



«Αθηνά»

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΟΠΛΩΝ

Θωμά Χατζίκου 11,, Θεσσαλονίκη 56122, Τηλ/Fax: 2310904794 / 6944165341, www.armscontrol.info

Όπλα χημικών λέιζερ υψηλής ισχύος και στρατιωτικές εφαρμογές

Κωνσταντίνος Δημητρίου
Διδάκτωρ Πανεπιστημίου του Παρισιού XI
Λέκτορας Π.Δ. 407 ΣΣΕ
Ερευνητής του Ε.Κ.Ε.Ο. «Αθηνά»

Πέμπτη 4 Οκτωβρίου 2012

Όπλα χημικών λέιζερ υψηλής ισχύος και στρατιωτικές εφαρμογές

Περίληψη

Το παρόν άρθρο έχει ως σκοπό να αναδείξει τα τεχνολογικά πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά των χημικών λέιζερ υψηλής ισχύος που χρησιμοποιούνται σε επιχειρησιακό επίπεδο ή βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο για άμεση μελλοντική εφαρμογή στο πεδίο μάχης. Για αυτό τον λόγο, παρουσιάζουμε μία ανάλυση της παρούσης κατάστασης των πιο σημαντικών λέιζερ, του υδροφθορίου και του οξυγόνου-ιωδίου, καθώς και τις δυνατότητες αυτών ως όπλα κατευθυνόμενης ενέργειας. Γίνεται επίσης αναφορά σχετικά με την επίδραση της ατμόσφαιρας στην διάδοση της ακτινοβολίας λέιζερ καθώς και στους περιορισμούς που εμφανίζουν τα όπλα αυτά.

1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των ισχυρών λέιζερ πραγματοποιείται με ραγδαίους ρυθμούς εδώ και 50 χρόνια, από την κατασκευή του πρώτου λέιζερ, από τον T. Maiman το 1960 [1]. Λόγω των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων της ακτινοβολίας λέιζερ ανοίγονται καινούργιες προοπτικές τόσο σε επίπεδο βασικής όσο και εφαρμοσμένης έρευνας, καθώς και δίνεται η δυνατότητα κατασκευής ενός όπλου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ποικίλους τρόπους στη μάχη. Για παράδειγμα, η δυνατότητα της πλήξης και της καταστροφής ενός στόχου σε ελάχιστο χρονικό διάστημα από την στιγμή της εμπλοκής του, λόγω της ταχύτητας διάδοσης της δέσμης ίση με του φωτός, καθιστά το λέιζερ ως ένα ικανό και σημαντικό υποψήφιο για όπλο κατευθυνόμενης ενέργειας (Directed Energy Weapons, DEW).

Η ακτινοβολία λέιζερ είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως (φως) με συγκεκριμένες ιδιότητες. Το φως που εκπέμπεται από μία συσκευή λέιζερ είναι μονοχρωματικό και διαδίδεται σε δέσμη με πολύ λεπτή εγκάρσια διατομή προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα η ένταση της ακτινοβολίας

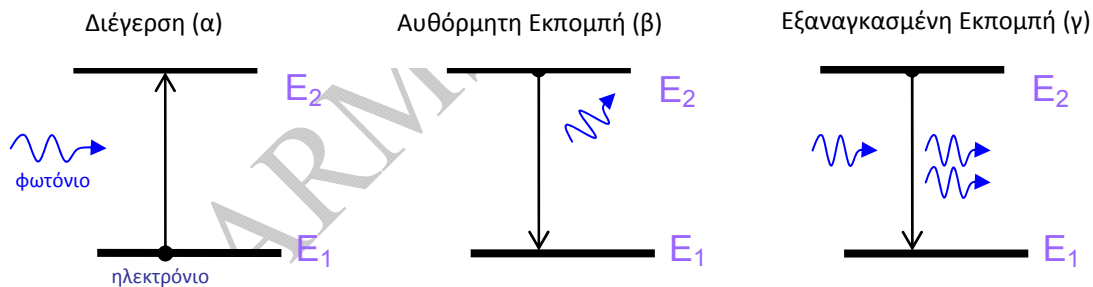


να είναι υψηλή. Για τις στρατιωτικές εφαρμογές, συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε το μέγεθος της ισχύς (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου) αντί της έντασης (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφανείας). Ενώ για έναν απλό δείκτη λέιζερ η ισχύς είναι 1 mWatt, η ισχύς των λέιζερ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως DEW είναι από 1 KWatt και πάνω, δηλαδή τουλάχιστον ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη. Προφανώς, οι συσκευές που παράγουν τόσο υψηλές τιμές ισχύος αποτελούνται από ειδικές διατάξεις, ικανές να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πεδίο μάχης.

Στο παρόν άρθρο εστιάζουμε στο επιστημονικό μέρος σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των χημικών λέιζερ που χρησιμοποιούνται ή που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον ως DEW. Στόχος του άρθρου είναι να εισάγει και να παρακινήσει τον αναγνώστη σε θέματα της φυσικής των λέιζερ τα οποία απορρέουν από έρευνες ετών τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Για το λόγο αυτό ξεκινάμε με μία σύντομη ανάλυση επί των βασικών αρχών των λέιζερ. Στην συνέχεια, παρουσιάζουμε τον τρόπο λειτουργίας των χημικών λέιζερ καθώς και τις δυνατότητές τους ως DEW. Επιχειρούμε να γεφυρώσουμε την αμιγώς στρατιωτική εφαρμογή των χημικών λέιζερ με το επιστημονικό και το τεχνολογικό υπόβαθρο που χρειάζεται για να κατανοήσουμε καλύτερα τη δυνατότητα, τη χρησιμότητα και την σημαντικότητα αυτών των συσκευών. Τέλος, αναφερόμαστε στα προβλήματα και στους περιορισμούς που εμφανίζονται κατά την χρήση τους σε επιχειρησιακό επίπεδο.

2. Βασικές αρχές

Η ακτινοβολία λέιζερ βασίζεται στην ενίσχυση του φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε θεωρητικά από τον Αϊνστάιν το 1916 [2], ο οποίος περιέγραψε το φαινόμενο της διέγερσης ενός ατόμου από έναν εξωτερικό παράγοντα καθώς και της αποδιέγερσής του. Μία σχηματική αναπαράσταση αυτών των διεργασιών παρουσιάζονται στο σχήμα 1.



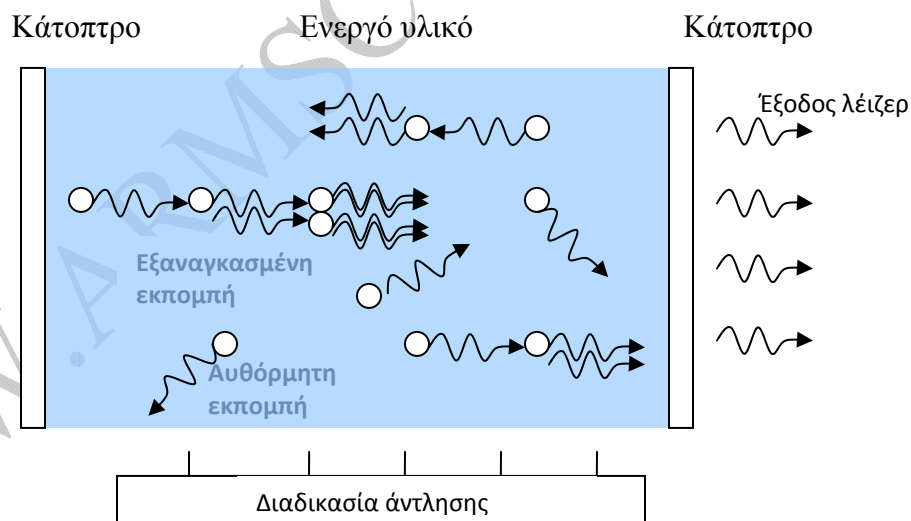
Σχήμα 1. Βασικές ατομικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα σε ένα λέιζερ α) διέγερση ατόμου, β) αυθόρμητη εκπομπή και γ) εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Η δημιουργία ακτινοβολίας λέιζερ βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή λόγω δημιουργίας συμφασικών φωτονίων. Οι ενέργειες αυτών είναι ίσες με τη διαφορά των ενεργειακών σταθμών $E_2 - E_1 = h \cdot \nu$, όπου ν η συχνότητα του φωτονίου και h η σταθερά του Planck.

Ένα άτομο, βρίσκεται αρχικά στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, την αποκαλούμενη βασική κατάσταση. Εάν δώσουμε ενέργεια στο σύστημα υπο μορφή φωτός, τότε ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να απορροφήσει την ενέργεια ενός προσπίπτοντος φωτονίου και να μεταπηδήσει σε υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση, με αποτέλεσμα το άτομο να κερδίσει ενέργεια και να διεγερθεί. Στη φύση, το άτομο έχει την τάση να επανέρχεται στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, δηλαδή το ηλεκτρόνιο μεταβαίνει στην βασική του κατάσταση. Κατά συνέπεια το άτομο αποδιεγείρεται, χάνοντας ενέργεια. Η απελευθέρωση ενέργειας υπό μορφή φωτός, χωρίς κάποια εξωτερική παρέμβαση, αποκαλείται *αυθόρμητη εκπομπή*.



Ωστόσο, εάν ένα διεγερμένο άτομο δεν έχει προλάβει να αποδιεγερθεί και πάνω του προσπέσει ένα φωτόνιο, τότε θα εξαναγκάσει το άτομο αυτό να αποδιεγερθεί με την ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίου, διεργασία γνωστή ως *εξαναγκασμένη εκπομπή*. Η αυθόρμητη και η εξαναγκασμένη εκπομπή συναντώνται εκτός από την περίπτωση ηλεκτρονιακών μεταβάσεων και σε μεταβάσεις μεταξύ ταλαντωτικών καταστάσεων, όπως συμβαίνει στα διατομικά μόρια αερίων.

Για να λειτουργήσει μία συσκευή λέιζερ χρειάζεται 1) το ενεργό υλικό, άτομα ή μόρια που μπορούν να βρίσκονται σε αέρια, υγρή ή στερεή κατάσταση, 2) την διαδικασία άντλησης κατά την οποία προσδίδουμε ενέργεια και διεγείρουμε το ενεργό υλικό, και 3) δύο αντικρυστά κάτοπτρα (για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα βιβλία [3, 4]). Μία απλή σχηματική αναπαράσταση ενός λέιζερ παρουσιάζεται στο σχήμα 2. Το φως που παράγεται αρχικά από την αυθόρμητη εκπομπή, εγκλωβίζεται μέσα στους καθρέπτες και ενισχύεται κάθε φορά που διέρχεται από το ενεργό υλικό, λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας των διεγερμένων ατόμων/μορίων. Τελικά ένα μέρος της ακτινοβολίας εξέρχεται από το ένα κάτοπτρο, την έξοδο του λέιζερ. Απαραίτητη προϋπόθεση για να έχουμε ενίσχυση του φωτός μέσα στην κοιλότητα του λέιζερ, είναι ο αριθμός των διεγερμένων ατόμων/μορίων να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ατόμων/μορίων του ενεργού υλικού που βρίσκονται στην αμέσως χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, έτσι ώστε να επιτευχθεί η *αναστροφή πληθυσμού*. Ανάλογα με το ενεργό υλικό, τα λέιζερ διακρίνονται σε κατηγορίες, με τα πιο σημαντικά για τις εφαρμογές που μελετάμε να είναι τα χημικά και της στερεάς κατάστασης. Τα λέιζερ ελεύθερων ηλεκτρονίων βασίζονται σε διαφορετικές αρχές και γι' αυτό αποτελούν μία ξεχωριστή κατηγορία. Στη συνέχεια, εστιάζουμε στα χημικά λέιζερ και αναλύουμε τις δυνατότητες, τα χαρακτηριστικά και τις στρατιωτικές εφαρμογές αυτών.



Σχήμα 2. Απλή σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας ενός λέιζερ. Τα φωτόνια που προκύπτουν από εξαναγκασμένη εκπομπή συναντούν εκ νέου διεγερμένα άτομα κάθε φορά που διέρχονται μέσα από το ενεργό υλικό. Ο χρόνος ζωής αυτών των ατόμων είναι σχετικά μεγάλος, της τάξης του msec στην ατομική φυσική, και για αυτό οι αντίστοιχες ενεργειακές καταστάσεις ονομάζονται μετασταθείς.



3. Χημικά Λείζερ υψηλής ισχύος

Τα χημικά λείζερ είναι από τα πρώτα λείζερ υψηλής ισχύος που κατασκευάστηκαν, σε παλμική [5] και σε συνεχόμενη λειτουργία [6]. Περιλαμβάνουν μίγματα χημικών ενώσεων τα οποία σε κατάλληλες συνθήκες πυροδοτούν χημικές αντιδράσεις, δημιουργώντας μόρια ή άτομα σε διεγερμένες καταστάσεις. Τα μόρια/άτομα αυτά αποτελούν το ενεργό υλικό των λείζερ και παρέχουν την ενέργεια για τη δημιουργία σύμφωνης ακτινοβολίας. Τα πιο γνωστά χημικά λείζερ είναι του υδροφθορίου (hydrogen fluoride HF, deuterium fluoride DF) και του οξυγόνου-ιωδίου (Chemical Oxygen Ionide Laser, COIL).

3.1. Λείζερ υδροφθορίου

Το λείζερ αυτό έχει μεγάλη σημασία γιατί αποτελεί την απαρχή των ισχυρών χημικών λείζερ λόγω του ότι μπορεί να παράγει ηλεκτρομαγνητική ισχύ της τάξης των Μέγα-Βατ (1Megawatt = 10^6 Watts). Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι αντίστοιχα:



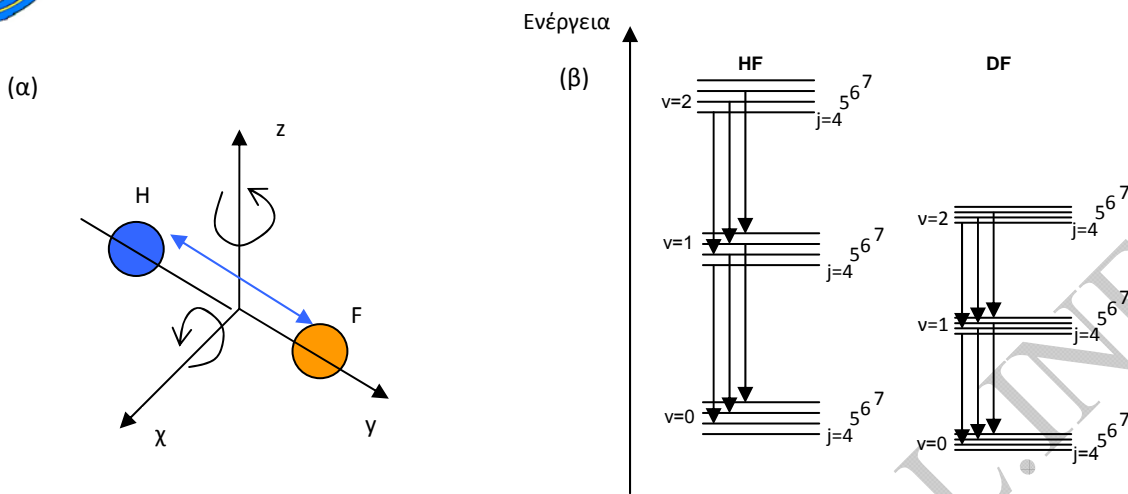
όπου το σύμβολο ‘*’ υποδεικνύει ότι το διατομικό μόριο βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση. Θεωρώντας ότι το μόριο βρίσκεται στη βασική του ηλεκτρονιακή κατάσταση και διεγείρωντας μόνον τις ταλαντωτικές και περιστροφικές του κινήσεις, ερευνητές μπόρεσαν να παράγουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα, στα 2,5 με 3 μm για το HF και στα 3,5 με 4 μm για το DF αντίστοιχα [7]. Η διαφορά αυτή στο μήκος κύματος οφείλεται στη διαφορά μάζας του βαρύτερου δευτερίου σε σχέση με το υδρογόνο.

Στο σχήμα 3α παρουσιάζουμε σχηματικά τον τρόπο κίνησης ενός διατομικού μορίου ενώ στο 3β τα ενεργειακά επίπεδα των μορίων HF και DF αντίστοιχα. Ένα διατομικό μόριο μπορεί να ταλαντώνεται και να περιστρέφεται με αποτέλεσμα τα ενεργειακά του επίπεδα να δίνονται από την υπέρθεση των δύο αυτών κινήσεων, σύμφωνα με τον τύπο:

$$E(\nu, j) = \omega(\nu + 1/2) + X(\nu + 1/2)^2 + B_j \cdot j \cdot (j + 1) \quad (2)$$

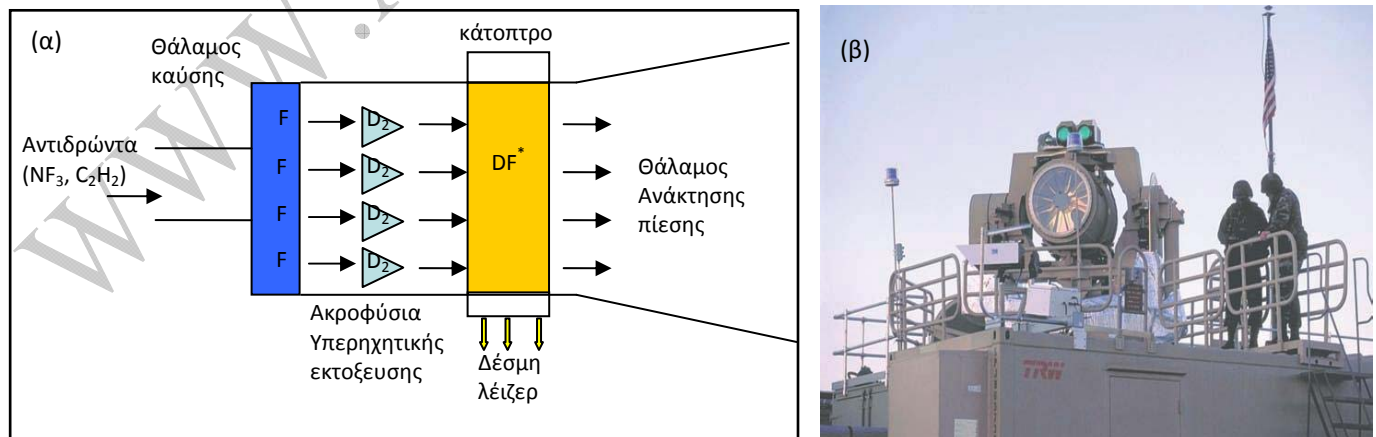
όπου ω είναι η συχνότητα της γραμμικής ταλάντωσης, ν ο ταλαντωτικός κβαντικός αριθμός, j ο περιστροφικός κβαντικός αριθμός, X η σταθερά μη αρμονικής ταλάντωσης και B_j η σταθερά περιστροφής. Όροι ανώτερης τάξης έχουν αγνοηθεί. Οι τιμές των παραμέτρων ω , X και B_j μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία [8] και είναι διαφορετικές για το HF και το DF. Κατά συνέπεια, τα ενεργειακά επίπεδα του ενός μορίου είναι διαφορετικά από του άλλου. Τα εκπεμπόμενα φωτόνια που προκύπτουν από τις μεταπτώσεις μεταξύ μίας ταλαντωτικής-περιστροφικής κατάστασης σε μία ενεργειακά χαμηλότερη κατάσταση για το κάθε μόριο αντίστοιχα, χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ενέργειες και κατά συνέπεια από διαφορετικά μήκη κύματος.

Το χαρακτηριστικό αυτό είναι πολύ σημαντικό όταν έχουμε να κάνουμε με διάδοση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα σε κάποιο μέσο και ειδικότερα στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας. Πειράματα και λεπτομερή μοντέλα έχουν δείξει ότι η ατμόσφαιρα είναι αδιαφανής στα μήκη κύματος από 2,5 μέχρι 3 μm και διαφανής από 3,5 μέχρι 4 μm [9, 10]. Επομένως, μόνο το λείζερ DF προτιμάται για ρεαλιστικές επίγειες στρατιωτικές εφαρμογές.



Σχήμα 3. α) Ταλαντωτική και περιστροφική κίνηση του διατομικού μορίου HF, που καθορίζει τα ενεργειακά του επίπεδα. β) Ταλαντωτικά –περιστροφικά ενεργειακά επίπεδα των μορίων HF και DF αντίστοιχα, όπως υπολογίζονται από την έκφραση (2). Στο σχήμα αναπαριστώνται οι επιτρεπτές μεταβάσεις. Μικρότερες διαφορές στα ενεργειακά επίπεδα του DF σημαίνει μικρότερες ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων και επομένως μεγαλύτερα μήκη κύματος της ακτινοβολίας.

Η λειτουργία του βασίζεται στην υπερηχητική διαστολή του χημικού αερίου σε κατεύθυνση κάθετη ως προς τον οπτικό του άξονα [7]. Μία σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του χημικού λέιζερ φαίνεται στο σχήμα 4α. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να παρασκευαστούν άτομα φθορίου προκειμένου να ενεργοποιήσουν την χημική αντίδραση $I(\beta)$. Τα άτομα αυτά προκύπτουν από την διάσπαση του μοριακού φθορίου (F_2) μέσα στον θάλαμο καύσης, η οποία επιτυγχάνεται λόγω υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Στη συνέχεια, αέριο D_2 εκχύεται σε υπερηχητικές ταχύτητες με τη βοήθεια ενός συνόλου ακροφυσίων το οποίο αναμιγνύεται με το ατομικό φθόριο σε χαμηλότερες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, λαμβάνοντας έτσι χώρα η αντίδραση παρασκευής του DF^* (1β). Επειδή ο χρόνος παραμονής των διεγερμένων καταστάσεων του DF^* είναι μεγαλύτερος του χρόνου διαστολής μέσα στον οπτικό άξονα, έχουμε περισσότερα διεγερμένα μόρια με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η αναστροφή πλυθησμού. Το λέιζερ DF συνεχούς ακτινοβολίας λειτουργεί σε χαμηλές πιέσεις που σημαίνει ότι μία κινητή συσκευή λέιζερ που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πεδίο μάχης θα πρέπει να αποτελείται από μία διάταξη ικανή να διατηρεί την πίεση του αερίου σε χαμηλά επίπεδα, περιλαμβάνοντας ένα σύστημα υποχητικής εκτόνωσης.



Σχήμα 4. (α) Σχηματική αναπαράσταση του χημικού λέιζερ DF, (β) Το THEL και το σύστημα κατεύθυνσης δέσμης.



Η ανάπτυξη των λέιζερ υψηλής ισχύος HF και DF ξεκίνησε στις ΗΠΑ τη δεκαετία 1970 και συνεχίστηκε τις επόμενες δεκαετίες [11]. Την δεκαετία του 1990, αναπτύχθηκε στα πλαίσια συνεργασίας ΗΠΑ-Ισραήλ το τακτικό λέιζερ υψηλής ενέργειας-Tactical High Energy Laser (THEL). Το THEL (Σχήμα 4β) είναι ένα από τα πρώτα χερσαία οπτικά συστήματα λέιζερ, ικανό να εντοπίσει, να παρακολουθήσει και να πλήξει βλήματα πυροβολικού και ρουκέτες μικρού βεληνεκού σε αποστάσεις μερικών χιλιομέτρων. Τις χρονιές 2000 και 2001 το THEL έπληξε ρουκέτες Katyusha, ενώ το 2002 πραγματοποίησε ρήψη πολλαπλών διαδοχικών στόχων. Η εξελιγμένη αυτή τεχνογνωσία συνέβαλε στην δημιουργία ενός κινούμενου όπλου λέιζερ, το Mobile Tactical High Energy Laser-MTHEL [12]. Ωστόσο, παρά την επιτυχία των χημικών λέιζερ DF και HF, το ενδιαφέρον της χρήσης τους φαίνεται να αρχίζει να εξασθενεί, λόγω των κάτωθι:

- θέματα ασφάλειας που αφορούν την φύλαξη και την μεταφορά των χημικών ενώσεων,
- θέματα διαχείρισης στο πεδίο μάχης,
- μεγάλος όγκος συσκευής και μεγάλες οπτικές διατάξεις,
- ραγδαία ανάπτυξη πιο μικρών και ελκυστικών συσκευών λέιζερ.

Ειδικότερα τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη μιας νέας γενιάς λέιζερ έχει οδηγήσει στην κατασκευή συσκευών μικρών διαστάσεων, ικανές να παράγουν υψηλή ισχύ (100 KWatts) με υψηλή ποιότητα δέσμης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές υποσχόμενες εφαρμογές στο πεδίο μάχης [12]. Τα χημικά λέιζερ ωστόσο δεν έχουν πεί την τελευταία λέξη καθώς υπερτερούν ακόμα στην εκπαιμπόμενη ισχύ η οποία παραμένει αρκετά υψηλότερη (τουλάχιστον δέκα φορές) από εκείνη των άλλων ειδών λέιζερ, π.χ. στερεάς κατάστασης. Επίσης, η χρήση διαφορετικών μεταβάσεων του μορίου HF από αυτές που παρουσιάζονται στο σχήμα 3β, γνωστές ως overtone transitions (π.χ. από $v=2$ στην $v=0$), δημιουργούν ακτινοβολία με μήκη κύματος στα 1300 -1400nm [13]. Αυτά τα μήκη κύματος είναι πιο ελκυστικά για τις στρατιωτικές εφαρμογές [14], όπως ισχύει και για το λέιζερ οξειδίου-ιωδίου που αναλύουμε παρακάτω.

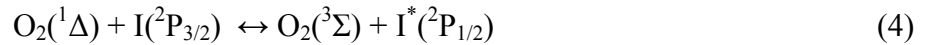
3.2. Λέιζερ οξυγόνου – ιωδίου

Η πρώτη επίδειξη λειτουργίας του χημικού λέιζερ οξυγόνου-ιωδίου (Chemical Oxygen-Iodine Laser, COIL) πραγματοποιήθηκε το 1978 στο Air Force Weapons Laboratory του New Mexico των ΗΠΑ [15]. Μετά την πρώτη επιτυχή λειτουργία, στόχος ήταν η δημιουργία ενός αερομεταφερόμενου λέιζερ υψηλής ισχύος ικανό να καταρρίψει βολιβατικούς πυραύλους κατά την φάση προώθησή τους [11]. Αν και ανήκει στην κατηγορία των χημικών λέιζερ, το COIL βασίζεται σε διαφορετικές διεργασίες. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι οι μοριακές ταλαντωτικές μεταβάσεις που παίζουν ρόλο, αλλά οι ατομικές (Σχήμα 5α).

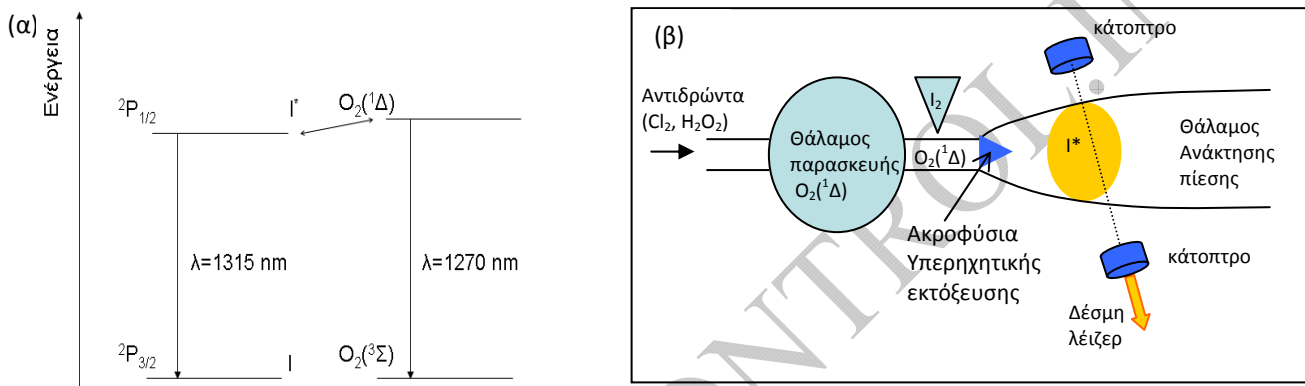
Το ιώδιο συναντάται στη φύση σε μοριακή μορφή I_2 , επομένως θα πρέπει να διασπαστεί προκειμένου να δημιουργηθούν άτομα ιωδίου. Η διάσπαση αυτή μπορεί να προκληθεί πειραματικά με αρκετούς τρόπους, με τη βοήθεια μορίων ή ατόμων οξυγόνου ή με ηλεκτρονιακές συγκρούσεις [14]. Συνήθως χρησιμοποιούνται μόρια οξυγόνου $O_2(^1\Delta)$, τα οποία προέρχονται από χημικές αντιδράσεις μεταξύ υγρού υπεροξειδίου του υδρογόνου και αερίου χλωρίου [7]. Το μίγμα οξυγόνου-ιωδίου εκτονώνεται με υπερηχητικές ταχύτητες με τη βοήθεια ακροφυσίων. Άτομα ιωδίου συγκρούονται με



μόρια οξυγόνου $O_2(^1\Delta)$ με αποτέλεσμα τη δημιουργία διεγερμένων ατόμων (I^*) λόγω μεταφορά ενέργειας, σύμφωνα με την χημική αντίδραση:



Η ακτινοβολία λέιζερ προέρχεται από την ηλεκτρονιακή μετάβαση $^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ του ατόμου του ιωδίου η οποία αντιστοιχεί σε φωτόνιο με μήκος κύματος $\lambda=1315 \mu\text{m}$.



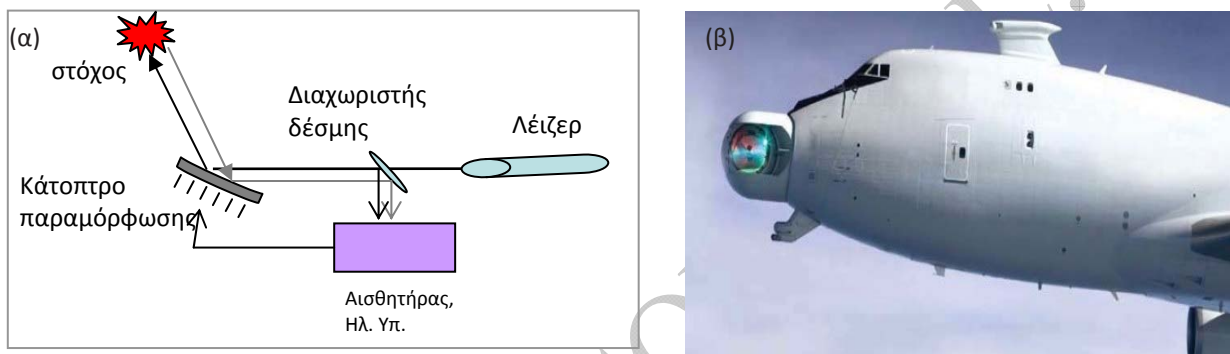
Σχήμα 5: (α) Ενεργειακά (ηλεκτρονιακά) επίπεδα οξυγόνου-ιωδίου που υπεισέρχονται στην αντίδραση (4). (β) Σχηματική αναπαράσταση του λέιζερ COIL.

Αυτό το μήκος κύματος υπερτερεί των μεγαλύτερων μηκών κύματος που προέρχονται από τα λέιζερ HF/DF, αφενός λόγω της μικρότερης απορρόφησης από τους υδρατμούς και της σκέδασης από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, αφετέρου λόγω των μικρότερων οπτικών διατάξεων που απαιτούνται. Το λέιζερ COIL είναι ικανό να παράγει ακτινοβολία πολύ υψηλής ισχύος ($>1 \text{ MWatt}$) και καλή ποιότητα δέσμης. Ωστόσο, η διατήρηση αυτών των χαρακτηριστικών κατά τη διάδοση της ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα της γής σε μεγάλες χιλιομετρικές αποστάσεις, αποτελεί τεχνολογική πρόκληση. Φαινόμενα όπως ο στροβιλισμός της ατμόσφαιρας και η θερμική ανάμιξη είναι από τα πιο βασικά προβλήματα που εμφανίζονται στην ικανότητα διάδοσης της δέσμης ενός χημικού λέιζερ. Οι διαφορές στην πίεση και στην θερμοκρασία λόγω των μεταβολών της ατμοσφαιρικής πυκνότητας έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη διαφορετικών δεικτών διάθλασης. Η ατμόσφαιρα παίζει τον ρόλο συγκλίνοντων και αποκλίνοντων φακών, παραμορφώνοντας έτσι την εστίαση της δέσμης λέιζερ. Επίσης, ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να θερμαίνεται και κατά συνέπεια να ελατώνεται ο δείκτης διάθλασης, προκαλώντας απόκλιση της δέσμης. Το φαινόμενο αυτό της θερμικής ανάμιξης γίνεται πιο έντονο στα χημικά λέιζερ που εκπέμπουν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπως στο DF.

Όταν έχουμε να κάνουμε με προσβολή στόχων σε μεγάλες αποστάσεις, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η δέσμη λέιζερ να φτάσει στον στόχο χωρίς τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (υψηλή ισχύ, μικρή απόκλιση) [16]. Για την αντιμετώπιση της επίδρασης της ατμόσφαιρας κατά τη διάδοση της ακτινοβολίας, έχουν αναπτυχθεί οι προσαρμοσμένες οπτικές διατάξεις (adaptive optics, AO) [17]. Η ιδέα

αυτών των διατάξεων βασίζεται στην παραμόρφωση της δέσμης κατά την στιγμή της εξόδου από τη συσκευή λέιζερ με τέτοιο τρόπο ώστε το ίδιο το μέσο διάδοσης να «διορθώσει» την αρχική παραμόρφωση και τελικά η δέσμη να φθάσει στον στόχο με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (Σχήμα 6α). Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να γνωρίζουμε το μέγεθος της παραμόρφωσης της ακτινοβολίας κατά μήκος της διαδρομής της δέσμης μέσα στην ατμόσφαιρα σε πραγματικό χρόνο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια ενός συστήματος που περιλαμβάνει:

- ένα λέιζερ (πομπό) χαμηλότερης ισχύος από του COIL το οποίο εκπέμπει σύμφωνη ακτινοβολία παρεμφερούς μήκους κύματος και
- μία συσκευή (δέκτη), αισθητήρα μετώπου κύματος (wave front sensor), που λαμβάνει τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία από τον στόχο.



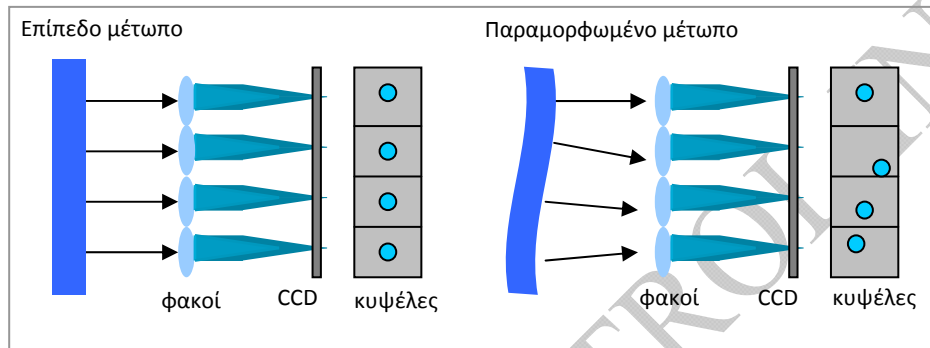
Σχήμα 6. (α) Πειραματική διάταξη προσαρμοσμένων οπτικών. (β) Το αερομεταφερόμενο λέιζερ COIL με το σύστημα διεύθυνσης της δέσμης.

Η ποιότητα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας συγκρίνεται με εκείνη της εξόδου. Οι διαφορές μεταξύ των δύο σημάτων οφείλονται κυρίως στον στροβολισμό της ατμόσφαιρας. Ένα σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες και παρέχει οδηγίες σε ένα κάτοπτρο παραμόρφωσης. Το κάτοπτρο αυτό αποτελείται από πολλά μικρά κομμάτια τα οποία μετακινούνται έτσι ώστε να παραμορφώνουν την έξοδο της δέσμης του λέιζερ. Στο σχήμα 6β παρουσιάζεται το αερομεταφερόμενο λέιζερ COIL με το σύστημα διεύθυνσης δέσμης και τις προσαρμοσμένες οπτικές διατάξεις στο μπροστινό μέρος του αεροσκάφους.

Η πιο συνηθισμένη συσκευή αισθητήρα που λαμβάνει την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι ο Hartmann-Shack wavefront sensor [18]. Αποτελείται από ένα σύνολο μικρών φακών όλοι τους με την ίδια εστιακή απόσταση, οι οποίοι βρίσκονται μπροστά από μία CCD κάμερα (Σχήμα 7). Εάν το μέτωπο κύματος είναι τελείως επίπεδο (καμία παραμόρφωση), τότε ο κάθε φακός εστιάζει στο κέντρο της κάθε κυψέλης της κάμερας. Σε περίπτωση που το μέτωπο κύματος είναι παραμορφωμένο τότε ο κάθε φακός θα εστιάσει σε διαφορετικό σημείο, αποτυπώνοντας έτσι το μέγεθος της παραμόρφωσης.

Το λέιζερ COIL, παρά τα τεχνολογικά εξελιγμένα συστήματα που υιοθετεί και τα προτερήματα που εμφανίζει η υψηλή ποιότητα δέσμης, παρουσιάζει προβλήματα που αφορούν κυρίως στη διαχείριση και στη φύλαξη των τοξικών χημικών καυσίμων. Μία λύση σε αυτά τα προβλήματα μπορεί να αποτελέσει ένα λέιζερ οξειδίου-ιωδίου το οποίο να διατηρεί όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, υψηλή

ισχύ και ποιότητα δέσμης, επιθυμητό μήκος κύματος ($\lambda=1315$ nm) κ.λ.π., αλλά να αποφεύγει τη χρήση υγρών χημικών καυσίμων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια της τεχνικής της εκκένωσης αερίου (gaz discharge) [19]. Μόρια οξυγόνου $O_2(^1\Delta)$ δημιουργούνται από ηλεκτρονικές κρούσεις με οξυγόνο μέσα στα μίγμα οξυγόνου-ηλίου-οξειδίου του νατρίου με τη χρήση ραδιο-συχνοτήτων [20]. Στην συνέχεια, η διαδικασία είναι παρόμοια με εκείνη που ακολουθείται και στο λέιζερ COIL.



Σχήμα 7. Σχηματικός τρόπος λειτουργίας του αισθητήρα Hartmann-Shack.

Οι προαναφερόμενες τεχνολογίες έχουν οδηγήσει στην κατασκευή ενός λέιζερ οξυγόνου-ιωδίου, ικανό να παράγει σύμφωνη ακτινοβολία με ισχύ της τάξης μερικών Μέγα-βατ. Ένα τέτοιο ισχυρό χημικό λέιζερ έχει εγκατασταθεί σε αεροπλάνο τύπου Boeing 747, ειδικά τροποποιημένο, προκειμένου να δεχθεί την πολύπλοκη και απαιτητική διάταξη. Το αερομεταφερόμενο λέιζερ (Airborne Laser, ABL) COIL, έχει ως σκοπό να εντοπίσει, να παρακολουθήσει, να στοχεύσει και να πλήξει βαλλιστικούς πυραύλους κατά την αρχική φάση της προώθησής του. Πολύ πρόσφατα, σε μία πολύ εντυπωσιακή επίδειξη, το ABL κατέρριψε επιτυχώς βαλλιστικό πύραυλο στην αρχική φάση της τροχιάς του, εκπληρώνοντας πλήρως τις προσδοκίες [21]. Πλέον, έχει κατασκευαστεί μία συσκευή λέιζερ υψηλής ισχύος ικανή να εκτελεί επιτυχώς μία σειρά από πολύπλοκες τεχνολογικά διαδικασίες που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα επιστημών, με αποτέλεσμα να την καθιστά ως ένα οπλικό σύστημα έτοιμο στο εγγύς μέλλον για να εξελιχθεί και να χρησιμοποιηθεί στο σύγχρονο πεδίο μάχης.

4. Συμπεράσματα

Στο παρόν άρθρο παρουσιάσαμε τον τρόπο λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων χημικών λέιζερ υψηλής ισχύος του υδροφθορίου και του οξειδίου-ιωδίου. Σκοπός μας ήταν να αναδείξουμε τα προτερήματα αυτών των συσκευών και τις δυνατότητές τους ως όπλα κατευθυνόμενης ενέργειας. Εμβαθύνουμε σε επιστημονικά θέματα που καλύπτουν τόσο την βασική έρευνα όσο και τις τεχνολογικές προκλήσεις που κρύβονται πίσω από αυτές τις διατάξεις. Παρά τα προβλήματα και τους περιορισμούς που μπορεί να παρουσιάζουν τα χημικά λέιζερ, αποτελούν ένα ισχυρό όπλο κατευθυνόμενης ενέργειας στο σύγχρονο πεδίο μάχης που αφορούν τις χερσαίες και τις εναέρια επιχειρήσεις. Είναι σίγουρο ότι με την βοήθεια καινοτομικών τεχνολογικών εξελίξεων θα παίξουν έναν ακόμα πιο σημαντικό ρόλο στο μέλλον.



Βιβλιογραφία

- [1] T. H. Maiman, *Nature* **187**, 493 (1960).
- [2] A. Einstein, *Deutsche Physikalische Gesellschaft* **18**, 318 (1916).
- [3] O. Svelto and D. Hanna, “*Principles of Lasers*”, 4th Springer Edition (1998).
- [4] W. Silvast, “*Laser Fundamentals*”, Cambridge University Press (1996).
- [5] J.V.V. Kasper, and G.C. Pimentel, *Phys. Rev. Lett.* **14**, 352 (1965); K. L. Kompa and G. C. Pimentel, *Chem. Phys.* **47**, 857 (1967).
- [6] D. J. Spencer, T. A. Jacobs, H. Mirels and R. W. F. Gross, *Int. J. Chem. Kinet.* **1**, 493 (1969).
- [7] C. Clendening and H. W. Behrens, “*High Power Laser Handbook*”, edited by G. Goodno and H. Injeyan, McGraw-Hill Company (2011).
- [8] G. Hertsberg, “*Spectra of Diatomic Molecules*”, Van Nostrand Reinhold Company, New York (1950).
- [9] J. P. Peixoto and A. H. Ort, “*The physics of climate*”, American Institute of Physics (1992)
- [10] L. S. Rothman *et al.*, *J. of Quant. Spectr.o & Rad. Trans.* **110**, 533 (2009).
- [11] W. H. Possel, “*Lasers and Missile Defense: New concepts for Space-Based and Ground-Based Laser Weapons*”, Occasional Paper N° 5, Center for Strategy and Technology, Air War College, Air University Maxwell Air Force Base, Alabama (1998).
- [12] Richard J. Dunn, “*Operational implications of lasers weapons*”, Northrop Grumman Analysis Center (2005).
- [13] L. H. Sentman, D. L. Carroll, and J. Gilmore, “*Modeling cw HF Fundamental and Overtone Lasers*,” AIAA-89-1904 (1989).
- [14] D. L. Carroll, 42nd AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, Honolulu (2011).
- [15] W. E. McDermott, N. R. Pchelkin, D. J. Benard, and R. R. Bousek, *Appl. Phys. Lett.* **32**, 469 (1978).
- [16] P. Nielsen, “*Effects of Directed Energy Weapons*” (2009).
- [17] J. E. Pearson, *Applied Optics* **15**, 622(1976.)
- [18] D. Koop, “*Directed Energy Weapons*”, Defence Today, 2006
- [19] D. L. Carroll and W. C. Solomon, *Proceedings of the XIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference*, Florence, Italy 18-22 September 2000, The Int. Soc. for Opt. Eng. Vol. 4184, P.O. Box 10, Bellingham, WA 98227-0010, pp. 40-44.
- [20] D. L. Carroll *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 111104 (2005).
- [21] Skillings, J. “*Airborne Laser zaps in-flight missile*,” CNET News, 12 Feb. 2010.