

Συστήματα Laser για μετρήσεις

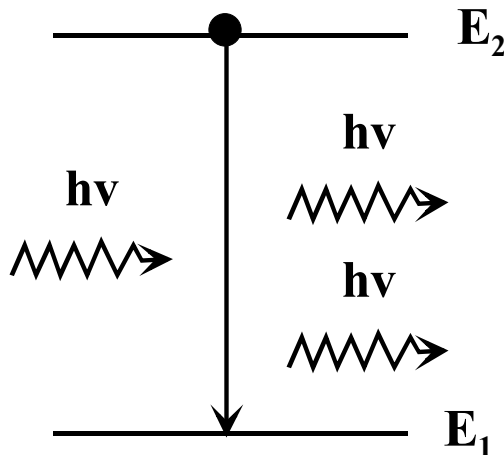
- Οι υπάρχουσες διατάξεις μέτρησης, ανίχνευσης και ανάλυσης ποικίλλουν ως προς την απλότητα ή την πολυπλοκότητα τους, με την ποικιλία τους να ξεκινά από απλά εργαλεία ως και πολυσύνθετα συστήματα οργάνων που μπορούν σαν παράδειγμα να χρησιμοποιηθούν στην εκτόξευση και το έλεγχο διαστημοπλοίων.
- Η επιλογή σε κάθε περίπτωση της καταλληλότερης διάταξης βασίζεται κυρίως στο επιθυμητό αποτέλεσμα όπως π.χ. η ταχύτητα απόκρισης, η ακρίβεια και η ευαισθησία που απαιτείται σε κάποια εφαρμογή.
- Η σημερινή τεχνολογία με την τεράστια εξέλιξη της παρουσιάζει ιδιαίτερες απαιτήσεις ως τις ιδιότητες των διατάξεων που χρησιμοποιούνται με αποτέλεσμα να υπάρχει μία συνεχής ανάγκη ανανέωσης των υπαρχόντων διατάξεων ή ανάπτυξης νέων περισσότερο ευέλικτων και αποδοτικών.
- Μία νέα γενιά αυτών των διατάξεων αποτελούν και οι οπτικές διατάξεις, οι οποίες τα τελευταία χρόνια έχουν αποδείξει ότι διαθέτουν μοναδικές δυνατότητες.

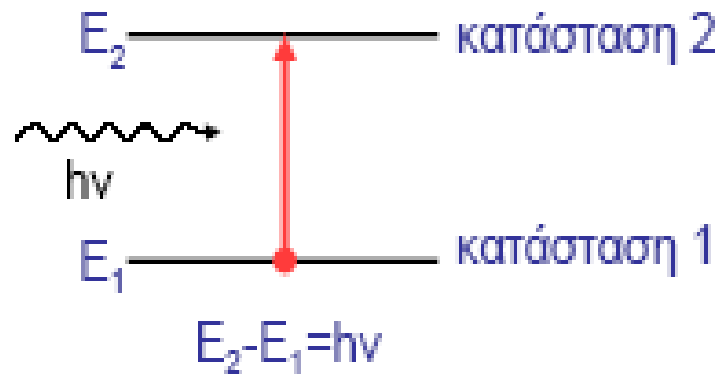
- Με τον όρο «οπτικές διατάξεις» αναφερόμαστε στις διατάξεις των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε ΗΜ ακτινοβολία με μήκος κύματος στην περιοχή κοντά στο ορατό, από το υπεριώδες (περίπου $0.19 \mu\text{m}$) έως και το υπέρυθρο (μερικά μm).
- Αν και οι οπτικές διατάξεις ήταν γνωστές από παλιά, οι τεράστιες δυνατότητες τους φάνηκαν μόνο μετά την ανακάλυψη του laser, διάταξης-πομπού που λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του έχει οδηγήσει την σημερινή τεχνολογία σε δρόμους άγνωστους πριν την ανακάλυψη του.
- Ανάμεσα σε όλες τις άλλες μοναδικές εφαρμογές του laser, οι οπτικές διατάξεις μέτρησης, ανίχνευσης και ανάλυσης αποτελούν συχνά το τέλειο εργαλείο για πληθώρα εφαρμογών.
- Οι διατάξεις αυτές είτε αποτελούν μία σύγχρονη εκδοχή διαφόρων κλασικών διατάξεων είτε έγινε εφικτό να αναπτυχθούν μόνο μετά την κατανόηση των ιδιοτήτων της ακτινοβολίας laser.

- Η ενότητα αυτή θα ασχοληθεί με μερικές από τις οπτικές διατάξεις οι οποίες δίνουν την δυνατότητα μέτρησης, ανίχνευσης και ανάλυσης.
- Αρχικά θα αναλυθούν οι ιδιότητες του laser, με στόχο να γίνει αργότερα κατανοητή η αρχή λειτουργίας των διατάξεων που θα εξεταστούν.
- Στη συνέχεια θα εξεταστούν οι βασικές αρχές της συμβολομετρίας, μιας τεχνικής που σχετίζεται με διάφορες εφαρμογές όπως μέτρηση πολύ μικρών αποστάσεων, συμβολομετρική ολογραφία, γυροσκόπιο κλπ.
- Θα εξεταστούν οι οπτικές διατάξεις μέτρησης απόστασης (ραντάρ laser), οι δυνατότητες ευθυγραμμίσεων μεγάλων ή μικρών μηχανολογικών και δομικών έργων και τα συστήματα laser Doppler με υψηλής τεχνολογίας εφαρμογές στην ανάλυση της κίνησης ανέμων και ροών.
- Θα διερευνηθούν επίσης οι δυνατότητες διατάξεων στοιχειακής ανάλυσης όπως LIBS, LIF και TOF-MS, διατάξεις που παρουσιάζουν πληθώρα εφαρμογών όπως ανίχνευση και ανάλυση ρύπανσης, ταυτοποίηση των συστατικών διαφόρων δειγμάτων και καταγραφή των φυσικής/χημικής κατάστασης των υλικών.
- Τέλος, θα παρουσιαστεί μία μικρή εισαγωγή στους αισθητήρες οπτικών ινών που αποτελούν μικρογραφίες των οπτικών διατάξεων.

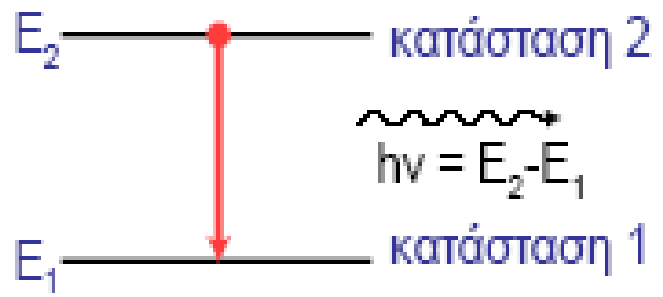
Τι είναι laser

- Η λέξη LASER είναι ακρωνύμιο της φράσης Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
- Η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος laser είναι η εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας από άτομα ή μόρια που βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση.
- Με τον όρο laser σήμερα αναφερόμαστε σε συσκευές οι οποίες εκπέμπουν φως με βάση την εξαναγκασμένη εκπομπή
- Κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή, η δημιουργία του φωτονίου εξαρτάται από ήδη υπάρχοντα φωτόνια, τα οποία εξαναγκάζουν τα διεγερμένα άτομα να εκπέμψουν φωτόνια πανομοιότυπα με τα ήδη υπάρχοντα.

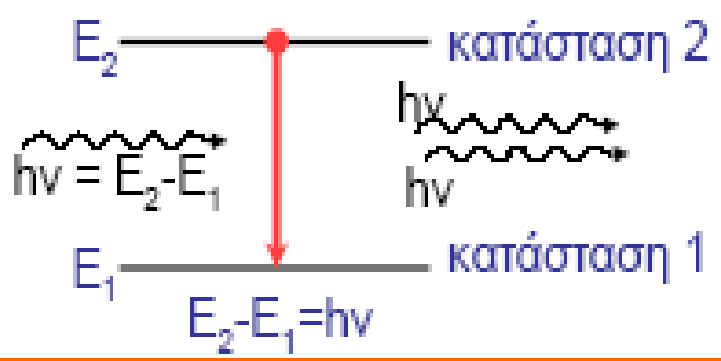




Απορρόφηση φωτός

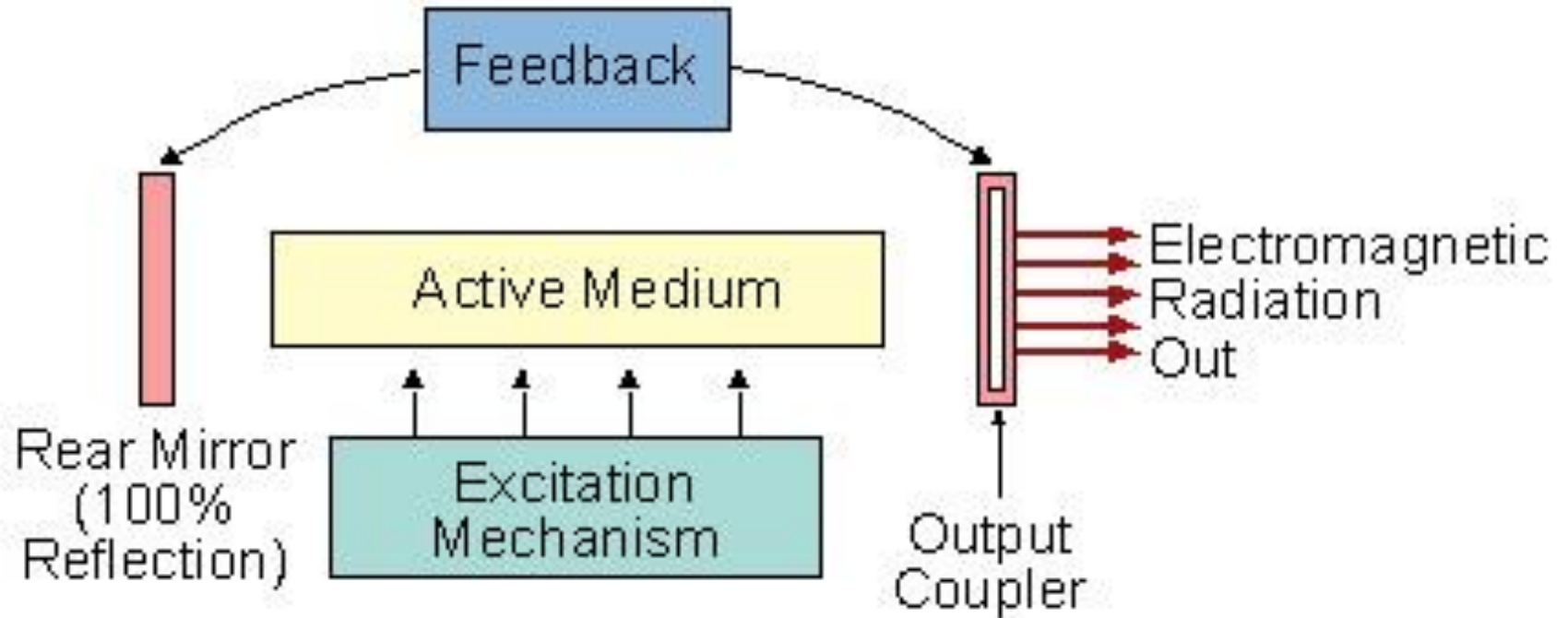


Αυθόρμητη εκπομπή φωτός



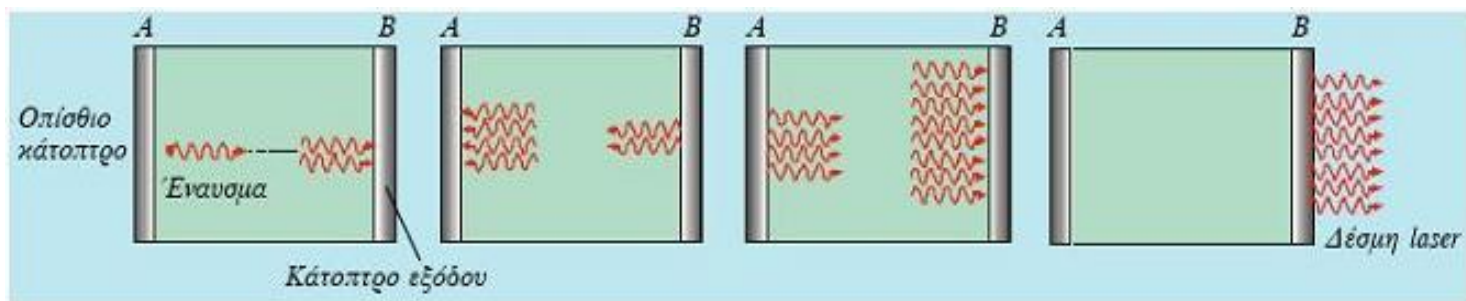
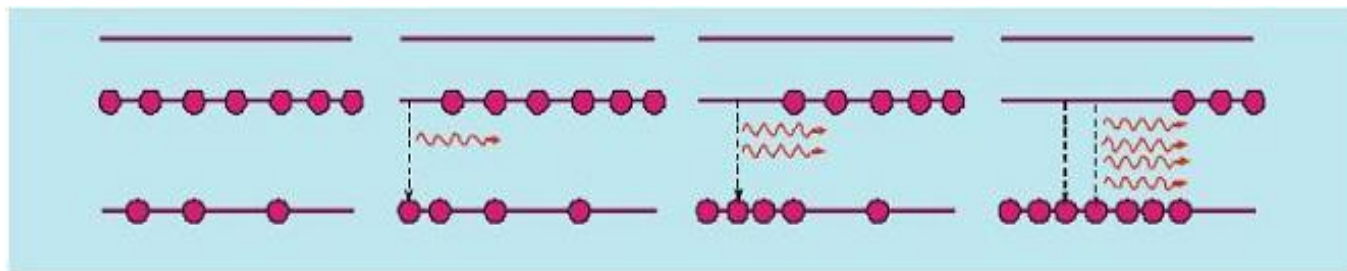
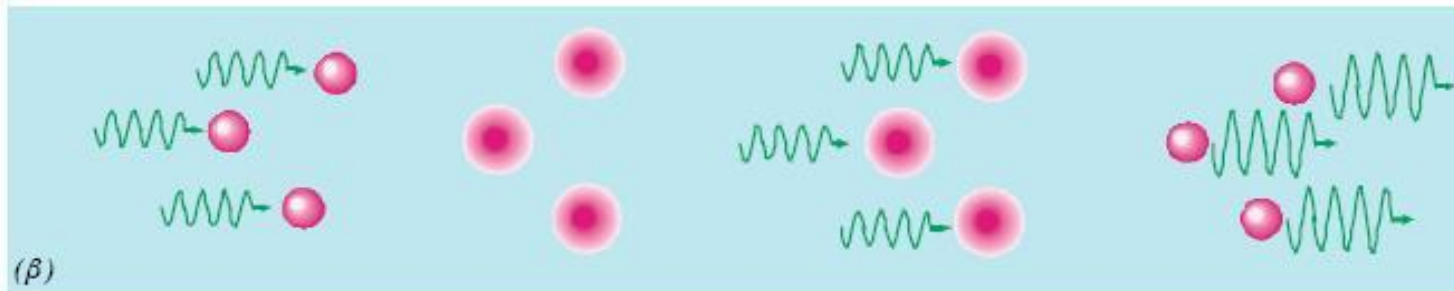
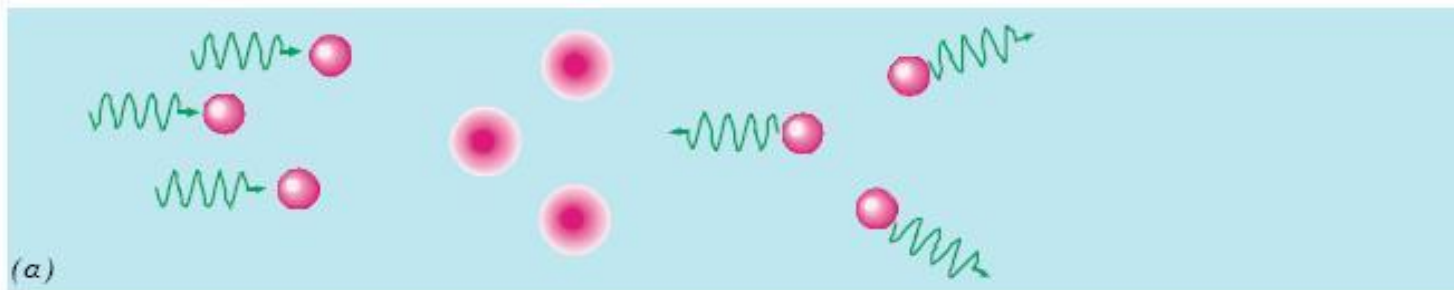
Επαγόμενη ή εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός

- Η κλασική διαδικασία δημιουργίας φωτός είναι η αυθόρμητη εκπομπή κατά την οποία τα διεγερμένα άτομα αποδιεγείρονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, δίνοντας φωτόνια των οποίων οι ιδιότητες δεν παρουσιάζουν καμία συσχέτιση.
- Επομένως, η ακτινοβολία που εκπέμπεται αυθόρμητα από κλασικές πηγές, αφενός διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο και αφετέρου η κατανομή της συχνότητας της (ή του μήκους κύματος) είναι ιδιαίτερα πλατιά.
- Αντίθετα, κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή, η δημιουργία του φωτονίου εξαρτάται από ήδη υπάρχοντα φωτόνια (δημιουργούμενα αρχικά με αυθόρμητη εκπομπή), τα οποία εξαναγκάζουν τα διεγερμένα άτομα να εκπέμψουν φωτόνια πανομοιότυπα με τα ήδη υπάρχοντα.
- Δηλαδή, ο μηχανισμός της εξαναγκασμένης εκπομπής προκαλεί τον πολλαπλασιασμό των φωτονίων, με τα δημιουργούμενα φωτόνια να έχουν όλα ακριβώς τις ίδιες ιδιότητες.
- Σαν αποτέλεσμα, η δέσμη laser έχει μοναδικές ιδιότητες όπως συμφωνία, μονοχρωματικότητα, κατευθυντικότητα και πυκνότητα ενέργειας, οι οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια. Αρχικά όμως, ας εξετάσουμε τη λειτουργία ενός laser.



Το laser αποτελείται από το ενεργό υλικό, τον μηχανισμό άντλησης και την οπτική κοιλότητα που υποστηρίζει τον μηχανισμό ανάδρασης και αποτελείται από δύο κάτοπτρα, ένα με ανακλαστικότητα 100% και ένα ημιδιαπερατό από το οποίο εξέρχεται η χρήσιμη ακτινοβολία.

- Το ενεργό υλικό μπορεί να είναι ένα κατάλληλο στερεό (π.χ. κρύσταλλος ή ημιαγώγιμο υλικό), υγρό (π.χ διάλυμα οργανικής χρωστικής) ή αέριο (π.χ. He-Ne ή CO₂).
- Το ενεργό υλικό διεγείρεται μέσω του μηχανισμού άντλησης (που μπορεί να είναι ηλεκτρική, οπτική ή χημική διαδικασία) με αποτέλεσμα την δημιουργία μέσω αυθόρμητης εκπομπής μικρού αριθμού φωτονίων, το μήκος κύματος των οποίων εξαρτάται από τις ενεργειακές στάθμες του ενεργού υλικού που συμμετέχουν στην διαδικασία διέγερσης.
- Τα φωτόνια αυτά ταξιδεύουν μέσα στο διεγερμένο ενεργό υλικό και πολλαπλασιάζονται μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, με τα δημιουργούμενα φωτόνια να παρουσιάζουν πανομοιότυπες ιδιότητες όπως μήκος κύματος, διεύθυνση διάδοσης και φάση.
- Ο πολλαπλασιασμός των φωτονίων συνεχίζεται μέσω πολλαπλών διαδρομών μέσα στην οπτική κοιλότητα και όταν ο αριθμός τους υπερβεί κάποιο όριο (υπερβεί τις απώλειες), εξέρχεται δέσμη laser από το ημιδιαπερατό κάτοπτρο.



Είδη των LASER

Τα laser διαιρούνται σε ομάδες σύμφωνα με την κατάσταση του ενεργού υλικού (στερεό, υγρό, αέριο, πλάσμα)

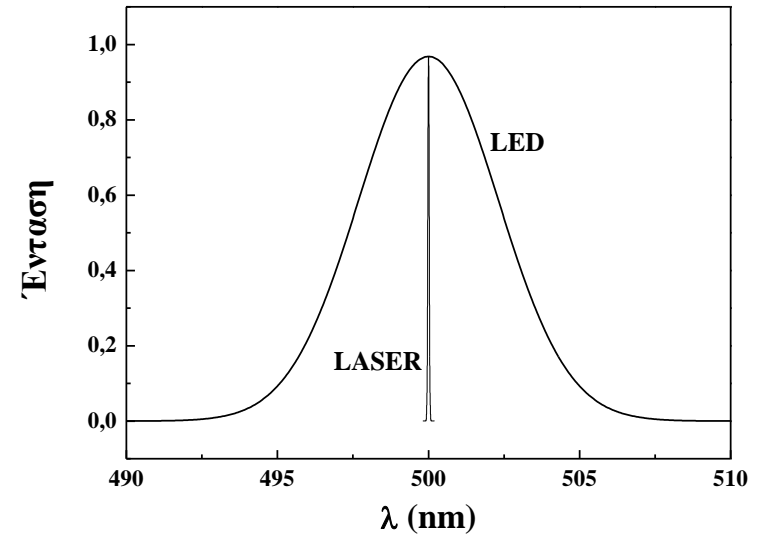
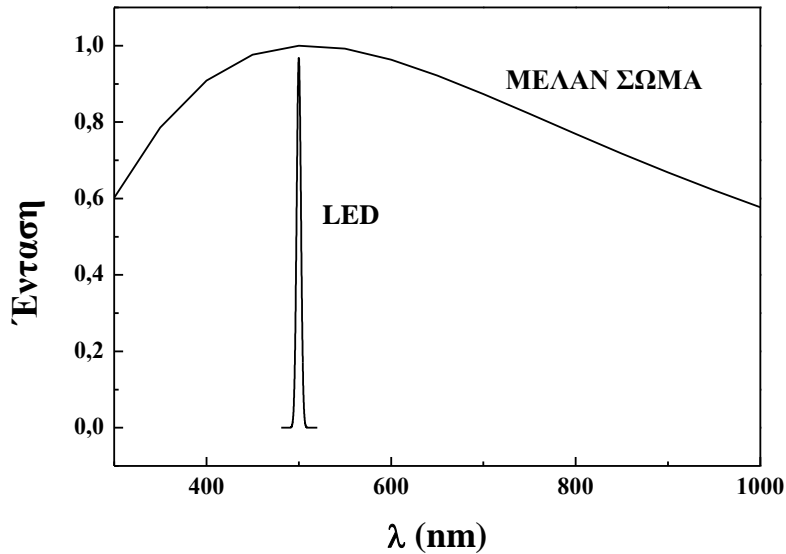
- Τα laser αέριας κατάστασης χωρίζονται σε τέσσερις υποομάδες:
 - ατόμων (π.χ. He-Ne και He-Cd)
 - ατμών μετάλλου (Cu, Au)
 - μορίων (CO_2 , N_2 , excimer)
 - ιοντικά (Ar^+ , Kr^+)
- Τα laser υγρής κατάστασης, που είναι κυρίως χρωστικών χρωμάτων
- Τα laser στερεής κατάστασης χωρίζονται σε: μονωτών (ρουβινίου, νεοδυμίου, αλεξανδρίτη) και ημιαγωγών (διοδικό)
- Τα ειδικά laser: ακτίνων X, ελεύθερων ηλεκτρονίων

- Σήμερα υπάρχει πληθώρα συστημάτων laser τα οποία διαφέρουν ως προς διάφορες λειτουργικές παραμέτρους τους όπως μήκος κύματος εκπομπής, ενέργεια εξόδου, χρονική εξέλιξη της λειτουργίας (παλμική ή συνεχή) κλπ.
- Οι δυνατότητες τους επεκτείνονται από το υπεριώδες στο υπέρυθρο, από συνεχή λειτουργία έως παλμούς διάρκειας fsec και συστήματα με ενέργεια κατάλληλη για ευθυγράμμιση έως και την κοπή ανοξείδωτου χάλυβα μεγάλου πάχους.
- Αντίστοιχα, είναι τεράστια η πληθώρα των εφαρμογών που τα laser έχουν ουσιαστικό ρόλο.
- Διάφοροι τομείς όπως βιομηχανία, επικοινωνίες, ιατρική, διαγνωστική και φυσική-χημεία, έχουν παρουσιάσει τα τελευταία χρόνια τεράστια εξέλιξη λόγω των νέων οριζόντων που άνοιξαν τα laser.
- Ο σκοπός του μαθήματος αυτού είναι οι εφαρμογές σε διατάξεις μέτρησης, ανίχνευσης και, ανάλυσης, οπότε θα εστιάσουμε σε αυτές και σε ποιες ιδιότητες βασίζονται.

Ιδιότητες laser

- Λόγω της αρχής λειτουργίας του, το laser παρουσιάζει μερικές μοναδικές ιδιότητες.
- Οι ιδιότητες που παίζουν ουσιαστικό ρόλο στις εφαρμογές είναι:
 - Μονοχρωματικότητα
 - Συμφωνία
 - Κατευθυντικότητα
 - Πυκνότητα ενέργειας
 - Μήκος κύματος
 - Πόλωση
- Ας δούμε πως αυτές οι ιδιότητες οδηγούν σε εφαρμογές μέτρησης, ανίχνευσης και ανάλυσης.

Μονοχρωματικότητα



- Η φασματική γραμμή εκπομπής από μία πηγή laser είναι ιδιαίτερα λεπτή, μία 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 500 nm παρουσιάζεται στο σχήμα για μέλαν σώμα, LED και laser, όπου είναι εμφανής η τεράστια διαφορά που επιτυγχάνεται με το laser.

- Η ιδιότητα του στενού φασματικού πλάτους προέρχεται από δύο βασικές προϋποθέσεις της λειτουργίας ενός συστήματος laser:
 - τα φωτόνια προέρχονται από μετάπτωση μεταξύ δύο καταστάσεων
 - μέσα σε μια κοιλότητα μπορούν να υποστηριχθούν μόνο συγκεκριμένοι ρυθμοί ταλάντωσης.
- Το στενό φασματικό πλάτος αποτελεί ένα ισχυρότατο εργαλείο σε διατάξεις στοιχειακής ανάλυσης όπως TOF-MS, LIF κλπ.
- Λόγω της ιδιότητας αυτής, η ακτινοβολία laser μπορεί να διεγείρει επιλεκτικά άτομα ή μόρια και να οδηγήσει στην αναγνώριση τους μέσω του συνεπαγόμενου ιονισμού ή φθορισμού.

Συμφωνία

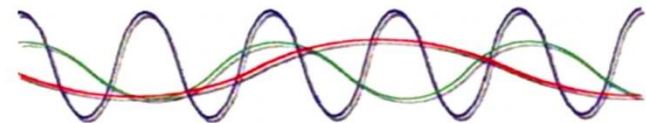
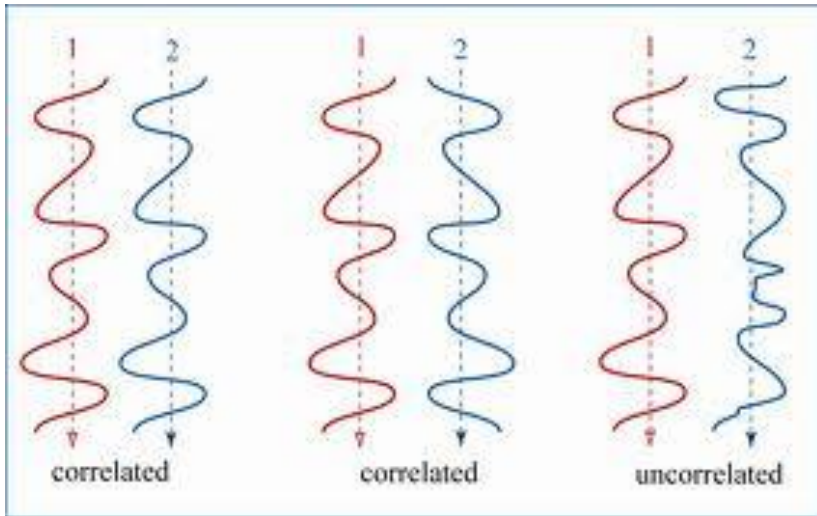
- Μια ιδιότητα με τεράστια σημασία είναι η συμφωνία που παρουσιάζει η ακτινοβολία laser.
- Η συμφωνία σαν έννοια είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και ο απλούστερος τρόπος για να περιγραφεί είναι η θεώρηση των φωτονίων ως επίπεδων ΗΜ κυμάτων.
- Κάθε ένα από αυτά, για διάδοση στην διεύθυνση z, περιγράφεται από μία εξίσωση της μορφής:

$$y=A\cos(\omega t-kz+\phi)$$

όπου y η στιγμιαία τιμή του πλάτους του κύματος, A είναι το μέγιστο πλάτος, ω η γωνιακή συχνότητα ($\omega=2\pi f$ όπου f η συχνότητα), k είναι το κυματάνυσμα που ορίζεται ως $k=2\pi/\lambda$ (με λ το μήκος κύματος), ϕ η αρχική φάση του κύματος (στην πηγή του) και $\omega t-kz+\phi$ η φάση του κύματος για διάφορες τιμές του t και z .

- Έστω μία κλασσική πηγή φωτός όπου τα κύματα εκπέμπονται μεν με την ίδια φάση αλλά λόγω π.χ. αυθόρμητης εκπομπής των φωτονίων, η γωνιακή συχνότητα τους μπορεί να διαφέρει σημαντικά.
- Σαν αποτέλεσμα, ενώ τα κύματα ξεκινούν σε φάση (έχουν δηλαδή την ίδια αρχική φάση ϕ), μετά από χρόνο t σχετικά μεγάλο (ή απόσταση z αντίστοιχα), οι φάσεις των επιμέρους κυμάτων διαφέρουν σημαντικά καθώς θα διαφέρουν τα ω και k (είναι π.χ. $\omega_1 t - k_1 z + \phi$, $\omega_2 t - k_2 z + \phi$, $\omega_3 t - k_3 z + \phi$ κλπ).
- Επομένως τα κύματα θα έχουν διαφορετική φάση, δηλαδή θα είναι εκτός φάσης.
- Το πρόβλημα στις κλασσικές πηγές γίνεται ακόμα μεγαλύτερο αν κάποιος λάβει υπόψη ότι συνήθως η αρχική φάση ϕ δεν είναι η ίδια για όλα τα εκπεμπόμενα κύματα.

- Σε ένα laser αντίστοιχα, η δημιουργία των φωτονίων με εξαναγκασμένη εκπομπή έχει σαν αποτέλεσμα, όλα τα φωτόνια είναι πανομοιότυπα.
- Δηλαδή όλα παρουσιάζουν και την ίδια αρχική φάση αλλά και πολύ στενή κατανομή γωνιακών συχνοτήτων και κυματανυσμάτων.
- Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η φάση των ΗΜ κυμάτων να παραμένει περίπου ίδια για μεγάλο χρονικό διάστημα t (ή απόσταση z αντίστοιχα), δηλαδή τα φωτόνια παραμένουν σε φάση για μεγάλο χρόνο (αλλά και σε μεγάλη περιοχή του χώρου).
- Η συνθήκη αυτή καθορίζει την συμφωνία της ακτινοβολίας laser, ιδιότητα η οποία οδηγεί ιδανικά στην ικανότητα μόνιμης γνώσης της φάσης σε μία δέσμη laser με δυνατότητα πρόβλεψης σε σχέση με την μεταβολή του χώρου ή του χρόνου.



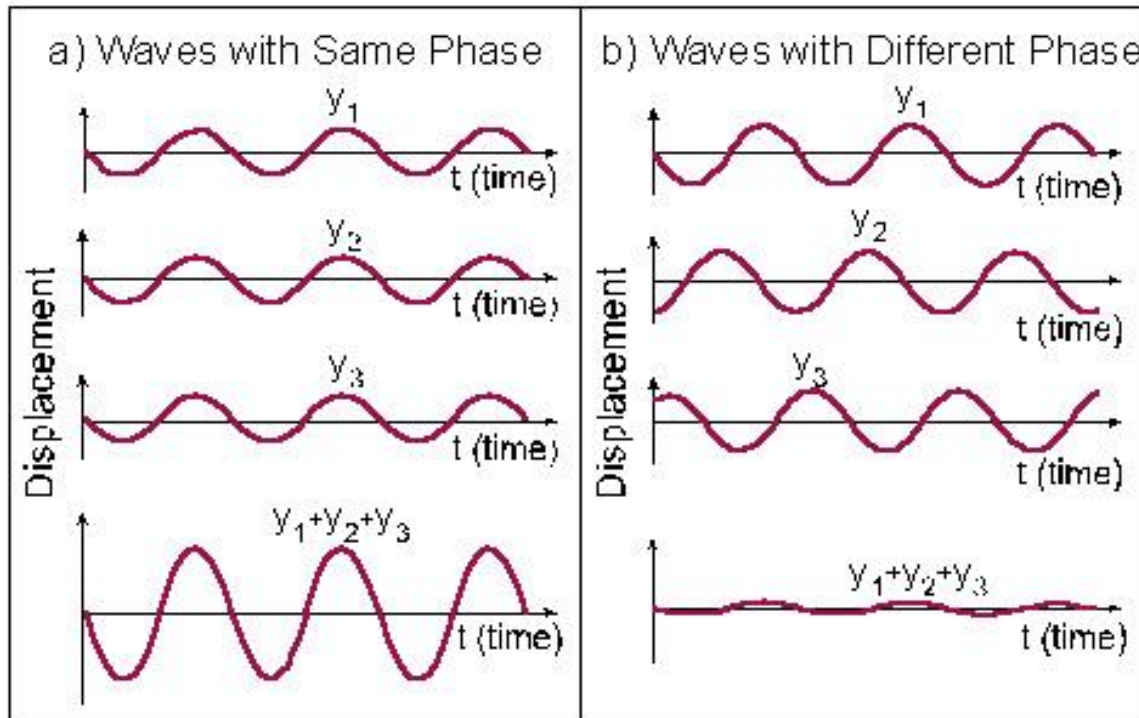
Sunlight (many different colors)



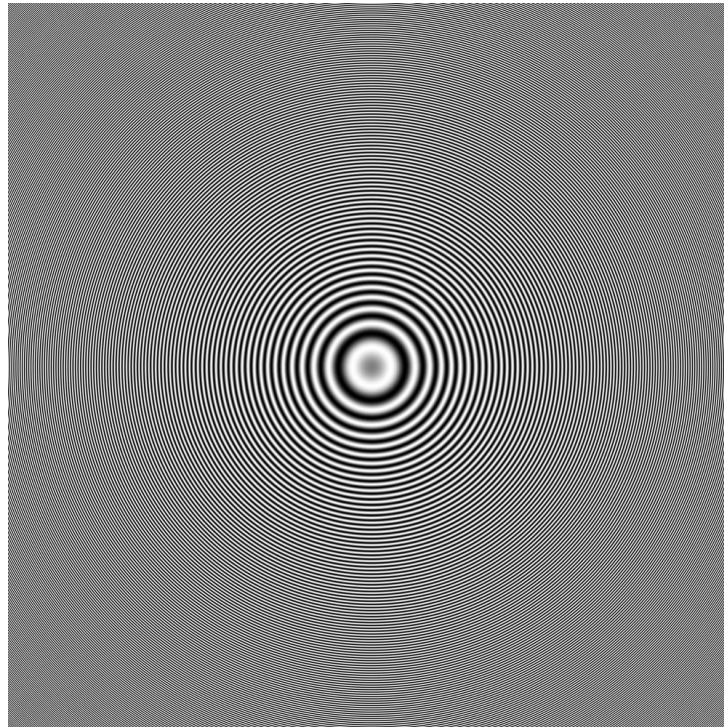
LED: one color (monochromatic) and waves not in phase (non-coherent)



LASER: One color (monochromatic) and waves in phase (coherent)



- Η συμφωνία σε μία δέσμη λέιζερ οδηγεί σε μερικές μοναδικές εφαρμογές όπως π.χ. η συμβολομετρία ή η ολογραφία, όπου η ύπαρξη συμφωνίας είναι αναγκαία προϋπόθεση.
- Ταυτόχρονα όμως, εισάγει ένα μοναδικό πλεονέκτημα κατά την ταυτόχρονη διάδοση πολλών ΗΜ κυμάτων. Αν βρεθούν ταυτόχρονα πολλά κύματα σε ένα σημείο του χώρου, αν τα κύματα είναι εκτός φάσης, το συνολικό επαγόμενο πλάτος θα είναι σχεδόν μηδέν (αποσβετική συμβολή κυμάτων). Αντίθετα, αν τα κύματα είναι σε φάση, το συνολικό πλάτος θα είναι πολύ μεγάλο (ενισχυτική συμβολή).

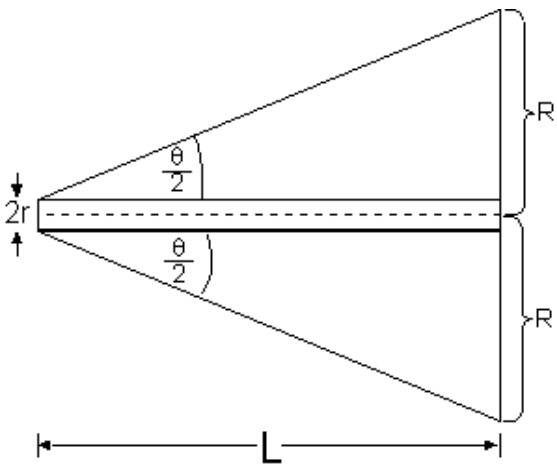


- Σε πρώτη προσέγγιση, για κάθε Η.Μ. κύμα, μπορούμε να εισαγάγουμε δύο έννοιες συμφωνίας, τη χωρική και τη χρονική συμφωνία.
- Για να ορίσουμε τη χωρική συμφωνία, ας θεωρήσουμε δυο σημεία του χώρου P_1 και P_2 , τα οποία κατά τη χρονική στιγμή $t=0$, βρίσκονται πάνω στο ίδιο μέτωπο κύματος,
- Επομένως, η διαφορά μεταξύ των φάσεων των δύο αντίστοιχων ηλεκτρικών πεδίων $E_1(t)$ και $E_2(t)$ θα είναι μηδέν στο χρόνο $t=0$.
- Αν αυτή η διαφορά παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή $t>0$, θα λέμε ότι υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων (ιδανική χωρική συμφωνία).
- Στην πράξη βέβαια, για κάθε σημείο P_1 , το σημείο P_2 πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κάποια πεπερασμένη περιοχή γύρω από το P_1 , εάν θέλουμε να έχουμε καλό φασικό συσχετισμό, οπότε έχουμε μερική χωρική συμφωνία.

- Για να ορίσουμε τη χρονική συμφωνία, θεωρούμε τώρα το ηλεκτρικό πεδίο του Η.Μ κύματος σε ένα δεδομένο σημείο P σε χρόνους t και $t+\tau$.
- Εάν για δεδομένη χρονική υστέρηση τ , η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τιμών του πεδίου είναι ίδια για κάθε χρονική στιγμή t , θα λέμε πως υπάρχει χρονική συμφωνία για το χρονικό διάστημα τ .
- Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε τιμή του τ , το Η.Μ. κύμα θα λέγεται πως έχει τέλεια χρονική συμφωνία.
- Εάν αυτό συμβαίνει μόνο για χρονική υστέρηση τ τέτοια ώστε $0 < \tau < \tau_0$, το κύμα θα λέγεται πως έχει μερική χρονική συμφωνία, με χρόνο συμφωνίας ίσο προς τ_0 .
- . Αξίζει να τονιστεί εδώ ότι η έννοια της συμφωνίας συνδέεται άμεσα με τη μονοχρωματικότητα, καθώς ένα Η.Μ. κύμα με χρόνο συμφωνίας τ_0 θα έχει εύρος ζώνης $\Delta\nu = 1/\tau_0$.
- Οι έννοιες χρονικής και χωρικής συμφωνίας μπορούν να είναι ανεξάρτητες καθώς υπάρχουν κύματα με τέλεια χωρική συμφωνία αλλά μόνο περιορισμένη χρονική και αντίστροφα.

Κατευθυντικότητα

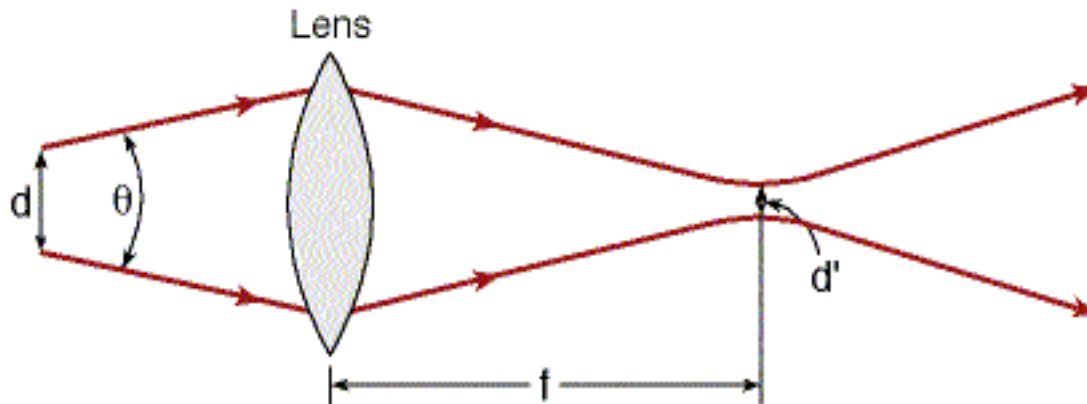
- Στις κλασικές πηγές η εκπεμπόμενη ακτινοβολία διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις και εξασθενεί σύμφωνα με τον νόμο $1/r^2$. Η δέσμη από ένα laser εμφανίζει ισχυρή κατευθυντικότητα, η οποία περιγράφεται σαν μία ελάχιστη απόκλιση της δέσμης.
- Αυτό είναι επακόλουθο της λειτουργίας λέιζερ (πανομοιότυπα φωτονία) ενώ η οπτική κοιλότητα περιορίζει την ενίσχυση μόνο παράλληλα στον άξονα της).



$$\tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2} = \frac{R - r}{L}$$

- Έστω μια κυκλική δέσμη εξερχόμενη από laser με διατομή $2r$, η οποία σε απόσταση L γίνει $2R$. Η απόκλιση της δέσμης θ σε rad ορίζεται με βάση την συνάρτηση στο πλάι, με $2R \ll L$ λόγω της μεγάλης κατευθυντικότητας.
- Στην πράξη, η γωνία θ έχει τιμές 1 mrad έως 1 μrad (δέσμη με αρχική διάμετρο 2 mm, σε απόσταση 10 m έχει στη χειρότερη περίπτωση διάμετρο 12 mm περίπου).

- Γενικά, η κατευθυντικότητα της δέσμης laser σχετίζεται με την ικανότητα της να μεταφέρει μεγάλη πυκνότητα ενέργειας σε μεγάλη απόσταση.
- Επομένως, η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης laser είναι ιδιαίτερα μεγάλη, με αποτέλεσμα μία πληθώρα εφαρμογών στην βιομηχανία, την ιατρική κλπ.
- Η πυκνότητα ενέργειας μπορεί να γίνει πάρα πολύ μεγαλύτερη καθώς η δέσμη μπορεί να εστιαστεί ισχυρά. Σαν παράδειγμα, με $\theta=1$ mrad και $f=10$ cm έχουμε $d\approx 10$ μm , άρα τεράστια πυκνότητα ενέργειας.



Πυκνότητα ενέργειας

- Για να ορίσουμε την ικανότητα μεταφοράς ενέργειας με την ακτινοβολία, υπάρχει η πυκνότητα ενέργειας με μονάδες J/m^2 και η ένταση ακτινοβολίας με μονάδες W/m^2 .
- Μία δέσμη laser παρουσιάζει ισχυρή κατευθυντικότητα και επομένως, η πυκνότητα ενέργειας που μεταφέρεται όχι μόνο είναι ιδιαίτερα μεγάλη αλλά και σε μία πρώτη προσέγγιση παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την απόσταση.
- Αντίθετα, σε μία κλασσική πηγή όπου έχουμε εκπομπή σε στερεά γωνία 4π (εκπομπή προς όλες τις διευθύνσεις), όχι μόνο η πυκνότητα ενέργειας είναι μικρή αλλά και ελαττώνεται πολύ γρήγορα όπως απομακρυνόμαστε από την πηγή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πυκνότητα ενέργειας που μεταφέρεται από μία δέσμη laser να είναι τεράστια σε σχέση με οποιαδήποτε κλασσική πηγή.
- Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι πρέπει σε κάθε περίπτωση να αποφεύγεται η απ' ευθείας παρατήρηση ενός laser με το μάτι. Μάλιστα τονίζεται ότι η πυκνότητα ενέργειας από το απλούστερο laser είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του ήλιου.

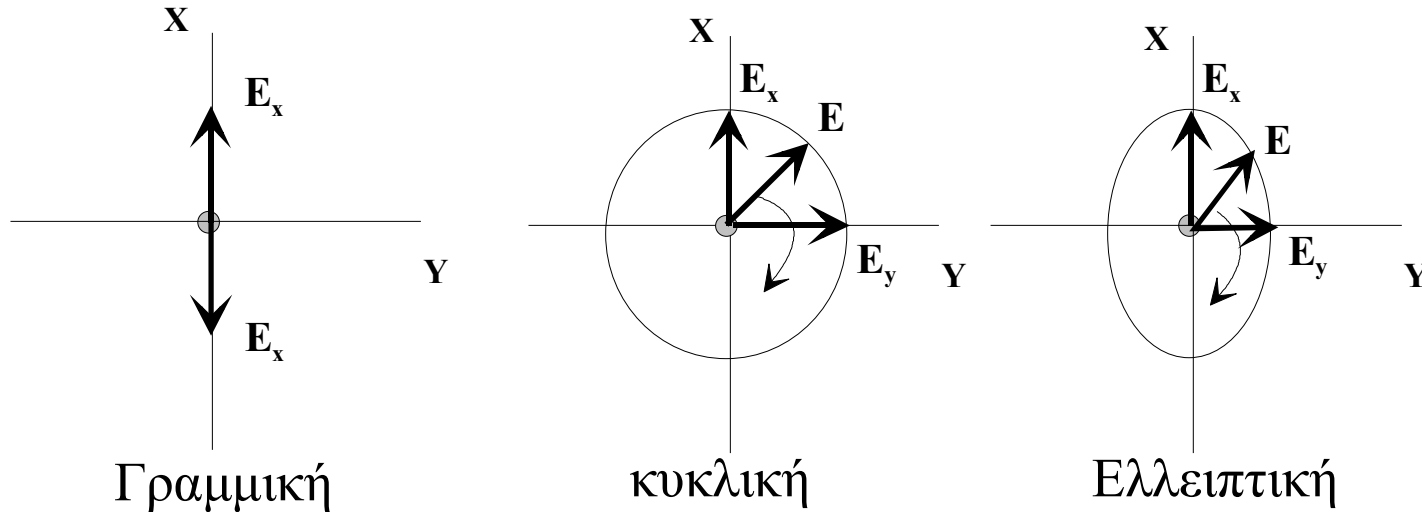
- Για να γίνει αυτό περισσότερο κατανοητό, ας συγκρίνουμε ένα απλό laser ευθυγραμμίσεων He-Ne ισχύος 5 mW με τον ήλιο, ο οποίος ακτινοβολεί συνολικά $3.8 \cdot 10^{26}$ W με πυκνότητα ισχύος στη γη 1350 W/m². Η διατομή του laser είναι περίπου 2 mm (ακόμα και σε απόσταση 1 m), επομένως η πυκνότητα ισχύος που μεταφέρει η δέσμη του είναι 1600 W/m². Δηλαδή, η πυκνότητα ενέργειας από αυτό το απλό laser είναι μεγαλύτερη από αυτή του ήλιου.
- Αντίστοιχα, ας συγκρίνουμε το ίδιο laser με λάμπα πυρακτώσεως 100 W (οπτική ισχύ) σε απόσταση 1 m. Λόγω της εκπομπής από την λάμπα προς όλες τις κατευθύνσεις, η ακτινοβολία σε απόσταση r έχει κατανεμηθεί σε σφαίρα επιφάνειας $4\pi r^2$. Άρα, η λάμπα των 100 W σε απόσταση 1 m προσφέρει πυκνότητα ισχύος 8 W/m², 200 φορές μικρότερη από αυτή του laser.
- Είναι φανερό επομένως ότι μία δέσμη laser μεταφέρει τεράστια πυκνότητα ενέργειας ή ισχύος αντίστοιχα.

- Η ιδιότητα αυτή σε συνδυασμό με την κατευθυντικότητα δίνει στο laser τεράστιες δυνατότητες σε σχέση με εφαρμογές μέτρησης απόστασης, radar laser αλλά και συστήματα ευθυγράμμισης, καθώς η δέσμη μπορεί να ταξιδέψει πάρα πολύ μακριά.
- Ταυτόχρονα όμως, η πυκνότητα αυτή ενέργειας, ειδικά η σχετική με εστιασμένες δέσμες από μεγάλα συστήματα laser, προσφέρει τεράστιες δυνατότητες σε κατεργασία υλικών καθώς δίνει την ικανότητα εφαρμογής τεραστίων ποσοτήτων ενέργειας σε πολύ μικρές διαστάσεις.
- Σαν παράδειγμα, η εφαρμογή αυτής της πυκνότητας ενέργειας προκαλεί τεράστια αύξηση της θερμοκρασίας άρα και κοπή, διάτρηση ή συγκόλληση ακόμα και μεταλλικών τμημάτων.
- Οι τεράστιες δυνατότητες φαίνονται ακόμα καλύτερα στην περίπτωση παλμικών laser με πολύ μικρή διάρκεια παλμού (της τάξης 10^{-15} sec). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι πυκνότητες ισχύος είναι τόσο μεγάλες ώστε το ηλεκτρικό πεδίο υπερβαίνει κατά πολύ αυτό που συγκρατεί τα ηλεκτρόνια στα άτομα.

Μήκος κύματος

- Τα laser εκπέμπουν στην περιοχή γύρω από το ορατό. Λαμβάνοντας υπόψη και την μεγάλη κατευθυντικότητα της δέσμης laser, αυτή αποτελεί μία τέλεια ορατή γραμμή πολύ μεγάλου μήκους. Δηλαδή, είναι το τέλειο εργαλείο για ευθυγραμμίσεις.
- Ταυτόχρονα, το μήκος κύματος είναι της τάξης μm . Επομένως, αν η ακτινοβολία χρησιμοποιείται σε σύστημα αντίστοιχο του radar, η διακριτική της ικανότητα είναι της τάξης μm (σε αντίθεση με cm έως m σε κλασσικά radar). Η ιδιότητα αυτή δίνει την δυνατότητα π.χ. παρακολούθησης των ανέμων μέσω της μετακίνησης αερολυμάτων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.
- Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα μήκη κύματος αυτά είναι ιδανικά για την διέγερση υλικών (ηλεκτρονικές μεταπτώσεις), οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τεχνικές στοιχειακής ανάλυσης αλλά και για χρήσεις σε οπτικές ίνες.

Πόλωση



- Η πόλωση καθορίζεται από τις συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου.
- Για ένα ΗΜ κύμα με διάδοση στον άξονα z , αν το E έχει μόνο μία συνιστώσα (x ή y) τότε έχουμε γραμμική πόλωση και το E ταλαντώνεται πάντα στο ίδιο επίπεδο.
- Αν το ηλεκτρικό πεδίο έχει δύο μη μηδενικές συνιστώσες, x και y (της ίδιας συχνότητας) τότε η πόλωση ονομάζεται ελλειπτική και το διάνυσμα του E περιστρέφεται κατά τη διάδοση του Η/Μ κύματος.
- Αν $E_x = E_y$ και η διαφορά φάσης μεταξύ τους είναι $\pi/2$, τότε η πόλωση είναι κυκλική.

- Γενικά, κάθε Η/Μ κύμα θα έχει δύο συνιστώσες και θα ισχύει:

$$E_x = E_1 \sigma \nu(\omega t - kz) \quad E_y = E_2 \sigma \nu(\omega t - kz + \delta) \quad \mu\epsilon \quad \vec{E} = \hat{x}E_x + \hat{y}E_y$$

- Για $E_y=0$ έχω γραμμική πόλωση, για $E_1=E_y$ και $\delta=\pi/2$ έχω κυκλική πόλωση, ενώ για $E_x \neq E_y$ και $\delta=\kappa$, με κ τυχαίο έχω ελλειπτική πόλωση.
- Η ΗΜ ακτινοβολία από κλασσικές πηγές δεν είναι πολωμένη και το φως ονομάζεται φυσικό. Υπάρχει η δυνατότητα πόλωσης στο φυσικό φως, όμως η διαδικασία αυτή είναι σε βάρος της ενέργειας.
- Αντίθετα, η οπτική κοιλότητα ενός συστήματος laser μπορεί πολύ εύκολα να υποστηρίξει την δυνατότητα εκπομπής πολωμένης ακτινοβολίας. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, όπως η χρήση παραθύρου εξόδου υπό γωνία Brewster, οι οποίες προσφέρουν δέσμη με πολύ καλά χαρακτηριστικά πόλωσης.
- Αναφορικά με τις δυνατότητες που προσφέρει η πόλωση, εκτός από την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών όπως οι αισθητήρες πεδίων, διευκολύνει την πολύ καλή ποιότητα λειτουργίας των συμβολομετρικών διατάξεων.