

Αρχές των Lasers

Φυσική - τεχνολογία - ιατρικές εφαρμογές

του Α.Α. Σεραφετινίδη

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα lasers συμπλήρωσαν ήδη, (1990), τα πρώτα τριάντα χρόνια της ζωής τους. Στο διάστημα αυτό έχουν εξελιχθεί τόσο πολύ που να θεωρείται σήμερα πολύ άδικος ο αρχικός χαρακτηρισμός τους από τον Α.Λ. Schalow, έναν από τους εφευρέτες τους, ότι δηλαδή το laser «ήταν μια λύση που έψαχνε να βρει το πρόβλημά της».

Σήμερα το laser μπορεί άνετα να χαρακτηριστεί σαν ένα από τα πιο ενδιαφέροντα τεχνολογικά επιτεύγματα του αιώνα μας. Ο παραπάνω όμως ελάχιστος κολακευτικός τρόπος περιγραφής του, σαφώς αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι, παρά τις μοναδικές του ιδιότητες, το laser δεν πήρε αμέσως μια ξεχωριστή θέση σε κάθε ερευνητικό ή εργαστηριακό χώρο. Και αυτό ήταν κατά κάποιον τρόπο φυσικό, αν αναλογιστεί κανείς ότι οι εντυπωσιακές του

ιδιότητες, όπως λεπτότητα φασματικής γραμμής, ένταση και γεωμετρική συνεκτικότητα δέσμης, συμφωνία φωτός, κλπ. ήταν τόσο σημαντικές, ώστε να χρειαστεί ένα διάστημα προσαρμογής πριν γίνει γενικά παραδεκτή η υπεροχλή που έδιναν αυτές οι ιδιότητες στις πηγές lasers σε σχέση με τις παραδοσιακές πηγές φωτός. Έτσι μετά την ανακάλυψη του laser (1960), ακολούθησε μια μικρής διάρκειας περίοδος δυσπιστίας προς αυτό, η οποία στη συνέχεια αντικαταστάθηκε από μια περίοδο εξαιρετικής δραστηριότητας, που φθάνει ως τις μέρες μας.

2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ LASER

Η «λέξη» laser δημιουργήθηκε από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων που περιγράφουν το φαινόμενο, πάνω στο οποίο βασίζεται η λειτουργία κάθε laser, δηλαδή «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» που θα μπορούσε να αποδοθεί στα ελληνικά ως «ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας». Έχουμε να κάνουμε λοιπόν, με έναν ενισχυτή φωτός του οποίου η λειτουργία βασίζεται στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής.

Η έννοια της εξαναγκασμένης εκπομπής δόθηκε το 1917 από τον Einstein, (1) κανείς όμως δεν συνειδητοποίησε τότε ότι η έννοια αυτή θα οδηγούσε στη δημιουργία μιας συσκευής ενίσχυσης φωτός. Το 1960 τελικά, ανακαλύφθηκε το πρώτο laser, το laser ρουβι-

νίου, από τον T. Maiman,(2) το πρώτο από μια σειρά εντυπωσιακών συσκευών με μοναδικές ιδιότητες που μεταμόρφωσαν ή δημιούργησαν ολόκληρες περιοχές έρευνας ή τεχνολογίας.(3)

Έξι μήνες μετά την ανακάλυψη του laser ρουβινίου, ο A. Javan και οι συνεργάτες του,(4) πέτυχαν παραγωγή ακτινοβολίας laser από μίγμα αερίων He-Ne. Στο τέλος του 1962 οι M. Nathan,(5) R. Hall (6) και T. Quist (7) πέτυχαν εκπομπή ακτινοβολίας από laser ημιαγωγού. Από τότε η έρευνα προχώρησε με άλματα, και πάρα πολλά άλλα υλικά δοκιμάστηκαν και καθιερώθηκαν ως ενεργά μέσα συστημάτων laser. Μεταξύ αυτών βρίσκει κανείς σήμερα μοριακά ή ιονισμένα αέρια, ημιαγωγούς, συνθετικούς κρυστάλλους με προσμίξεις, διαλύματα χρωστικών κλπ.

3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ LASERS

Για να δημιουργηθεί ακτινοβολία laser, πρέπει να ικανοποιηθούν μερικές πολύ βασικές προϋποθέσεις (8,9). Πρώτα, πρέπει να έχουμε ένα «ενεργό μέσο» που μπορεί να δώσει εκπομπή ακτινοβολίας στο «οπτικό» τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Επίσης πρέπει να δημιουργηθεί μια κατάσταση γνωστή ως «αντιτροφή πληθυσμών». Η κατάσταση αυτή δημιουργείται μόνο μέσα από τη «διεργασία διέγερσης» που είναι περισσότερο γνωστή ως «άντληση». Τέλος, για να δημιουργηθούν συνθήκες για ταλάντωση

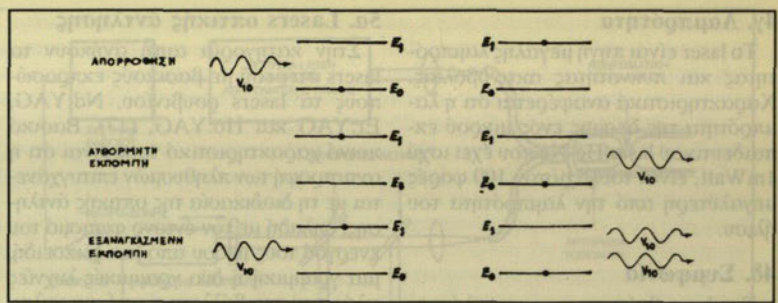
Ο Α.Α. Σεραφετινίδης είναι Αναπληρωτής Καθηγητής στον Τομέα Φυσικής του Γενικού Τμήματος Ε.Μ.Π. Έχει υποσχεθεί στον «ΠΥΡΦΟΡΟ» σειρά άρθρων σχετικά με τα lasers και τις εφαρμογές τους σε φυσική, ιατρική, περιβάλλον, ενεργειακό, οπτικούς υπολογιστές, διάδοση πληροφοριών κ.λπ. Το πρώτο από τα άρθρα αυτά αναφέρεται στις βασικές αρχές των lasers και στις ιατρικές εφαρμογές τους.

laser, δηλαδή για παραγωγή ακτινοβολίας laser, πρέπει να υπάρχει κάποιο είδος «οπτικού αντηχείου» (10,11). Τις τέσσερις βασικές έννοιες: «ενεργό μέσο», «αντιτροφή πληθυσμών», «άντληση» και «οπτικό αντηχείο», θα δούμε στη συνέχεια αναλυτικά.

3α. Ενεργό μέσο και ενεργειακές στάθμες

Το ενεργό μέσο μπορεί να είναι μια συλλογή ατόμων, μορίων ή ιόντων. Ας θεωρήσουμε το πολύ απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα του σχήματος 1, στο οποίο θα εξετάσουμε τις κλασικές διαδικασίες της απορρόφησης και της αυθόρμητης εκπομπής, καθώς και τη νέα διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής που συμβαίνουν στο σύνολο ατόμων του αερίου προτύπου μας. Τα άτομα του αερίου χαρακτηρίζονται από δύο ενεργειακές καταστάσεις, τη βασική μη διεγερμένη κατάσταση E_0 και τη μοναδική διεγερμένη κατάσταση E_1 , με $E_1 > E_0$, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση που αντιστοιχεί σε ενέργεια $E_{10} = E_1 - E_0$, ή σε συχνότητα $\nu_{10} = E_{10}/h$. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας ν_{10} περάσει μέσα στο σύστημα, άτομα της στάθμης E_0 απορροφούν ενέργεια και ανεβαίνουν στη στάθμη E_1 . Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εξαναγκασμένη απορρόφηση ή απλά απορρόφηση. Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει με τα άτομα στη στάθμη E_1 . Παράλληλα με τη διαδικασία απορρόφησης, μια διαδικασία εκπομπής δρα γρήγορα και ξαναγεμίζει τη στάθμη E_0 με άτομα. Η διαδικασία αυτή της επιστροφής των διεγερμένων ατόμων στη στάθμη E_0 , μπορεί να γίνει κατά δύο τρόπους, είτε αυθόρμητα είτε εξαναγκασμένα. Όμως, θα πρέπει να προσέξει κανείς ότι οι δύο διαδικασίες δεν είναι ισοδύναμες αφού κατά τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής τελικά προστίθεται ενέργεια στο εξαναγκάζον κύμα. Δηλαδή, στο φωτόνιο που προκαλεί την εξαναγκασμένη εκπομπή, έρχεται να προστεθεί ένα δεύτερο φωτόνιο του ίδιου μήκους κύματος και της ίδιας φάσης με το αρχικό. Πράγματι, άτομα που εκπέμπουν ακτινοβολία με τη διαδικασία της αυθόρμητης εκπομπής, εκπέμπουν σε τυχαία χρονική στιγμή, ενώ άτομα που εκπέμπουν ύστερα από εξαναγκασμό, εκπέμπουν στην ίδια φάση με την εξαναγκάζουσα ακτινοβολία.

Οι τρεις διαδικασίες που μόλις περιγράψαμε συμβαίνουν ταυτόχρονα σ' ένα σύνολο ατόμων, και όπως έδειξε ο Einstein οι ρυθμοί αυτοί αυτών των μεταπτώσεων συνδέονται μαθηματικά μεταξύ τους (12).



Σχ. 1: Η εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων, η βάση λειτουργίας κάθε laser σε σύγκριση με την εξαναγκασμένη απορρόφηση, και την αυθόρμητη εκπομπή.

Παράπέρα θεωρητική επεξεργασία του θέματος οδηγεί στη σχέση που συνδέει το συντελεστή απορρόφησης ενός υλικού, a , με τη διαφορά πληθυσμών, $(N_1 - N_0)$, δύο τυχαίων ενεργειακών σταθμών E_1 και E_0 με $E_1 < E_0$ και επομένως $N_1 > N_0$ (13, 14). Ο συντελεστής αυτός, επειδή το $(N_1 - N_0)$ είναι θετικό, είναι θετικός και έτσι έχουμε πάντα απορρόφηση ακτινοβολίας από το υλικό μέσο.

3β. Αντιτροφή πληθυσμών και διαδικασία άντλησης

Αν όμως το $(N_1 - N_0)$ γίνει αρνητικό τότε και το a θα γίνει αρνητικό και επομένως, αν μια φωτεινή δέσμη συχνότητας ν_{ij} περάσει μέσα στο σύστημά μας, τότε η δέσμη αυτή θα ενισχυθεί αντί να απορροφηθεί. Η συνθήκη όμως $(N_1 - N_0) < 0$ ποτέ δεν πραγματοποιείται σε συνθήκες θερμοκίνης ισορροπίας, επειδή τότε σύμφωνα με τη στατιστική Boltzmann το N_j μπορεί να πλησιάσει το N_i αλλά δεν μπορεί ποτέ να το υπερβεί. Ο μόνος τρόπος λοιπόν να έχουμε $N_1 > N_0$ είναι να εξωθήσουμε τα άτομα του ενεργού υλικού σε κατάσταση όπου δεν υπάρχει κατανομή θερμοκίνης ισορροπίας, ίσως με χρήση μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας. Η διεργασία αυτή με την οποία τα άτομα διεγείρονται ή αντλούνται και εξωθούνται σε κατανομή μη θερμοκίνης ισορροπίας, ονομάζεται διαδικασία άντλησης, ενώ η κατάσταση $N_1 > N_0$ ονομάζεται αντιτροφή πληθυσμών. Η αντιτροφή πληθυσμών έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση φωτός με τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής.

3γ. Οπτικά αντηχεία

Κατ' ευθείαν εφαρμογή του φαινομένου της ενίσχυσης με εξαναγκασμένη εκπομπή έχουμε μόνο σε ενισχυτές μιας διέλευσης (15), συσκευές που δέχονται στην είσοδο μια ακτίνα laser και την ενισχύουν μονόδρομα. Τέτοια συστήματα laser χρησιμοποιούνται σημε-

ρα, δεν αποτελούν όμως κοινή πρακτική. Στα περισσότερα lasers η ακτίνα παλινδρομεί πολλές φορές μέσα στο ενεργό υλικό χάρις σ' ένα ζευγάρι από κάτοπτρα που τοποθετούνται κάθετα στον οπτικό άξονα του laser, όπως δείχνει το σχήμα 2. Μ' ένα τέτοιο σύστημα κατόπτρων το ενεργό μήκος του ενισχυτού μας πολλαπλασιάζεται πολλές φορές. Το σύστημα αυτό των δύο κατόπτρων, ενός ολικά και ενός μερικώς ανακλαστικού, αποτελεί το σύστημα οπτικής ανατροφοδότησης των lasers και σε πολλές περιπτώσεις τον επιλογέα συχνότητας λειτουργίας τους (16).

4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ LASER

Εκείνο που έκανε το laser μια από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις της επιστήμης των τελευταίων χρόνων, είναι οι μοναδικές ιδιότητες της ακτινοβολίας του, που περιληπτικά αναφέρονται παρακάτω.

4α. Μονοχρωματικότητα

Η πιο σημαντική, ίσως, ιδιότητα της ακτινοβολίας laser, είναι η μονοχρωματικότητά της. Αν και καμιά πηγή φωτός δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα μονοχρωματική, το laser δίνει σίγουρα την καλύτερη υπαρκτή προσέγγιση προς το ιδανικό μονοχρωματικό φως.

4β. Κατευθυντικότητα

Κριτήριο κατευθυντικότητας κάθε φωτεινής δέσμης είναι το άνοιγμά της που ορίζεται από το διπλάσιο της γωνίας που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης με την κεντρική της ακτίνα και εκφράζεται σε mrad. Για ένα κλασικό μικρό laser το άνοιγμα της δέσμης του είναι περίπου 1 mrad, που αντιστοιχεί σε αύξηση της διαμέτρου της δέσμης του, μόνο κατά 1mm ανά μέτρο διαδρομής.

4γ. Λαμπρότητα

Το laser είναι πηγή μεγάλης λαμπρότητας και πυκνότητας ακτινοβολίας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η λαμπρότητα της δέσμης ενός μικρού εκπαιδευτικού laser He-Ne που έχει ισχύ 1mWatt, είναι τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη από την λαμπρότητα του ήλιου.

4δ. Συμφωνία

Στο laser βρίσκουμε τον υψηλότερο δυνατό βαθμό συμφωνίας από οποιαδήποτε άλλη φωτεινή πηγή. Αν μια φωτεινή πηγή είναι απόλυτα σύμφωνη και στο χώρο και στο χρόνο, τότε μπορούν να προβλεφθούν το πλάτος και η φάση της ακτινοβολίας της σε οποιοδήποτε

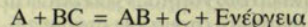
5α. Lasers οπτικής άντλησης

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα lasers στερεού με βασικούς εκπροσώπους τα lasers ρουβινίου, Nd:YAG, Er:YAG και Ho:YAG, (17). Βασικό κοινό χαρακτηριστικό τους είναι ότι η αντιστροφή των πληθυσμών επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της οπτικής άντλησης, δηλαδή με τον έντονο φωτισμό του ενεργού τους μέσου από μια ελικοειδή, μια γραμμική ή δύο γραμμικές λυχνίες φλάς που περιβάλλονται από μια κυλινδρική ή ελλειπτική ή διπλά ελλειπτική υψηλής ανακλαστικότητας μεταλλική ή διηλεκτρική επιφάνεια ανακλαστήρα. Άλλα χαρακτηριστικά της κατηγορίας αυτής, είναι η υψηλή ισχύς εξόδου, συνήθως της τάξης των MWatts σε παλμική

ρίτου 30 KVolts, ενώ το ρεύμα λειτουργίας τους από μερικά mAmpères έως αρκετά Ampères. Η πίεση λειτουργίας τους ποικίλει επίσης και μπορεί να είναι από μερικά Torr έως μερικές ατμόσφαιρες, ενώ η ισχύς εξόδου τους από μερικά Watts σε συνεχή λειτουργία μέχρι και αρκετά MWatts σε παλμική λειτουργία. Τελευταίες εξελίξεις των lasers ηλεκτρικής εκκένωσης αποτελούν τα TEA lasers, (Transverse Excitation Atmospheric pressure), (1), τα lasers ημιαγωγίων ηλεκτροδίων, (20) και τα lasers ημιαγωγίου προδίοιςμου (21, 22).

5γ. Χημικά lasers

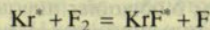
Στη κατηγορία αυτή ανήκουν τα πολύ ενδιαφέροντα lasers της σειράς HX, δηλαδή τα lasers HF, DF, HCl, HBr, DBr, και το CO. Η αντιστροφή πληθυσμών στην περίπτωση αυτών των lasers είναι άμεσο ή έμμεσο αποτέλεσμα μιας εξώθερμης χημικής αντίδρασης (που ξεκινά με τη βοήθεια μιας ηλεκτρικής εκκένωσης), του τύπου:



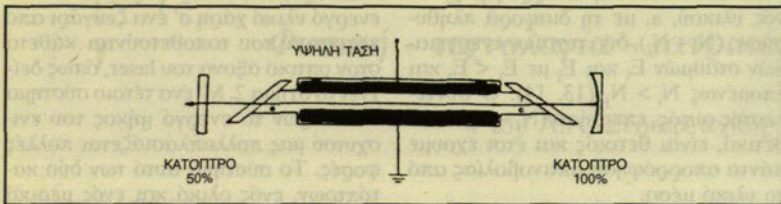
όπου η απελευθερούμενη από την αντίδραση ενέργεια διεγείρει το μόριο AB και το μετατρέπει σε διεγερμένο μόριο AB. Το AB αποτελεί το ενεργό υλικό του laser. Οι μεταπτώσεις laser αυτής της κατηγορίας είναι περιστροφικού-δονητικού τύπου, (8), και τα αντίστοιχα μήκη κύματος εκπομπής τους βρίσκονται στην περιοχή του υπεριώθρου και συγκεκριμένα μεταξύ 3.0 και 8.0μm. Μπορούν να λειτουργήσουν συνεχώς ή παλμικά και μάλιστα με πολύ υψηλές αποδόσεις, (23).

5δ. Lasers διεγερμένων διμερών

Πρόκειται για μια σχετικά νέα, αλλά πολλά υποσχόμενη κατηγορία lasers που εκπέμπει παλμικές δέσμες στην περιοχή του υπεριώδους, (24). Ανήκουν σ' αυτήν τα lasers ArF, KrF, XeCl και XeF. Οι διαδικασίες άντλησης και αντιστροφής πληθυσμών για τα lasers αυτά είναι πολύπλοκες και μόνο πολύ επιφανειακά μπορούν να δοθούν από αντιδράσεις του τύπου:



Ο συνήθης τρόπος διεγερσης αυτών των lasers είναι η ηλεκτρική εκκένωση, και συνελώς η τεχνολογία τους είναι



Σχ. 2: Κλασικό οπτικό αντηχείο laser που αποτελείται από κάτοπτρο ολικής ανακλαστικότητας, (100%) και κάτοπτρο μερικής ανακλαστικότητας, (50%).

σημείο του χώρου σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή ή σε οποιοδήποτε χρόνο για κάποιο δεδομένο σημείο του χώρου.

4ε. Πόλωση

Το φως των κλασικών φωτεινών πηγών συμπεριφέρεται ως μη πολωμένο ή τυχαία πολωμένο. Αντίθετα, πολλά lasers παράγουν πολωμένο φως. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η ακτινοβολία τους έχει και αυτή την ιδιότητα σαν χαρακτηριστικό της. Στην πράξη η πόλωση της δέσμης του laser επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός οπτικού πολωτικού στοιχείου που τοποθετείται μέσα στο οπτικό αντηχείο. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά τα στοιχεία είναι οπτικές επιφάνειες σε γωνίες πόλωσης, (γωνίες Brewster), πρίσματα, οπτικά φραγάματα, πολωτές κλπ.

5. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ LASERS

Θα μπορούσαμε να κατατάξουμε τα διάφορα lasers σε κατηγορίες σύμφωνα με το είδος του ενεργού υλικού τους, την περιοχή εκπομπής τους ή την ισχύ της δέσμης τους. Ο πιο συνηθισμένος όμως και πιο σαφής διαχωρισμός τους είναι αυτός που βασίζεται στον τρόπο διεγερσης του ενεργού υλικού τους, και αυτόν θα ακολουθήσουμε στα επόμενα.

λειτουργία, και η δυνατότητα παραγωγής παλμών πολύ μικρής χρονικής διάρκειας, της τάξης του nsec, (10^{-9} secs), ή και ακόμα του psec, (10^{-12} secs).

5β. Lasers ηλεκτρικής εκκένωσης

Στην κατηγορία αυτή, (18, 19), ανήκουν τα lasers των ατομικών, μοριακών ή ιοντικών αερίων. Μπορούν να λειτουργήσουν συνεχώς ή παλμικά. Η περιοχή μήκους κύματος εκπομπής τους αρχίζει από το υπεριώδες και φτάνει μέχρι το μακροπύρηντρο. Αντιπροσωπευτικά lasers της κατηγορίας αυτής είναι τα lasers He-Ne, CO₂, N₂, H₂O, Ar⁺, Kr⁺ κλπ. Στα lasers αυτά, η διεγερση είναι αποτέλεσμα μια ηλεκτρικής εκκένωσης. Ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από μια μεγάλη διαφορά δυναμικού, συγκρούονται με τα άτομα, μόρια ή ιόντα του ενεργού υλικού και τα διεγείρουν. Αν και η αρχή είναι πάντα η ίδια, υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρικών εκκένωσης, που οφείλονται στους διάφορους δυνατούς συνδυασμούς του οπτικού άξονα του laser και της διεύθυνσης της ροής του ρεύματος της ηλεκτρικής εκκένωσης. Λόγω της ποικιλίας των μορφών laser ηλεκτρικής εκκένωσης, η τάση λειτουργίας τους ποικίλει από 1KVolt έως πε-

ανάλογη των lasers ηλεκτρικής εκκένωσης.

5ε. Lasers που διεγείρονται από άλλα lasers

Για τα lasers αυτής της κατηγορίας, (1), η εξωτερική αντλούσα πηγή είναι ένα άλλο laser. Με τα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται η παραγωγή γραμμών στο μακροπύρετρο με τη χρήση «αντλίας» υπερύθρου ή στο υπεριώδες και ορατό κυρίως, με χρήση «αντλίας» ορατού (lasers χρωστικών). Κλασικός συνδυασμός για την πρώτη περίπτωση είναι «αντλία» laser CO₂ (10.6 μm) - αντλούμενο laser CH₃OH (40μm-2000μm), ενώ για την δεύτερη, «αντλία» laser ιόντων αργού (0.49μm) -αντλούμενο laser κουμαρίνης 6G, (0.52μm-0.56μm).

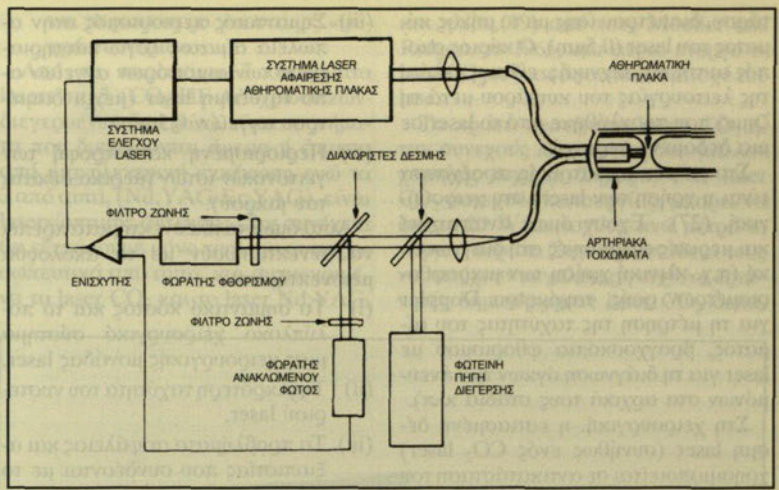
5στ. Lasers ημιαγωγών

Είναι τα πιο μικρά lasers που διαθέτουμε σήμερα και μπορούν να παραχθούν σε μεγάλες ποσότητες χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή διόδων και τρανζίστορ(9,13). Λόγω του μικρού μεγέθους τους και της υψηλής απόδοσής τους, είναι οι πιο κατάλληλες πηγές για τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών.

Μπορούμε να πετύχουμε αντιστροφή πληθυσμών σε μια επαφή p-n, που είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος laser ημιαγωγού, δηλαδή μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας από τον αριθμό των οπών στη ζώνη σθένους, στην οριακή περιοχή της επαφής, με ηλεκτρονικές μεθόδους και να δημιουργήσουμε ακτινοβολία laser. Στην περίπτωση αυτής της εξαναγκασμένης εκπομπής, η διάδος λέγεται κρυσταλλοδιόδος laser. Αντίθετα, αν η εκπομπή είναι αυθόρμητη, τότε η διάδος λέγεται κρυσταλλοδιόδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode-LED). Στις πιο ευρύτερα χρησιμοποιούμενες σήμερα κρυσταλλοδιόδους laser, περιλαμβάνεται η κρυσταλλοδιόδος AlGaAs που εκπέμπει στα 0.82μm.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ LASERS

Οι εφαρμογές των lasers είναι ήδη πολυάριθμες και καλύπτουν διάφορες επιστημονικές και τεχνολογικές περιοχές, περιλαμβανομένων της φυσικής, χημείας, βιολογίας, ηλεκτρονικής και ιατρικής. Οι εφαρμογές αυτές είναι προφανώς άμεση συνέπεια των ειδικών χαρακτηριστικών της δέσμης laser που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4. Στην παράγραφο αυτή, απλά αναφέρουμε ότι έχουμε εφαρμογές των lasers



Σχ. 3: Αφαίρεση αθηρωματικής πλάκας με χρήση ακτινοβολίας laser που μεταφέρεται μέσα στην αρτηρία με οπτική ίνα μικρής διαμέτρου. Παράλληλα με αυτήν υπάρχει και οπτική ίνα παρατήρησης.

σε φυσική, χημεία, βιολογία, ιατρική, επεξεργασία υλικών, οπτικές επικοινωνίες, μέτρηση και εξέταση, ενεργειακό, αμυντική τεχνολογία, ολογραφία, διάδοση πληροφοριών, οπτικούς υπολογιστές, περιβάλλον κ.λπ. και θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στις εφαρμογές των lasers σε βιολογία και ιατρική.

6α. Εφαρμογές των lasers σε βιολογία και ιατρική

Η χρήση των lasers σε βιολογικές και ιατρικές εφαρμογές αυξάνεται διαρκώς. Εδώ το laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως διαγνωστικό εργαλείο είτε για τη δημιουργία μη αντιστρεπτών μεταβολών του βιομορίου του κυττάρου ή του ιστού (φωτοβιολογία laser και χειρουργική laser).

Στη βιολογία τα laser χρησιμοποιούνται κυρίως ως διαγνωστικό εργαλείο. Θα αναφερθούμε εδώ στις ακόλουθες βασικές τεχνικές, (25):

- (i) φθορισμός που προκαλείται στο DNA σε σύμπλοκα χρωστικής-DNA και σε χρωστικές που εμπλέκονται στη φωτοσύνθεση, από πάλμους laser πολύ μικρής χρονικής διάρκειας,
- (ii) συντονιστική σκέδαση Raman για τη μελέτη βιομορίων, όπως αιμοσφαιρίνη ή ροδοψίνη (η οποία είναι και υπεύθυνη για το μηχανισμό της όρασης),
- (iii) φασματοσκοπία συσχετισμού φωτονίων για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με τη δομή και το βαθμό συγκέντρωσης διαφόρων βιομορίων,

(iv) μέθοδος φωτόλυσης με έκλαμψη διάρκειας psecs, (10⁻¹² secs), για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των βιομορίων σε διεγερμένη κατάσταση.

Θα πρέπει να αναφέρουμε ειδικότερα τα επανομαζόμενα μικροφθοριόμετρα ροής. Στην περίπτωση αυτή, εναιώρημα από κύτταρα θηλαστικών ζώων αναγκάζεται να περάσει μέσα από ένα ειδικό θάλαμο ροής, όπου τα κύτταρα ευθυγραμμίζονται και μετά περνούν ανά ένα από την εστιασμένη δέσμη ενός laser Ar⁺. Με την κατάλληλη τοποθέτηση φωτοφωρατών, μπορούμε να μετρήσουμε:

- (i) το φως που σκεδάζεται από το κύτταρο (κάτι που μας δίνει πληροφορίες για το μέγεθος του κυττάρου),
- (ii) τον φθορισμό της χρωστικής που είναι συνδεδεμένη μ' ένα ειδικό συστατικό του κυττάρου, π.χ. του DNA (κάτι που μας δίνει πληροφορίες για την ποσότητα αυτού του συστατικού). Το πλεονέκτημα της μικροφθοριόμετρικής ροής είναι ότι προσφέρει τη δυνατότητα μετρήσεων μεγάλου αριθμού κυττάρων σε μικρό χρονικό διάστημα (η ροή του κυττάρου είναι τυπικά 5 × 10⁴ κύτταρα/λεπτό). Αυτό συνεπάγεται μια καλή στατιστική ακρίβεια μέτρησης.

Στον τομέα της βιολογίας τα laser χρησιμοποιούνται επίσης για τη δημιουργία μη αντιστρεπτών μεταβολών ενός δεδομένου βιομορίου ή συστατικού του κυττάρου. Ειδικά αναφέρουμε τις επανομαζόμενες τεχνικές μικροδέσμης, (26). Εδώ η δέσμη laser (π.χ. ένα παλμικό laser Ar⁺) εστιάζεται με τη χρήση κατάλληλου αντικειμενικού μικροσκοπίου σε μια περιοχή του κυτ-

τάρον, διαμέτρου ίσης με το μήκος κύματος του laser (0.5μm). Ο κύριος σκοπός αυτής της τεχνικής, είναι η μελέτη της λειτουργίας του κυττάρου μετά τη ζημιά που προκλήθηκε από το laser σε μια δεδομένη περιοχή.

Στον τομέα της ιατρικής, προέχουσα είναι η χρήση των lasers στη χειρουργική, (27). Έχουν όμως αναπτυχθεί και μερικές εφαρμογές στη διαγνωστική (π.χ. κλινική χρήση των μικροφθοριόμετρων ροής, ταχύμετρα Doppler για τη μέτρηση της ταχύτητας του αίματος, βρογχοσκοπία φθορισμού με laser για τη διάγνωση όγκων των πνευμόνων στα αρχικά τους στάδια κλπ).

Στη χειρουργική, η εστιασμένη δέση laser (συνήθως ενός CO₂ laser) χρησιμοποιείται σε αντικατάσταση του κλασικού νυστεριού. Η υπέρυθρη δέση του laser CO₂ απορροφάται έντονα από τα μόρια του νερού των ιστών, προκαλώντας έντονη εξάτμιση των μορίων αυτών, κάτι που έχει ως επακόλουθο την αποκοπή του ιστού. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση της δέσης laser ως χειρουργικού νυστεριού, συνοψίζονται στα εξής:

(iii) Σημαντικός περιορισμός στην απώλεια αίματος λόγω καυτηριασμού των αιμοφόρων αγγείων από τη δέση laser (μέχρι διαμέτρου αγγείων 0.5mm)

(iv) Περιορισμένη καταστροφή των γειτονικών ιστών (μερικά δέκατα του μικρού).

Αυτά όμως τα πλεονεκτήματα πρέπει να συνεκτιμηθούν με τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

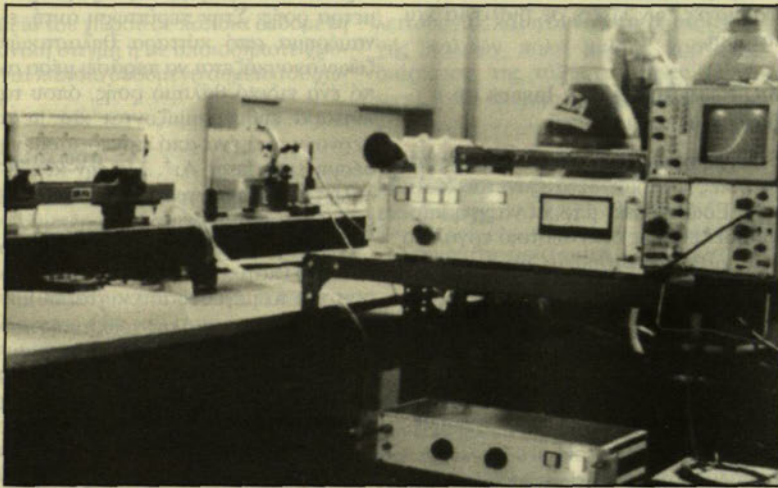
(i) Το σημαντικό κόστος και το πολύπλοκο χειρουργικό σύστημα μιας χειρουργικής μονάδας laser,

(ii) Τη μικρότερη ταχύτητα του νυστεριού laser,

(iii) Τα προβλήματα ασφαλείας και αξιοπιστίας που συνδέονται με το νυστέρι laser.

Μετά την αναφορά στα γενικά αυτά στοιχεία για τη χειρουργική με laser, μπορούμε τώρα να δώσουμε μερικές ακόμα πληροφορίες που αφορούν αρκετές από αυτές τις εφαρμογές. Στην οφθαλμολογία το laser χρησιμοποιείται ήδη εδώ και αρκετό καιρό για τη θεραπεία της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδή και τη θεραπεία των δια-

να ιδιαίτερα ελκυστική στον τομέα αυτό της χειρουργικής, επειδή ακριβώς ασχολείται με όργανα τέτοια, όπως η τραχεία, ο φάρυγγας και το μέσο αυτί, στα οποία η αδυναμία προσπέλασης κάνει δύσκολη την εγχείριση. Συχνά στις περιπτώσεις αυτές, το laser χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μικροσκοπία. Το laser έχει φανεί επίσης χρήσιμο στη χειρουργική του στόματος (π.χ. για την αφαίρεση θηλωμάτων ή όγκων). Τα βασικά πλεονεκτήματα εδώ, είναι η αμύδραση, η έλλειψη μεταχειρητικού οιδήματος και πόνου και η γρήγορη ανάρρωση του ασθενούς. Το laser επίσης αποδείχθηκε χρήσιμο σε θεραπεύσιμες περιπτώσεις μεγάλης αιμορραγίας τραύματος του γαστρονυεοκοιλιακού συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, η δέση laser (συνήθως Nd:YAG ή Ar⁺) κατευθύνεται στην προς θεραπεία περιοχή, μ' ένα ειδικό οπτικό αγωγό τοποθετημένο μέσα σ' ένα σύνθετο γαστροσκοπίο. Το laser εμφανίζεται επίσης να υπόσχεται πολλά στη γυναικολογία όπου τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μικροσκοπία (κολποσκοπία). Ο σημαντικός περιορισμός οδήγηματος και πόνου είναι και πάλι ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του νυστεριού laser. Στη δερματολογία, τα laser χρησιμοποιούνται συχνά για την αφαίρεση των τατουάζ και για τη θεραπεία ορισμένων ασθενειών των αιμοφόρων αγγείων (π.χ. ερυθροχρωματικές κηλίδες). Επίσης, η χρήση των lasers σε μερικές περιπτώσεις γενικής χειρουργικής και χειρουργικής όγκων, εμφανίζεται να υπόσχεται πολλά(28). Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούν οι πολύ σημαντικές εφαρμογές των lasers στην αγγειοπλαστική, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορατά υπερυπόδη ή υπέρυθρα lasers, και η χρήση των ακτίνων laser για την αφαίρεση των αθηρωματικών πλακών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3, με τη βοήθεια οπτικών ινών που και την παρατήρηση της πλάκας εξυπηρετούν και αποτελούν τον οδηγό της ακτινοβολίας laser στο σημείο εφαρμογής της.



Σχ. 4 : Εργαστηριακό laser N₂ κατασκευής Ε.Μ.Π., σε λειτουργία.

(i) Η τομή μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια, ειδικά όταν η δέση κατευθύνεται μέσα από ένα κατάλληλο μικροσκοπίο (μικροχειρουργική laser).

(ii) Παρέχεται η δυνατότητα για την εγχείριση και μη προσπελάσιμων περιοχών. Έτσι στην πράξη, οποιαδήποτε περιοχή του σώματος που μπορεί να παρατηρηθεί με κάποιο κατάλληλο οπτικό σύστημα (π.χ. με φακούς ή κάτοπτρα) μπορεί να χειρουργηθεί με laser.

βητικών παθήσεων του αμφιβληστροειδή(27). Στην περίπτωση αυτή η δέση laser (συνήθως Ar⁺), εστιάζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα μέσα από το φακό του ματιού. Η πράσινη δέση του laser απορροφάται έντονα από τα ερυθρά αιμοσφαίρια, και το θερμικό φαινόμενο που ακολουθεί μπορεί να οδηγήσει σε συγκόλληση του αμφιβληστροειδή ή την πήξη των αγγείων του. Το laser βρίσκει τώρα συνεχώς αυξανόμενη χρήση στην ωτορινολαρυγγολογία. Η χρήση του laser εί-

6β. Lasers ιατρικών εφαρμογών και χαρακτηριστικές ιδιότητές τους.

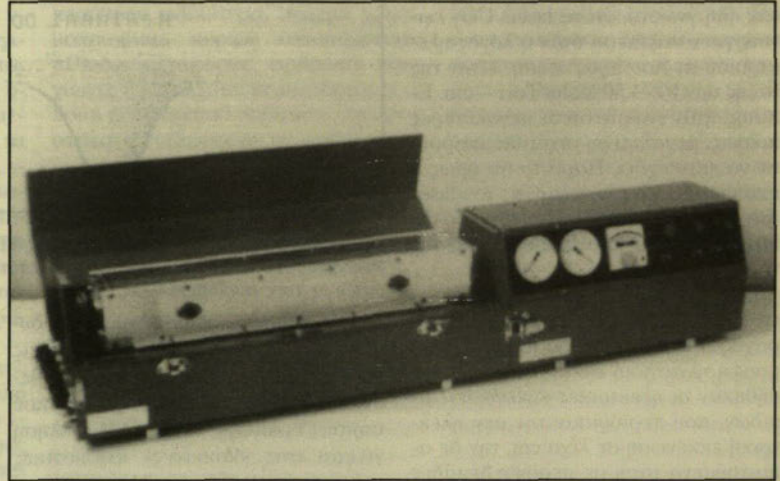
Στη σύντομη αναφορά μας στις εφαρμογές των lasers στην ιατρική, φάνηκε ότι μερικά lasers χρησιμοποιούνται περισσότερο από άλλα. Αυτά είναι κυρίως τα lasers CO₂, Nd:YAG, Ar⁺ αλλά και τα πολλά υποσχόμενα lasers χρωστικών και lasers διεγερμένων διμερών. Υπάρχουν όμως και άλλα που θεωρούνται σήμερα κλασικά

lasers ιατρικών εφαρμογών, (8). Συνοπτική περιγραφή των πιο γνωστών ιατρικών lasers και των κυρίων χαρακτηριστικών τους γίνεται παρακάτω:

1. Laser CO₂, κλασικό laser ηλεκτρικής εκκένωσης, με περιοχή εκπομπής το υπέρυθρο, (10.6μm), δυνατότητα συνεχούς ή παλμικής λειτουργίας, έντονα θερμικά αποτελέσματα, πολύ έντονη απορρόφηση της ακτινοβολίας του από τους ιστούς, αλλά και δυσκολία προσαρμογής του στα υπάρχοντα οπτικά συστήματα και τους οπτικούς κυματοδηγούς, (29).
2. Laser HF, χημικό laser ηλεκτρικής εκκένωσης, με περιοχή εκπομπής τα 2.9μm. Λειτουργεί παλμικά, απορροφάται έντονα από τους ιστούς και δημιουργεί πολύ έντονα αλλά μόνο τοπικά θερμικά αποτελέσματα και μπορεί να προσαρμοστεί σχετικά εύκολα σε οπτικούς κυματοδηγούς ή οπτικές ίνες, (30).
3. Laser Er:YAG, παλμικό laser οπτικής άντλησης με μήκος κύματος εκπομπής τα 2.9μm και ιδιότητες ανάλογες με αυτές του laser HF λόγω της ταυτότητας του μήκους κύματός τους, (31).
4. Lasers Nd:YAG, κλασικά lasers οπτικής άντλησης με μήκος κύματος εκπομπής τα 1.06μm. Λειτουργούν συνεχώς ή παλμικά και είναι απόλυτα συμβαστά με υπάρχουσες οπτικές διατάξεις, οπτικούς κυματοδηγούς και οπτικές ίνες.
5. Laser Ag⁺, συνεχές ή παλμικό laser ηλεκτρικής εκκένωσης, με εκπομπή ακτινοβολίας στο ορατό μέρος του φάσματος και κυρίως στα 0.514μm.
6. Lasers χρωστικών, lasers συνεχής ή παλμικά αντλούμενα από άλλα lasers (συνήθως Ag⁺ ή Kr⁺) ηλεκτρικής εκκένωσης. Έχουν τη δυνατότητα παραγωγής πολλών μηκών κύματος στο ορατό ή υπεριώδες μέρος του φάσματος, με πιο σημαντικό από αυτά το μήκος κύματος των 0.465μm.
7. Lasers διεγερμένων διμερών XeCl (0.308μm) και KrF (0.249μm). Παλμικά lasers διεγερμένων διμερών ηλεκτρικής εκκένωσης με μήκος κύματος εκπομπής στο υπεριώδες μέρος του φάσματος. Λόγω του μήκους κύματος εκπομπής τους και σε αντίθεση με τα lasers υπέρυθρου δεν δημιουργούν έντονα θερμικά φαινόμενα και εί-

να περισσότερο γνωστά ως «φωχρά νυστέρια».

Από τα παραπάνω 7 συστήματα lasers τα 5 (CO₂-HF-Ag⁺-χρωστικών- διεγερμένων διμερών), είναι συστήματα που διεγείρονται άμεσα ή έμμεσα από μια ηλεκτρική εκκένωση ενώ τα 2 από αυτά, (Nd:YAG-Er:YAG), είναι lasers οπτικής άντλησης. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε μόνο τα 2 πιο αντιπροσωπευτικά από αυτά, και συγκεκριμένα το laser CO₂ και το laser Nd:YAG.



Σχ.5: Παλμικό laser CO₂ ή N₂ τύπου ημιαγώγιμου προϊόνσιμου, (21), που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιείται στο Ε.Μ.Π. σε προβλήματα βιοϊατρικών εφαρμογών, (laser πιλοτικής παραγωγής 6X).

6γ. Το laser CO₂

Το 1964 οι Patel et al, (29), έδειξαν ότι η παρουσία μιάς ηλεκτρικής εκκένωσης μέσα σε CO₂ χαμηλής πίεσης μπορούσε να δημιουργήσει αντιστροφή πληθυσμών στα διεγερμένα επίπεδα ταλάντωσης - περιστροφής του αερίου, και με τη βοήθεια ενός κατάλληλου οπτικού αντηχείου να οδηγήσει σε εκπομπή ακτινοβολίας laser σε δύο περιοχές μηκών κύματος, γύρω στα 9.6μm και 10.6μm.

Τα πρώτα πειράματα έδωσαν πολλές λεπτομέρειες για το φάσμα εκπομπής του CO₂ laser, τόσο κάτω από συνθήκες συνεχούς όσο και κάτω από συνθήκες παλμικής λειτουργίας, αλλά η ισχύς laser που πέτυχαν ήταν της τάξης του mWatt σε συνεχή λειτουργία και μόνο μια μικρή αύξηση παρατηρήθηκε κάτω από συνθήκες παλμικής λειτουργίας. Αποτελέσματα ήταν να μη δοθεί μεγάλη προσοχή στο laser του CO₂ αρχικά και να μη γίνει αντιληπτό αμέσως το τι τεράστια περιθώρια εφαρμογών είχε. Σύντομα όμως, η προσθήκη αζώτου, (18) από τους Patel et al, το 1964

και ηλίου, (19) από τους Moeller and Ridgen, το 1965, στο αέριο ενεργό υλικό CO₂ αύξησε δραστικά την ισχύ του laser.

Τα πρώτα συστήματα lasers CO₂ ήταν συνεχούς λειτουργίας και μάλλον χαμηλής ισχύος. Σήμερα, ένα laser CO₂ συνεχούς λειτουργίας, μπορεί να δώσει 20 Watts ισχύος ανά μέτρο ενεργού αερίου. Στην προσπάθειά τους να πετύχουν μεγαλύτερη ισχύ, οι ερευνητές δημιούργησαν laser CO₂ δεκά-

δων μέτρων μηκους, με ισχύ εξόδου συνεχώς μέχρι και μερικές δεκάδες KWatts.

Παράλληλα με την προσπάθεια ανάπτυξης των lasers CO₂ συνεχούς λειτουργίας προχώρησε και η προσπάθεια δημιουργίας παλμικών lasers, ώστε να επιτευχθεί και μεγαλύτερη ισχύς και μικρή διάρκεια παλμού. Αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής είναι η εφαρμογή των τεχνικών Q-switching, mode locking, TEA, κλπ. στα CO₂ lasers.

1. *Τεχνική Q-switching.* Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1966 από τους Kovacs et al. και δημιούργησε παλμούς laser ισχύος 10KWatts ανά μέτρο ηλεκτρικής εκκένωσης, με διάρκεια παλμού από μερικά δέκατα του msec έως μερικά μsecs (18).

Η τεχνική Q-switching μπορεί πολύ εύκολα να εφαρμοστεί σε ένα CO₂ laser συνεχούς λειτουργίας. Πρακτικά αυτό γίνεται με την αντικατάσταση του ενός κατόπτρου του οπτικού αντηχείου του laser με ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο.

2. Η τεχνική *mode locking*. Η τεχνική αυτή δημιούργησε παλμούς με πολύ μεγάλη ισχύ και πάρα πολύ μικρή χρονική διάρκεια. Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής (που εξαναγκάζει τους διαμήκεις τρόπους της ταλάντωσης laser να διατηρούν ορισμένη σχέση φάσης μεταξύ τους), έδωσε τη δυνατότητα παραγωγής παλμών, διάρκειας της τάξης των psecs και από τα CO₂ lasers.

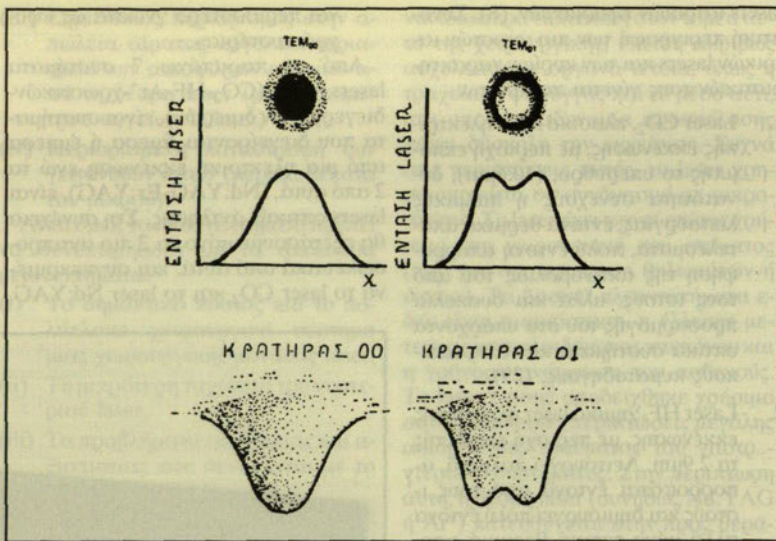
3. TEA CO₂ lasers. Το 1970 η τεχνική TEA εφαρμόστηκε στα CO₂ lasers και δημιούργησε μια νέα κατάσταση. Ήταν ήδη γνωστό, ότι τα lasers CO₂ λειτουργούν καλύτερα όταν ο λόγος ηλεκτρικού πεδίου προς πίεση, είναι της τάξης των 10 → 50 Volts/Torr - cm. Επίσης, ήταν γνωστό ότι σε μεγαλύτερες πιέσεις, μεγαλύτερη ισχύς θα μπορούσε να επιτευχθεί. Παρά το ότι όμως η επιθυμητή πίεση λειτουργίας του laser ήταν η ατμοσφαιρική, ήταν φανερό ότι κάτι τέτοιο θα απαιτούσε τάσεις της τάξης των 10⁶ Volts.

Επειδή τέτοιες τάσεις είναι δύσκολο να παραχθούν αλλά και αν ακόμα παραχθούν δεν θα οδηγήσουν σε ομοιόμορφη ηλεκτρική εκκένωση, δημιουργήθηκαν οι ηλεκτρικές εκκένώσεις ακίδων, που περιόρισαν την μεν ηλεκτρική εκκένωση σε λίγα cm, την δε απαιτούμενη τάση σε μερικές δεκάδες KVolts. Στην ίδια κατηγορία CO₂ laser TEA, ανήκουν και τα CO₂ lasers διπλής εκκένωσης που κατασκευάστηκαν αργότερα από τον La Flamme, τα TEA CO₂ lasers με ηλεκτρόδια Ge, χωρίς προϊονισμό, από τους Serafetinides και Hall, με συνδυασμό ηλεκτροδίων ημιαγωγών, Blumlein PFN και Marx Generator από τους Slade και Serafetinides, (20) κλπ.

Τελευταία εξέλιξη των lasers CO₂ αποτελούν τα lasers ημιαγωγίμου προϊονισμού που ανέπτυξαν οι Serafetinides et al., τα οποία εμφανίζουν ιδιαίτερα καλές επιδόσεις και τεχνικά χαρακτηριστικά(21). Ένα τέτοιο εργαστηριακό laser N₂ κατασκευής ΕΜΠ, φαίνεται στο σχήμα 4 σε λειτουργία, ενώ στο σχήμα 5 φαίνεται το τελικό βιομηχανικό πρότυπο laser CO₂ ή N₂, το οποίο στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του ΕΜΠ, προχώρησε σε πιλοτική παραγωγή και κατασκευάστηκε σε 6 μονάδες για την κάλυψη των ερευνητικών αναγκών των Πανεπιστημίων Πάτρας, Θεσσαλονίκης, Ιωαννίνων, ΕΑΒ, ΚΕΤΑ και ΕΜΠ.

6δ. Το laser Nd:YAG

Το ενεργό υλικό του laser Nd:YAG είναι το νεοδύμιο, (Nd). Τα ιόντα του μπορούν να αποτελέσουν προομίξεις σε διάφορους κρυστάλλους και έτσι να



Σχ. 6: Αποτυπώσεις τρόπων ταλάντωσης TEM₀₀ και TEM₀₁, κατανομή έντασης δέσμης laser για τους τρόπους αυτούς και οι επιπτώσεις τους στη μορφή των κρατήρων των ιστών με τους οποίους αλληλεπιδρούν.

δημιουργήσουν σειρά lasers νεοδυμίου. Συνήθως, αποτελούν προομίξεις σε κρυστάλλους βολφραμικού ασβεστίου (CaWO₄), γυαλιού ή αργιλικού υτρίου (Y₃Al₅O₁₂ - YAG). Η άντληση γίνεται στις «κόκκινες» φασματικές γραμμές απορρόφησης. Η αντιστροφή πληθυσμών είναι εύκολη και η απολαβή του laser μεγάλη. Η λειτουργία του Nd:YAG είναι παλμική ή συνεχής, ανάλογα με την ηλεκτρική τροφοδοσία του. Αν αφαιρεθεί το laser Nd:YAG να λειτουργήσει χωρίς εξωτερική επέμβαση, τότε θα δώσει φωτεινή ακτινοβολία που έχει τη μορφή παλμοσειράς (free lasing). Αν όμως η κεφαλή laser Nd:YAG περιλαμβάνει και υπομονάδα Q-switching ή mode locking (όχι με περιστρεφόμενα κάτοπτρα αλλά με ηλεκτροοπτικές υπομονάδες Pockels), τότε θα δώσει φωτεινή ακτινοβολία με τη μορφή καθαρών παλμών Gaussian με πολύ μεγάλη ισχύ της τάξης του MWatt (για ιατρικές εφαρμογές) ή GWatt (για άλλες εφαρμογές) και πολύ μικρή χρονική διάρκεια, της τάξης των nsecs ή και psecs.

7. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ LASERS ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Μεταξύ των βασικών χαρακτηριστικών των lasers, που κατοχυρώνουν ή όχι, την καταλληλότητα τους για τη συγκεκριμένη ιατρική τους εφαρμογή, περιλαμβάνονται:

7α. Μέγεθος, ενέργεια, ισχύς και κατανομή δέσμης laser

Η δέση laser που παράγεται από το ενεργό υλικό, συνήθως στις περιπτώσεις ιατρικών εφαρμογών, εστιάζεται μ' ένα κατάλληλο οπτικό σύστημα σε μια μικρή κηλίδα ελάχιστης διαμέτρου d που δίνεται από τον τύπο $d = 4 \cdot f \cdot \lambda / \pi D$, όπου f είναι η εστιακή απόσταση του εστιάζοντος οπτικού συστήματος, D είναι η διάμετρος της μη εστιασμένης δέσμης και λ το μήκος κύματος εκπομπής του laser.

Η κατανομή τώρα έντασης της δέσμης laser θα αντικατοπτρίζεται στη μορφή του κρατήρα που θα δημιουργηθεί στον ιστό, κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης και του ιστού, όπως φαίνεται στο σχήμα 6, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στις εφαρμογές των lasers στην ιατρική γενικότερα και στη χειρουργική και λεπτοχειρουργική ειδικότερα (27). Τέλος κριτήριο επιλογής ενός laser για ιατρική χρήση αποτελούν η ενέργεια, η ισχύς εξόδου του και η συνεχής ή παλμική παροχή της δέσμης του.

7β. Συνεχής ή παλμική αλληλεπίδραση δέσμης laser και ιστών.

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα lasers στην ιατρική, όπως π.χ. το laser Nd:YAG ή CO₂, μπορούν να λειτουργήσουν συνεχώς (c.w.) ή παλμικά εξ' ίσου αποδοτικά. Στην περίπτωση συνεχούς λειτουργίας, η έκθεση ενός ιστού στην ακτινοβολία laser είναι συνεχής και ελέγχεται μόνο από τον χρό-

στη. Στις περιπτώσεις όμως παλμικής λειτουργίας, η δέση laser έχει τη μορφή μιας σειράς παλμών, μεγάλης συνήθως επαναληπτικότητας και μικρής χρονικής διάρκειας, που επιτρέπει την ψύξη των ιστών στα ενδιάμεσα μεταξύ διαδοχικών παλμών. Στις περιπτώσεις παλμικής λειτουργίας υπάρχουν έτσι πολύ μικρότερα ποσά θερμότητας που διαχέονται στους γειτονικούς ιστούς και ενδεχόμενα τους καταστρέφουν, αφού η θερμική καταστολή είναι συνάρτηση του χρόνου έκθεσης(31). Αναλυτικά, η διάχυση θερμότητας σ' ένα υλικό συνδέεται με την θερμική αγωγιμότητα και τον χρόνο που απαιτείται για θερμική αποκατάσταση του υπ' όψη υλικού. Πλήρης θεωρητική αντιμετώπιση του θέματος αποδεικνύει ότι τα διάφορα lasers που είναι διαθέσιμα, επιλέγονται για τις συγκεκριμένες ιατρικές εφαρμογές είτε λόγω του μήκους κύματος εκπομπής τους είτε λόγω του συγκεκριμένου συνδυασμού μήκους κύματος laser και χαρακτηριστικών θερμικής αγωγιμότητας, απορρόφησης, σκέδασης των ιστών κ.λπ.

Η ποιότητα του χειρουργικού αποτελέσματος, θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από τον χρόνο έκθεσης των ιστών στη δέση laser και τις γρήγορες κινήσεις του χρήστη, σε συνθήκες συνεχούς λειτουργίας laser, ή από τη σωστή επίλογό των χαρακτηριστικών των παλμών laser σε συνθήκες παλμικής λειτουργίας (μικρή διάρκεια, μεγάλη επαναληπτικότητα, κατάλληλο μήκος κύματος περί τα 3,0 μm κ.λπ.).

7γ. Συστήματα μεταφοράς ακτινοβολίας ιατρικών lasers

Η μεταφορά της δέσης laser από το σημείο παραγωγής της στο σημείο εφαρμογής της, γίνεται με τους παρακάτω τρόπους μεταφοράς:

- i) Διάδοση με πολλαπλές ανακλάσεις μέσω ενός οπτικού κυματοδηγού που έχει διάμετρο από 50μm έως 1mm,
- ii) Μεταφορά με πολλαπλές ανακλάσεις σε μία σειρά από ανακλαστήρες που είναι τοποθετημένοι στις αρθρώσεις κατάλληλο βραχίονα,
- iii) Διάδοση μέσω ενός μεταλλικού κυματοδηγού υψηλής ανακλαστικότητας, και
- iv) Απ' ευθείας μεταφορά της δέσης με χρήση μίας σειράς διαθλαστικών οπτικών στοιχείων, όπως φακοί, πρίσματα, κλπ., (32).

Δέσμες που προέρχονται από lasers ορατού ή lasers εγγύς υπερύθρου συνήθως μεταφέρονται με οπτικούς κυ-

ματοδηγούς (οπτικές ίνες), πολύ χαμηλής απόσβεσης και μικρής σχετικά διαμέτρου που είναι φτιαγμένες από γυαλί οπτικής ποιότητας ή χαλαζία (1). Συνεχώς όμως, προς το παρόν τουλάχιστον, δεν υπάρχουν κατάλληλες οπτικές ίνες ούτε για τις περιοχές του υπερύθρου ή μακροϋπερύθρου, ούτε για τις περιοχές του υπεριώδους. Στις περιοχές αυτές οι οπτικές ίνες εμφανίζουν μεγάλες απώλειες και είναι σχετικά μεγάλης διαμέτρου. Στις περιοχές όμως του υπερύθρου και του μακροϋπερύθρου ειδικότερα, σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως οπτομηχανικές μέθοδοι μεταφοράς, αρθρωτοί βραχίονες ή μεταλλικοί κυματοδηγοί οι οποίοι είναι αρκετά ευέλικτοι, όχι όμως ανάλογα ευέλικτοι με τις οπτικές ίνες.

8. ΙΑΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LASERS - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η χρήση των ιατρικών συσκευών lasers τα τελευταία χρόνια έχει προχωρήσει ραγδαία. Αυτό σ' ένα μεγάλο βαθμό οφείλεται στην τεχνολογική τους εξέλιξη, που με την σειρά της έχει ευνοηθεί πολύ από την τεχνολογική ανάπτυξη συσκευών lasers που προορίζονται για άλλες περιοχές εφαρμογών όπως βιομηχανία, (lasers CO₂, lasers διεγερμένων διμερών, lasers Nd:YAG), οπτικές τηλεκονιότητες, (lasers ημιαγωγών, lasers He-Ne, οπτικοί κυματοδηγοί μεταφοράς δέσης laser), ενεργειακό, (lasers Nd:YAG, lasers HF, lasers CO₂), φασματοσκοπία (lasers Ar⁺, lasers CO₂, lasers διεγερμένων διμερών, lasers χρωστικών) κ.λπ. Ας σημειωθεί ότι μόνο οι πωλήσεις των χειρουργικών lasers το 1987 έφθασαν στις Ηνωμένες Πολιτείες τα 252 εκατομμύρια \$, στην Ευρώπη τα 88 εκατομμύρια \$ και στην Ιαπωνία τα 71 εκατομμύρια \$, ο δε ρυθμός πωλήσεων στο διάστημα 1985-1990, παρουσίασε αύξηση της τάξης του 27%. Ας σημειωθεί ότι η γενίκευση της χρήσης και των χειρουργικών lasers, αλλά και γενικότερα των περισσότερων lasers, εξαρτάται από την έρευνα και επιτυχή ανάπτυξη νέων κυματοδηγών, είτε με ανακλαστικά στοιχεία είτε με οπτικές ίνες, διαθλαστικών οπτικών διατάξεων και ευέλικτων μονάδων οδήγησης των κεφαλών lasers και του συστήματος μεταφοράς της δέσης laser. Αυτό γιατί, παρά το ότι σήμερα οι κεφαλές lasers έχουν εξελιχθεί πολύ και βρίσκονται σε αρκετά τελικό στάδιο, υπάρχουν άλλες υπομονάδες περιφερειακές της κεφαλής laser, που δεν ικανοποιούν α-

πόλυτα τον ιατρικό κόσμο. Πιο βελτιωμένα συστήματα ελέγχου της δέσης laser θα μας επιτρέψουν π.χ. την καλύτερη εστίαση της δέσης laser καθώς και τον απόλυτα ελεγχόμενο καθορισμό της έντασής της. Καλύτερα φασματοφωτόμετρα θα μπορούν να μετρήσουν ποσοτικά την απορρόφηση και την ανάκλαση από τα ακτινοβολούμενα στοιχεία και θα μας οδηγήσουν στο καταλληλότερο προς χρήση μήκος κύματος laser και στην ακριβώς απαιτούμενη ενέργεια ακτινοβολίας laser. Μικροεπεξεργαστές και βελτιωμένα συστήματα παρατήρησης και ανίχνευσης ακτινοβολίας laser, θα μπορούν να ελέγχουν συνεχώς την έξοδο του laser και την κατεύθυνσή της, θα προστατεύουν το χειριστή από ενδεχόμενο λάθος και θα απαγορεύουν την λάθος κατεύθυνσή της, την αύξηση της έντασής της ή την μετατόπιση της συχνότητας όπου (και αν) υπάρχει τέτοιο ενδεχόμενο.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάγκη χρήσης νέων μηκών κύματος, σύντομα θα μας υποχρεώνει να εξετάσουμε την δυνατότητα χρήσης και άλλων lasers που σήμερα είναι καθιερωμένα μόνο σαν ερευνητικά εργαλεία, και στον τομέα των ιατρικών εφαρμογών. Μεταξύ αυτών, οποιοδήποτε θα είναι και άλλα lasers διεγερμένων διμερών, lasers ατμών χρυσού, χημικά lasers της σειράς των υδραλογόνων, το laser Ho:YAG και το 2W-Nd:YAG, (Nd:YAG με διπλασιασμό της συχνότητάς του), ή ακόμα και τα κλασικά εργαστηριακά lasers μακροϋπερύθρου που αντλούνται από lasers CO₂, ή τα πολύπλοκα lasers ελευθέρων ηλεκτρονίων, (8).

9. ΒΗΛΟΓΟΣ

Το laser το βρίσκουμε σήμερα σ' ένα ερευνητικό ή εκπαιδευτικό εργαστήριο, σε τμήματα παραγωγής βιομηχανιών αυτοκινήτων, σε στούντιο ηχογραφήσεων με τη μορφή ηλεκτρόφωνου laser, σε τηλεπικοινωνιακές συνδέσεις οπτικών ινών, σε πειραματικούς θερμοπυρηνικούς αντιδραστήρες, που φιλοδοξούν να λύσουν το ενεργειακό πρόβλημα, σε σταθμούς παρακολούθησης της μόλυνσης του περιβάλλοντος και τέλος σε ιατρικά ερευνητικά κέντρα, κλινικές και νοσοκομεία. Και όλα αυτά, σε διάστημα λίγο μεγαλύτερο από τα 30 χρόνια, από την ημέρα που ο T. Maiman κατασκεύασε το μικρό απλό πρώτο laser ρουβινίου, τη συσκευή που τότε αποτελούσε τη «λύση που έμαχνε να βρει το πρόβλημά της».

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. «Εισαγωγή στην οπτοηλεκτρονική», Α.Α. Σεραφετινίδης, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1985.
2. «Lasers» O.S. Heavens, Duckworth Ltd, London, 1971.
3. «Lasers - Principles and applications», J. Wilson and J.F.B. Hawkes, Prentice Hall, New York, 1987.
4. A. Javan et al., Physical Review Letters, V.6, p. 106, 1961.
5. M.I. Nathan et al., Applied Physics Letters, V.1, p. 62, 1962.
6. R.N. Hall et al., Physical Review Letters, V.9, p. 366, 1962.
7. T.M. Quist et al., Applied Physics Letters, V.1, p.91, 1962.
8. «Αρχές των lasers» Ο. Svelto, μετάφραση και επιμέλεια Γ.Α. Κουρούκλης και Α.Α. Σεραφετινίδης, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1986.
9. «Οπτική και lasers» Μ. Young, μετάφραση και επιμέλεια ΕΜΠ Εκδόσεις Παρατηρητής, Αθήνα, 1985.
10. «Optoelectronics - An Introduction», J. Wilson and J.F.B. Hawkes, Prentice Hall, London, 1983.
11. «Φυσική lasers και τεχνολογικές εφαρμογές», Γ.Α. Κουρούκλης, Α. Α. Σεραφετινίδης και Ε. Ο. Φαμπριουέζι Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1988.
12. «Introduction to laser physics», B.A. Lengyel, J. Wiley and Sons, London, 1966.
13. «Introduction to lasers and their applications», D. C. O'Shea, W. R. Callen and W. T. Rhodes, Addison - Wesley Publishing Company, Reading, 1977.
14. «Laser systems and applications», H.A. Elion Pergamon Press, London, 1967.
15. L.M. Frantz and J.S. Nadvik, Journal of Applied Physics, V.34, p. 2346, 1963.
16. «Laser development and semiconductor studies in the infrared», Α.Α. Σεραφετινίδης, Ph.D. Thesis, Essex University, 1978.
17. «Introduction to optical electronics», 2nd edition, A. Yariv, Hall, Rinehart and Winston, New York, 1976.
18. «CO₂ laser-Effects and applications», N.W. Duley, Academic Press, London, 1976.
19. «Review of high power CO₂ lasers», A.J. De Maria, United Technologies Research Center Report, 1975.
20. P.O. Slade and Α.Α. Σεραφετινίδης, IEEE Journal of Quantum Electronics, Q.E. 14, p. 321, 1978.
21. Α.Α. Σεραφετινίδης et al., Journal of Physics E: Scientific Instruments, V.20, p.917, 1987.
22. K.R. Rickwood and Α.Α. Σεραφετινίδης, Review of Scientific Instruments, V.57, p. 1299, 1986.
23. Α.Α. Σεραφετινίδης and K.R. Rickwood, Journal of Physics E: Scientific Instruments, V.22, p. 103, 1989.
24. Α. Α. Σεραφετινίδης and K. R. Rickwood, Optics Communications, V.65, p.37, 1988.
25. «Chemical and biochemical applications of lasers» V.4 editor C.B. Moore, Academic Press, New York, 1978.
26. «Laser applications in medicine and biology», V.2, editor M.L. Wolbarsht, Plenum Press, New York, 1974.
27. «Ιατρικά lasers: Επιστήμη και κλινική εφαρμογή», G. Carruth and A. McKenzie, μετάφραση και επιμέλεια Α.Α. Σεραφετινίδης και Μ.Ν. Μακροπούλου, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1993 (υπό έκδοση).
28. «Laser surgery», editor I. Kaplan, Jerusalem Academic Press, Jerusalem, 1976.
29. C.K.N. Patel et al., Bulletin of the American Physical Society, V.9, p.500, 1964.
30. P. Haller, Lasers and Applications, p.55, October 1985.
31. Α. Α. Σεραφετινίδης, Lasers in Medical Science, V.4, p.111, 1988.
32. D. Yova, Α.Α. Σεραφετινίδης and M. Makropoulou, Lasers in Medical Science, V.6, p. 429, 1991.