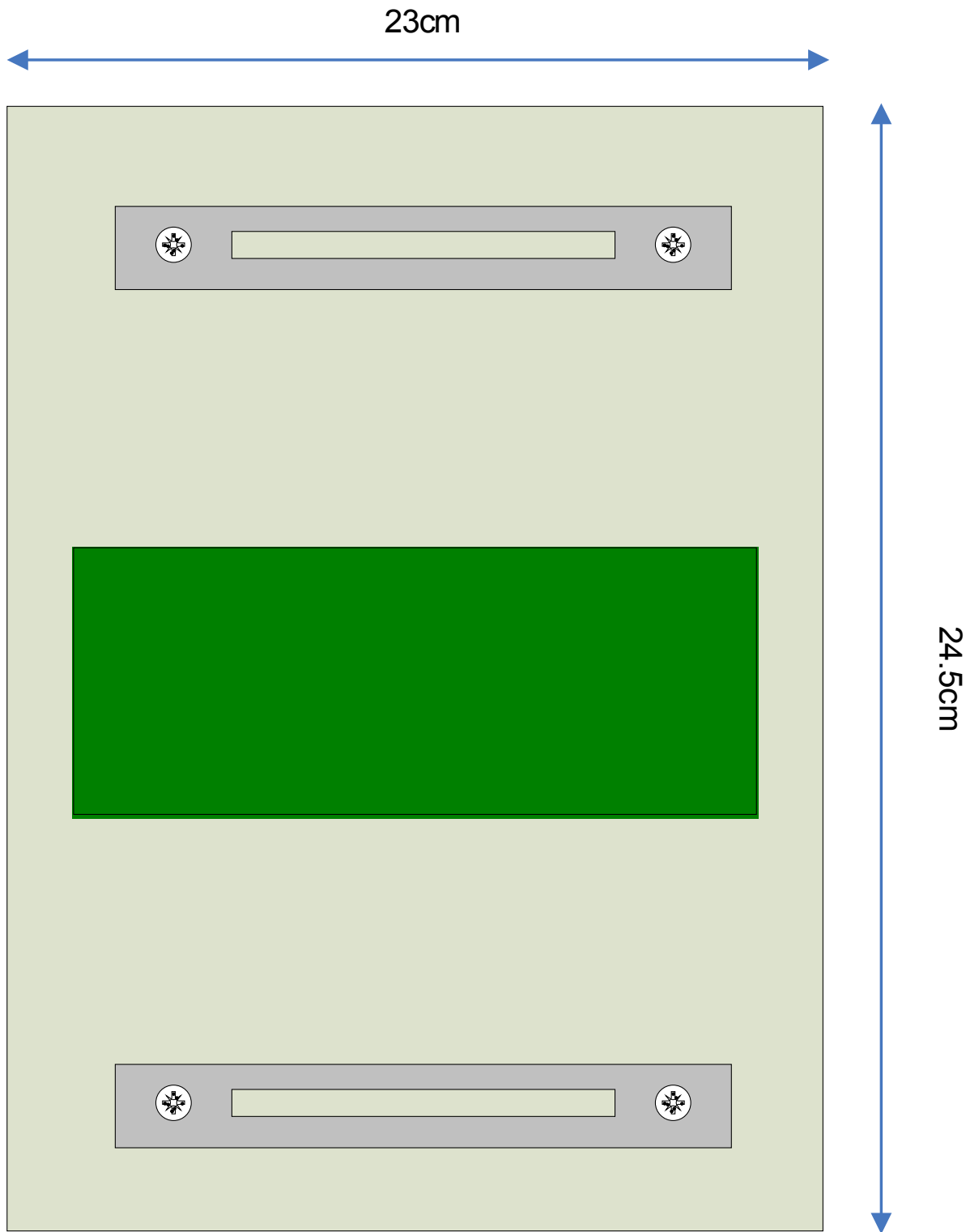
Στην εργασία αυτή μπορούν να γίνουν πολλές βελτιώσεις που όπως έχουμε αναλύσει και προηγουμένως θα οδηγήσουν την εργασία αυτή σε άλλο επίπεδο με τελικό σκοπό την ένταξη της τεχνογνωσίας που αναπτύχθηκε σε εφαρμογές βιομηχανικής κλίμακας.



# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

**ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ-ΤΑΝΥΣΗΣ ΛΕΠΤΩΝ  
ΦΥΛΛΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ**





Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά θερμοπλαστικά υλικά

Συμβολισμοί	Τεχνικός χαρακτηρισμός	Είδος επεξεργασίας	Χαρακτηριστικά	Χρησιμοποίηση στην οικοδομή
PE	Πολυαιθυλένιο		PE μαλακό $d \geq 0,92$ PE σκληρό $d \leq 0,96$ Μερικώς κρυσταλλικό. Ανάλογα προς το φαινόμενο βάρος πτυσσόμενο ή σκληρό. Ανθεκτικό σε διάβρωση και ψύχος.	Προστατευτικά έναντι καιρικών συνθηκών φυλλίδια, σωληνώσεις παροχών, αποχετεύσεις, σωληνώσεις μεγάλης διατομής, ηλεκτρικές μονώσεις (HF καλώδια αντένων).
E/VAC	Συμπολυμερισμένο αιθυλένιο	Με οξείκο βινύλιο κ.ά.	Πτυσσόμενο, μαλακό.	Στεγανοποιητικά προφίλ, στεγανοποιητικές λωρίδες οικοδομών.
PP	Πολυπροπυλένιο όμοιο με πολυβουτένιο -I (PB)		Σκληρότερο και ανθεκτικότερο σε θερμοκρασίες, λιγότερο ανθεκτικό σε ψύχος αλλιώς όμοιο με PE.	Γιά ανθεκτικά σε θέρμανση εξαρτήματα, σωλήνες αποχετεύσεως νερών οικιών, θερμάνσεις πατωμάτων δωματίων.
PIB	Πολυισοβουτυλένιο		Ανάλογα με το είδος ελαστικό σε κόμμα μέχρι πλαστικό.	Λωρίδες στεγανοποίησης οικοδομικών, επικαλύψεις σκεπών, ταινίες στεγανώσεως.
TPX	Πολυμεθυλένιο πεντένιο		Διαυγές σαν γυαλί, ανθεκτικό σε έλξη.	Για εσωτερικά υαλοστάσια.
PS SB SAN ABS ASA	Πολυστυρένιο  Συμπολυμερή πλαστικά	Με βουταδιένιο (B) ακρυλικό νιρίλιο (AN ή A) με AN+ ακρυλ. εστέρα	Σκληρό διαυγές σαν γυαλί λίγο ψαθυρό. Ανθεκτικότερο σε έλξη παρά το PS. Καλά μορφοποιούμενο εν θερμώ. Αντέχει καλά σε καιρικές μεταβολές.	Αφρώδη πλαστικά για μόνωση θερμότητας (Hostapor, Styrocor, Styrofoam). Περικαλύμματα προστατευτικά κράνη, τμήματα εξαρτημάτων, ΗΤ-σωλήνες αποχετεύσεως.
PVC PVDC	Χλωριούχο πολυβινύλιο Διχλωριούχο πολυβινύλιο	Υψηλότερη περιεκτικ. χλωρίου	Σκληρό, αντοχής σε διάβρωση, καλή μορφοποίηση εν θερμώ και συγκολλητό.  Όμοιο με PVC	Είναι το σπουδαιότερο υλικό σωλήνων παροχών, επίσης για εφαρμογές εκτός άλλων σχημάτων κατασκευή βрусών, προφίλ περσιδων. Αποχετεύσεις χημείου και σωλήνες οχετών.
PVC	Polyblends Αυξάνει την αντοχή σε κρούση	Με προσθήκες που το κάνουν ελαστικότερο	Ανθεκτικότερο σε έλξη και κρούση παρά PVC, επίσης στη περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών.	Παράθυρα, επικαλύψεις προσόψεων, φωτεινές πλάκες, κυματοειδή φύλλα, υδρορορές, φυλλίδια επικαλύψεων επίπλων.
PVC μαλακό	Χλωριούχο πολυβινύλιο μαλακό	PVC + πλαστικοποιητικές ουσίες	Αναλόγως προς την ποιότητα των πλαστικοποιητικών ουσιών: σε είδος δέρματος ή μαλακού κόμματος.	Κάλυψη ηλεκτρικών αγωγών, επίπλων, δομικών προφίλ, κλπ.
PVF	Φθοριοούχο πολυβινύλιο		Αντοχή σε διάβρωση και καιρικές μεταβολές.	Λεπτά φύλλα για επενδύσεις εξωτερικών τοίχων και σκεπών.
PTFE	Πολυτετραφθοριούχο αιθυλένιο		Εξαιρετικής αντοχής σε διάβρωση και σε θερμοκρασίες.	Φυλλίδια ολισθήσεως εδράνων για προκατασκευασμένα τμήματα μπετόν π.χ. στο σύστημα ρυθμικής ωθήσεως στη κατασκευή γεφυρών.
PVAC	Οξείκο πολυβινύλιο		Διαυγές σαν γυαλί, σχηματίζει εύπλαστες μεμβράνες (φίλμ).	PVAC κ.α. συμπολυμερισμένα πλαστικά, βασική ύλη για κόλλες και μέσα επιχρώσεως ως επί το πλείστον σαν υδατίνες διασπορές.
PMMA	Πολυ-μεθυλμετακρυλικό (ακρυλικό γυαλί)		Σκληρό, λαμπερό, διαφανές σαν γυαλί. Το χυτό μετασχηματίζεται μόνο εν θερμώ.	Διαφανείς τοίχοι, φωταγωγοί, επικαλύψεις προσόψεων, φωτεινών σημάτων, πρώτη ύλη προστασίας επιφανειών, υαλοπίνακες.
POM	Πολιοξυμεθυλένιο και συγγενή πολυοξείκα		Τελείως κρυσταλλικό, αντοχής σε εφελκυσμό, κερατοειδές μέχρι σκληρό, σταθερό σε θέρμανση.	Αυτά και άλλα πλαστικά είναι "δομικά πλαστικά" για εξοπλισμούς οικοδομών, εξαρτήματα μηχανών πχ Πολυφαινολοξείδιο Noryl, PPO
PA	Πολυαμίδια			
PETP PBTP	Πολυτερεφθαλικά E= αιθυλένιο B= βουτυλένιο		Ανθεκτικά στη φωτιά λεπτά φυλλίδια	Φυλλίδια για λωρίδες στεγανοποίησης οικοδομών - Τεχνικά εξαρτήματα.
PC	Πολυανθρακικά		Διαυγές ως γυαλί, ανθεκτικό σε φωτιά και κάμψη	Λάμπες των δρόμων Αθραυστα υαλοστάσια.
CA CAB CAP	Εστέρες της κυτταρίνης: Οξείκης κυτταρίνης Οξείκοβουτυρικής κυττ. Οξείκοπροπιονικής κυττ.	Εστεροποίηση φυσικής κυτταρίνης από ξύλο ή βαμβάκι	Διαυγές ως γυαλί, αντοχής σε εφελκυσμό διαφόρων ειδών σκληρότητας.	Διαφόρων σχημάτων εξαρτήματα για επιστρώσεις κτιρίων ή επίπλων. CAB επίσης για σωλήνες, διαφανείς τοίχους και φωταγωγούς.
MC CMC	Αιθέρες της κυτταρίνης μεθυλική κυτταρίνη καρβοξυλική-μεθυλική κυτταρίνη	Σχηματισμός αιθέρων κυτταρίνης	Υδατοδιαλυτά συνδετικά μέσα.	Κόλλες ταπετσαρίας, κόλλα ζωγράφων εσωτερικά κονιάματα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Χαρακτηριστικά θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά**

ΣΥΜΒ	Τεχνικός χαρακτηρισμός της ομάδος τεχνητών ρητινών	Χημική δομή και είδος επεξεργασίας	Χαρακτηριστικά	Χρησιμοποίηση στην Οικοδομή
PF	Τεχνητές ρητίνες φαινόλης, φορμαλδεύδης (φαινοπλάστες)	Νοβοлак,Resol : δυνατόν να καούν, εν μέρει διαλυτά ενδιάμεσα προϊόντα από φαινόλες και φορμαλδεύδη. Σκλήρυνση με θέρμανση και πίεση,ειδικές ρητίνες εν ψυχρώ με οξέα.	Στερεές ρητίνες, διαλύτες σε οινόπνευμα εν μέρει σε νερό, δυνατόν να αραιωθούν.	Κόλλες εν θερμώ,για ανθεκτική σε επιδράσεις συγκολλητή και κόντρα-πλακέ ξυλεία. Συνδετικό μέσο για σκληρές ινώπλακες και αφρώδη πλαστικά. Βασικά υλικά : νερό και κόλλες ανθεκτικές σε καιρικές μεταβολές.
		Resit: σκληρυνόμενο πλαστικό φαινόλης.	Ρητίνες φαινόλης - ρεσοροίνης.  Τεχνικά ημιπροϊόντα Σκληρό χαρτί Σκληρό ύφασμα Πρεσσαριστών στρωμάτων Εξύλου	Εκτός των άλλων πίνακες διακοπών και ασφαλειών (ηλεκτρικοί). Μηχανών π.χ. οδοντωτοί τροχοί, έδρανα. Πάγκοι σταδίων, κάλυψη καθισμάτων, επενδύσεις προσόψεων.
UF MF	Ρητίνες ουρίας φορμαλδεύδης  μελαμίνης φορμαλδεύδης (γενικό όνομα: αμινοπλάστες)	Υδατοδιαλυτά προκαταρκτικά προϊόντα από ουρία ή μελαμίνη και φορμαλδεύδη. Σκλήρυνση υπό πίεση και θέρμανση ή χωρίς θέρμανση με χρησιμοποίηση ελαφρώς όξινων καταλυτών.	Στερεό σαν θρύψαλα ή σκόνη συχνά σε υδάτινα διαλύματα. Ενισχυτικό υλικό γομώσεως κυτταρίνης λιγότερο ανθεκτικό στο νερό τυπ. 31, καλύτερα ανθεκτικό σε υγρασία, για πιπτάκ με διάφορα προσθετικά υλικά. Σκληρό χαρτί με PF πυρήνα, MF με έγχρωμες διακοσμητικές πλάκες	Ψυχρές ή θερμές κόλλες ανθεκτικές σε υγρασία μέχρι νερό. UF-συνδετικά μέσα για μορισανίδες, αφρώδη της στιγμής για θερμομονώσεις. Χρωματιστές κατασκευές για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις,επιπλοποιία,επενδύσεις.  Πλάκες για τοίχους και έπιπλα.
UP EP	Ακόρεστοι πολυεστέρες  Εποξεικές ρητίνες κ.α. χωρίς πίεση "σκληρυνόμενες ρητίνες"	UP (πολυεστέρες διαλυμένοι σε στυρόλιο + καταλύτες). EP (+Αμινοσκληρυντές) είναι τεχνητές ρητίνες, οι οποίες μετά από ανάμειξη με ορισμένες ουσίες χωρίς πίεση εν θερμώ ή εν ψυχρώ σκληρώνονται.	Τα υγρά ή ηγμένα μείγματα πρέπει να επεξεργασθούν σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα με ενισχυτικά ή προσθήκες. Όταν σκληρυνθούν οι EP τότε είναι ανθεκτικότερες σε διαβρώσεις και θερμοκρασίες παρά σαν UP.	Είναι συνδετικά μέσα για τα σκυροδέματα με τεχνητές ρητίνες, για πλαστικά δάπεδα, για παρκέ διαρκείας, κόλλες για κατασκευαστικώς επιβαρυνμένα μέταλλα, πετρώματα και μπετόν και σε συνδυασμό με υαλούφανση για επενδύσεις υπο - γείων κατασκευών με τη μέθοδο του ψεκασμού.
GFK GF-UP GF-EP	Ενισχυμένες με υαλούφανση πλαστικές Τεχνητές ρητίνες (30-80% γυαλί)	Τεχνητές ρητίνες ως ανωτέρω ενισχυμένες με υαλούφανση - υαλοπλήγματα, υαλοπλέγματα υαλοβάμβακα.	Κατά μήκος και διαγωνίως κυματοειδείς, διαφανείς πλάκες με ίνες αλλά επίσης εξαρτήματα διαφόρου μορφής, σωλήνες, προφίλ.	Διαφανείς τοίχοι και σκεπές, φωταγωγοί, κατασκευαστικά προφίλ,φαρδείς σωλήνες σιλό ζωοτροφών, δεξαμενές ελαίων θερμάνσεως.
PUR	Πολυουρεθάνη	Προπαρασκευαστικά προϊόντα Desmorhene (πολυαλκοόλες) Desmodure (πολυισοκυανιούχα) αντιδρούν μεταξύ τους προς σκληρά ή ελαστικά προϊόντα	Εξαιρετική ποικιλία κατασκευής πλαστικών με εκάστοτε ειδική τεχνική επεξεργασία	Συνδετικά μέσα για επιστρώσεις πατωμάτων, ελαστικά αθλητικά όργανα, ειδικές κόλλες, σκληρά και μαλακά αφρώδη υλικά και υλικά σαν ελαστικό κόμμι.
SI	SI Σιλικόνες		Εξαιρετικού αντοχής σε θερμοκρασίες,υγρασία,στερεά ειδικά προϊόντα αδιάβροχα κλπ.	Ρητίνες σιλικόνης,λακ καμινάδων, καουτσούκ σιλικόνης,ηλεκτρικής μονώσεως, στεγανώσεις αρμών. Άλατα σιλικόνης, προστατευτικά τοίχων από την υγρασία.

1. Ελαστομερή είναι μερικά PUR και SI προϊόντα καθώς και βουλκανισμένα συνθετικά καουτσούκ, όπως το πολυχλωροπρένιο (CR), νιτρίλια του καουτσούκ (NBR), πολυσουλφιδία του καουτσούκ.

2. Δεν παρουσιάζονται ονόματα πρώτων υλών για φαινοπλάστες και αμινοπλάστες επειδή αυτά κυκλοφορούν υπό τεχνικές ονομασίες (τυπικές). Ιστορικός γνωστός ονομασίες είναι : οι βακελίτες ειδικώς για PF προϊόντα, το Rolloras για UF πρεσσαριστές μάζες, Meloras, Resopal ,Ultras για MF προϊόντα.

## **ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Paul G. Hewitt, "Οι έννοιες της φυσικής".
- Ebbing, D. D. , Gammon, S .D., "Γενική χημεία".
- O. Svelto, "Αρχές των lasers".
- Α.Α.Σεραφετινίδης, "Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική".
- Κ. Σαββάκης, " Εισαγωγή στην τεχνολογία των πολυμερών ".
- William D. Callister, JR 5<sup>th</sup> edition, "Επιστήμη και τεχνολογία υλικών".
- Στυλιανός Κουρής," Ακτίνες laser-Οπτοηλεκτρονική ", ΕΑΠ Τόμος Δ΄

## **ΑΡΘΡΑ**

- Amit Mukund Joshi, " Welding of plastics ".
- Kantam Vijaya Kumar, " Laser welding of plastics ".
- Thomas Renner, Michel Sieffert, " Laser-adapted construction for plastic welding".
- Yasuo Kurosaki, " Radiative heat transfer in plastic welding process ",Journal of Quantitative Spectroscopy &Radiative Transfer 93 (2005) 25–41
- J.P. Coelho, M.A. Abreu, M.C. Pires\*, " High-speed laser welding of plastic films", Optics and Lasers in Engineering 34 (2000) 385}395
- C. Bonten and C. Tüchert, " Welding of Plastics—Introduction into Heating by Radiation ", Journal of Reinforced Plastics and Composites 2002: 21: 699
- Joao M.P. Coelhoa, Manuel A. Abreua, F. Carvalho Rodrigues, "High-speed laser cutting of superposed thermoplastic films: thermal modeling and process characterization", Optics and Lasers in Engineering 42 (2004) 27–39
- S.-K. Cho, Y.-S. Yang, K.-J. Son, J.-Y. Kim, "Fatigue strength in laser welding of the lap joint", Finite Elements in Analysis and Design 40 (2004) 1059–1070

## **ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ**

[www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk)  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)  
[www.mellesgriot.com](http://www.mellesgriot.com)  
[www.howstuffworks.com](http://www.howstuffworks.com)  
[www.toweroptical.com](http://www.toweroptical.com)  
[www.vloc.com](http://www.vloc.com)  
[www.unitekmiyachi.com](http://www.unitekmiyachi.com)  
[www.femtolasers.com](http://www.femtolasers.com)  
[www.coherentinc.com](http://www.coherentinc.com)