



**Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
(έδρα: Σπάρτη)  
Τ.Ε.Ι ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**

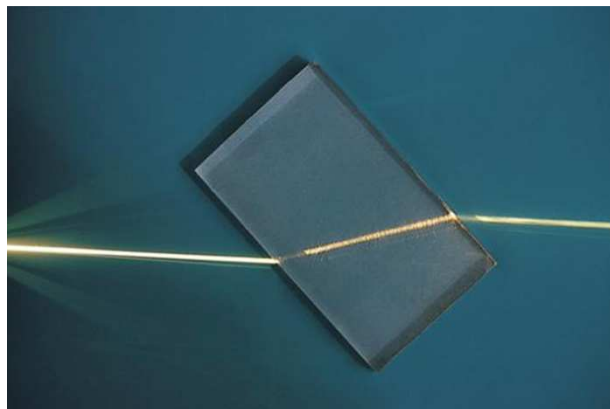
## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΔΙΠΛΟ-  
ΘΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΟΥ, ΤΟΥ  
ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΛΑΣΤΟΟΠΤΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ**

**ΦΤΟΥΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**A.M 2006078**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Μπουλμέτης**



**Σπάρτη 2017**

## **ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ**

"Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάση επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δε μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας."

Όνομα και Επώνυμο Συγγραφέα (Με Κεφαλαία): .....

Υπογραφή (Ολογράφως, χωρίς μονογραφή): .....

Ημερομηνία (Ημέρα – Μήνας – Έτος): .....

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

2

Στην παρούσα εργασία θα γίνει θεωρητική μελέτη διαμόρφωσης φωτός και διπλοθλαστικότητας υλικών με χρήση του ηλεκτροοπτικού, του μαγνητοοπτικού και του ελαστοοπτικού φαινομένου. Θα μελετηθεί θεωρητικά η ικανότητα κάποιων σύνθετων υλικών (διπλοθλαστικοί κρύσταλλοι) να διαμορφώνουν το φως που διέρχεται από μέσα τους και ως προς την έντασή του, αλλά και ως προς την πόλωσή του. Επίσης, θα μελετηθεί η κατάλληλη επιλογή κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται ως διαμορφωτές φωτός. Θα αναφερθεί η χρήση των πλακιδίων φάσης στα Lasers και θα γίνει μελέτη των μη-γραμμικών οπτικών φαινομένων. Στη συνέχεια θα εξεταστούν οι ιδιότητες φωτός Laser, οι εφαρμογές του Laser και τα πλεονεκτήματά του έναντι των άλλων κλασσικών τεχνικών επεξεργασίας υλικών. Τέλος, θα γίνει αναλυτική αναφορά στη χρήση φωτός Laser σε όλους τους τομείς της σύγχρονης επιστήμης και της καθημερινής ζωής.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

2

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΟΘΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	7
2.1. Φωτοδιαθλαστικό φαινόμενο .....	7
2.2 Διπλοθλαστικότητα .....	10
2.3. Φυσική Διπλοθλαστικότητα.....	15
2.4. Οπτική ενεργότητα.....	23
2.5. Οπτικές ιδιότητες παρουσία εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου .....	29
2.6. Γραμμικό ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο (πρωτεύον ηλεκτρο-οπτικό).....	30
2.7. Ακουστοοπτικό Φαινόμενο.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- Κατάλληλη επιλογή κρυστάλλων – Είδη κρυστάλλων.....	37
3.1. Ο Ασβεστίτης ή Καλσίτης.....	37
3.2. Χαλαζίας.....	40
3.3. Ολιβίνης.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Χρήση πλακιδίων φάσης στα Lasers.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Φαινόμενα μη-γραμμικής οπτικής.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΕΙΖΕΡ .....	63
6.1. Εισαγωγή .....	63
6.2. Τι είναι το Λέιζερ .....	65
6.3. Αρχή λειτουργίας .....	66
6.3.1. Αυθόρμητη εκπομπή . .....	67
6.3.2 . Εξαναγκασμένη εκπομπή .....	68
6.4. Τύποι λέιζερ .....	70
6.5. Ιδιότητες Laser .....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ ΖΩΗ .....	74
7.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ .....	74

7.1.1. Κατεργασία υλικών.....	74
7.1.2. Βιομηχανικοί αυτοματισμοί.....	76
7.1.3. Μετρολογία.....	77
7.1.4. Κατασκευή- Τοπογραφία – Δομική.....	78
7.1.5.Χημεία.....	79
7.1.6. Ιατρική.....	80
7.1.7. Επικοινωνίες- οπτικές ίνες.....	82
7.1.8. Στρατιωτική τεχνολογία.....	83
7.2. Χρήση του laser στην καθημερινή ζωή .....	84
7.2.1 Εκτυπωτές laser .....	84
7.2.2. CD (compact disk) .....	85
7.2.3. Laser σαρωτές για bar codes .....	86
7.2.4. Ολογραφία.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – APPLETS.....	88
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	97

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ Ιωάννη Μπουλμέτη για την επίβλεψη, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε για την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε, με την βοήθεια του ηλεκτροοπτικού, του μαγνητοοπτικού και του ελαστοοπτικού φαινομένου, κατά πρώτον η διαμόρφωση του φωτός και έπειτα η διπλοθλαστικότητα υλικών. Βάσει αυτών των πειραμάτων, βρέθηκε ότι κάποια υλικά (κρύσταλλοι) παρουσιάζουν αυτό το φαινόμενο της διπλοθλαστικότητας πιο έντονα και γι'αυτό τον λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές και στην καθημερινή μας ζωή αλλά και στις επιστήμες. Έτσι φθάνουμε και στο λέιζερ, που στην σημερινή εποχή έχει πάρα πολλές εφαρμογές αλλά αναμένεται να εξελιχθεί ακόμα περισσότερα στο μέλλον.

.Αναλυτικότερα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του φαινομένου της φωτοδιάθλασης και της διπλοθλαστικότητας. Επίσης, μελετάται η οπτική ενεργότητα και το ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο.

Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο μελετώνται τα είδη των κρυστάλλων που έχουν την ιδιότητα της διπλοθλαστικότητας και περιγράφονται οι ιδιότητες τους

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται τα λεγόμενα πλακίδια καθυστέρησης φάσης και οι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται. Ειδικότερα αναφέρεται η χρήση τους στα λέιζερ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται το φαινόμενο της μη-γραμμικής οπτικής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετώνται οι ιδιότητες του laser, οι τύποι και οι διάφορες κατηγορίες laser καθώς και οι τρόποι με τους οποίους λειτουργεί το laser.

Στην συνέχεια στο έκτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική αναφορά στην χρήση του λέιζερ στις επιστήμες αλλά και στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται μερικές εφαρμογές (applies) με τις οποίες ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει και να πειραματιστεί με τις εφαρμογές του laser.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2

### ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΟΘΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

#### 2.1. Φωτοδιαθλαστικό φαινόμενο

Το φωτοδιαθλαστικό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Arthur Ashkin και τους συνεργάτες του στα εργαστήρια Bell στα 1966. Η ανάδειξη του φαινομένου προήλθε από ένα κρύσταλλο νιοβικού λιθίου ( $\text{LiNbO}_3$ ) κατά την διάρκεια πειραμάτων που αφορούσαν την παραγωγή δεύτερης αρμονικής (second harmonic generation). (Ashkitinetal 1966)

Σε ένα από αυτά μια δέσμη laser φώτισε τον κρύσταλλο, που αποκρίθηκε αρκετά ικανοποιητικά επιτρέποντας στο φως να διέλθει ανεπηρέαστο. Όμως, μετά από λίγα λεπτά ο κρύσταλλος άρχισε να παραμορφώνει την δέσμη σκεδάζοντας φως σε όλο το εργαστήριο. Με κάποιο τρόπο το φως του laser είχε αλλάξει τις οπτικές ιδιότητες του ίδιου του κρυστάλλου. Αυτό το φωτοδιαθλαστικό φαινόμενο παρέμενε στον κρύσταλλο για μέρες. Αντίθετα, όταν οι ερευνητές φώτιζαν τον κρύσταλλο με μια ομοιόμορφη δέσμη φωτός, αυτός και πάλι επανερχόταν στην αρχική του κατάσταση αφήνοντας ανεπηρέαστη την διερχόμενη δέσμη.

Κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 χρόνων έχει ανακαλυφθεί ένα ευρύ φάσμα φωτοδιαθλαστικών υλικών που συμπεριλαμβάνει μονωτές, ημιαγωγούς και σύνθετες οργανικές ενώσεις. (Optical Society of America 1991)

Τα φωτοδιαθλαστικά υλικά, όπως και τα φωτογραφικά φιλμ, αλλάζουν ταχύτατα τις οπτικές τους ιδιότητες όταν εκθέτονται σε ισχυρό φωτισμό ενώ αποκρίνονται αργά όταν εκθέτονται σε χαμηλό φωτισμό και είναι ικανά να



καταγράφουν μεγάλο όγκο πληροφοριών. Αντίθετα από το κοινό φωτογραφικό φιλμ, στα φωτοδιαθλαστικά υλικά η καταγεγραμμένη εικόνα μπορεί να σβηστεί και να ξαναγραφτεί απεριόριστες φορές στον ίδιο κρύσταλλο. Εξαιτίας της ευαισθησίας τους και των μοναδικών ιδιοτήτων τους, τα φωτοδιαθλαστικά υλικά έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία επεξεργασίας δεδομένων στους λεγόμενους «οπτικούς υπολογιστές». Θεωρητικά, αυτές οι μονάδες θα επιτρέψουν στους οπτικούς υπολογιστές να επεξεργαστούν πληροφορίες με ρυθμούς πολύ υψηλότερους από τους αντίστοιχους των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Χρησιμοποιώντας φωτοδιαθλαστικά υλικά, ερευνητές έχουν ήδη κατασκευάσει το οπτικό ανάλογο τρανζίστορ (Quantum Electron 1999): όταν δύο δέσμες laser συμβάλλουν εσωτερικά ενός φωτοδιαθλαστικού κρυστάλλου, η μια δέσμη μπορεί να ελέγξει ή να ενισχύσει την άλλη. Τα φωτοδιαθλαστικά υλικά βρίσκονται επίσης στον πυρήνα συσκευών που ανιχνεύουν τις ακμές οπτικών ειδώλων, συνδέουν δίκτυα πηγών laser και αποθηκεύουν τρισδιάστατες πληροφορίες.

Εξαιτίας του ότι οι οπτικές ιδιότητες των φωτοδιαθλαστικών υλικών μπορούν να μεταβληθούν από το ίδιο το φως που διέρχεται από αυτά, κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-γραμμικών οπτικών μέσων. Αντίθετα, στα γραμμικά οπτικά μέσα, όπως οι φακοί, τα πρίσματα και οι πολωτές, οι δέσμες του φωτός διέρχονται απλώς από αυτά χωρίς να αλλάζουν τις οπτικές ιδιότητες των υλικών.

Το φωτοδιαθλαστικό φαινόμενο σχετίζεται στενά με ένα ακόμη μη-γραμμικό οπτικό φαινόμενο γνωστό ως φωτοχρωμικό φαινόμενο. Ένα φωτοχρωμικό υλικό μπορεί να αλλάξει το ποσοστό του φωτός που απορροφάται από αυτό. Τα φωτοχρωμικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε ορισμένα γυαλιά ηλίου, σκουραίνουν όταν εκτεθούν στο ισχυρό φως του ήλιου, ενώ είναι διαυγή σε σκοτεινούς χώρους.

Στα φωτοδιαθλαστικά υλικά, το φως που προσπίπτει στο υλικό καθορίζει το πόσο γρήγορα διαδίδεται μέσα από αυτό. Πιο συγκεκριμένα το φωτοδιαθλαστικό φαινόμενο είναι μια διαδικασία κατά την οποία το φως μεταβάλλει τον δείκτη διάθλασης ενός υλικού. (Ashltinetal 1966)

Στα περισσότερα διαφανή υλικά ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται όταν αυτά εκθέτονται σε πολύ ισχυρές φωτεινές δέσμες (selffocusing). Το φως είναι ένα διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα με ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της έντασης της δέσμης. Για παράδειγμα μια οπτική δέσμη με ένταση  $100\text{MW}/\text{cm}^2$  ισοδυναμεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο με ένταση περίπου  $100\text{kV}/\text{cm}$ . Όταν μια τόσο ισχυρή δέσμη διέρχεται από ένα διαφανές υλικό, διαταράσσει τις θέσεις των ατόμων, αλλάζοντας τον δείκτη διάθλασης κατά  $1/10^6$ . Ως αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής, το υλικό μπορεί να λειτουργήσει ως φακός ή πρίσμα διαθλώντας το φως.

Όμως, ο όρος "φωτοδιαθλαστικό" συνήθως χρησιμοποιείται μόνο σε υλικά που ο δείκτης διάθλασής τους μεταβάλλεται υπό την επίδραση χαμηλών εντάσεων φωτός. Στα φωτοδιαθλαστικά υλικά ασθενείς φωτεινές δέσμες με εντάσεις της τάξης των  $1\text{mW}/\text{cm}^2$ , μεταβάλλουν το δείκτη διάθλασης του υλικού ακόμα και κατά  $1/10^4$ . Επίσης, αντίθετα με τα περισσότερα διαφανή υλικά, η παραπάνω αλλαγή στα φωτοδιαθλαστικά υλικά είναι ημι-μόνιμη. Αν ο κρύσταλλος απομονωθεί από όλες τις πηγές φωτός, η επαγόμενη μεταβολή στον δείκτη διάθλασής του μπορεί να παραμείνει από μερικά msec μέχρι μερικά χρόνια, ανάλογα με το υλικό. Έτσι, μπορεί κανείς να αποθηκεύσει πληροφορίες, με την μορφή εικόνων, στον κρύσταλλο. (Ashltinetal 1966)

## 2.2 Διπλοθλαστικότητα

2

Το απλό γυαλί είναι οπτικά ιστροπικό υλικό, αλλά πολλά σημαντικά κρυσταλλικά οπτικά υλικά, όπως ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ), ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ) και το KDP (δισόξινο φωσφορικό κάλλιο,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) είναι ανιστροπικά υλικά. Η ανιστροπία αυτή οφείλεται στη διάταξη των διαφόρων ατόμων σε διαφορετικές διευθύνσεις μέσα στον κρύσταλλο. Έτσι, για παράδειγμα, η ηλεκτρική πόλωση  $P$  που παράγεται μέσα στον κρύσταλλο από ένα δεδομένο ηλεκτρικό πεδίο  $E$ , δεν είναι ένα απλό πολλαπλάσιο του ηλεκτρικού πεδίου, αλλά μεταβάλλεται κατά τέτοιον τρόπο που εξαρτάται από τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου σε σχέση με το κρυσταλλικό πλέγμα.

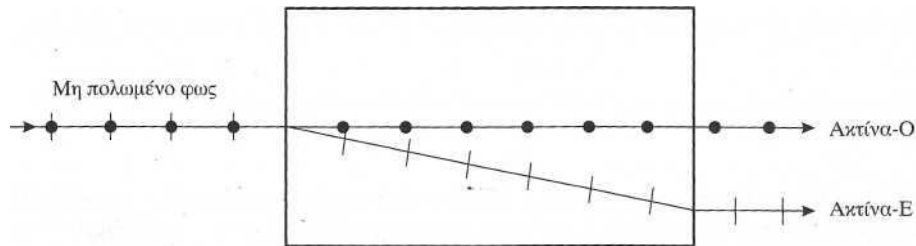
Μια από τις συνέπειες του γεγονότος αυτού είναι ότι ο δείκτης διάθλασης που αντιλαμβάνονται τα ηλεκτρικά πεδία που διαδίδονται μέσα στον κρύσταλλο, δεν εξαρτάται μόνον από τη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων, αλλά και από τη διεύθυνση πόλωσης των κυμάτων. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα φάσης των κυμάτων εξαρτάται επίσης από τις διευθύνσεις αυτές. Τέτοιοι κρύσταλλοι ονομάζονται *διπλοθλαστικοί* ή *διπλά διαθλώντες κρύσταλλοι*. Η ονομασία αυτή προέρχεται από το γεγονός ότι υπάρχουν γενικά δύο διαφορετικές διευθύνσεις διάδοσης μέσα στον κρύσταλλο, που μπορεί να ακολουθήσει μια προσπίπτουσα ακτίνα και που εξαρτώνται από τη διεύθυνση της πόλωσής της. Οι ακτίνες που αντιστοιχούν στις δύο αυτές διευθύνσεις ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες και έχουν διευθύνσεις πόλωσης αμοιβαία κάθετες μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, όταν ένα μη πολωμένο φως, ή φως τυχαίας πόλωσης ως προς τον οπτικό άξονα του κρυστάλλου, προσπίπτει σ' ένα διπλοθλαστικό κρύσταλλο, το φως που προκύπτει

στην έξοδο του κρυστάλλου μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο ανεξάρτητα κύματα που ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες.

Παρόμοια, εάν φως διαδίδεται σε μια δεδομένη διεύθυνση μέσα στον κρύσταλλο, υπάρχουν μόνο δύο δυνατές τιμές της ταχύτητας φάσης, που αντιστοιχούν σε δύο ορθογώνια επίπεδα πόλωσης. Η θεωρία, η οποία δεν είναι πολύ αυταπόδεικτη, δείχνει ότι στους κρυστάλλους υπάρχουν γενικά τρεις διαφορετικοί κύριοι δείκτες διάθλασης και δύο οπτικοί άξονες. Οι οπτικοί άξονες σ' έναν κρύσταλλο είναι *διευθύνσεις κατά μήκος των οποίων οι ταχύτητες δύο, κάθετων μεταξύ τους, επίπεδα πολωμένων κυμάτων είναι ίδιες*. Σε πολλούς σημαντικούς κρυστάλλους, για παράδειγμα στον ασβεστίτη, δύο από τους κύριους δείκτες διάθλασης είναι ίδιοι και υπάρχει μόνον ένας οπτικός άξονας. Οι κρύσταλλοι αυτοί ονομάζονται *μονοαξονικοί*, ενώ άλλοι διπλοθλαστικοί κρύσταλλοι ή αλλιώς *διαξονικοί* έχουν δύο οπτικούς άξονες. Σε κρυστάλλους κυβικής συμμετρίας που είναι ιστροπικοί, οι κύριοι δείκτες διάθλασης είναι όλοι όμοιοι.

Ένας απλός τρόπος να παρατηρήσει κανείς τη διπλοθλαστικότητα είναι να αφήσει μια λεπτή, μη πολωμένη, δέσμη φωτός να προσπέσει κάθετα σ' ένα πλακίδιο ασβεστίτη οι έδρες του οποίου είναι παράλληλες, όπως παριστάνεται στην Εικ. 1. Στην περίπτωση αυτή η δέσμη διαχωρίζεται σε δύο τμήματα: το πρώτο τμήμα είναι η *τακτική* ή O-ακτίνα (αναπαριστάνεται στα διαγράμματα με  $\rightarrow\rightarrow\rightarrow$ ) η οποία διαπερνά ευθύγραμμο τον κρύσταλλο, όπως αναμένεται, ενώ το άλλο τμήμα η ονομαζόμενη *έκτακτη* ή E-ακτίνα (αναπαριστάνεται στα διαγράμματα με  $\rightarrow\rightarrow\rightarrow$ ), αποκλίνει από την O-ακτίνα καθώς διέρχεται από τον κρύσταλλο και ακολούθως εξέρχεται παράλληλα με αυτήν. Αυτή είναι η συνηθέστερη περίπτωση, εκτός εάν η διεύθυνση πρόσπτωσης της αρχικής δέσμης είναι παράλληλη ή κάθετη στον οπτικό άξονα του κρυστάλλου.

Οι τακτικές και οι έκτακτες ακτίνες έχουν κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις πόλωσης, που είναι κάθετες και παράλληλες στο κύριο επίπεδο του κρυστάλλου (όπως παριστάνεται στην Εικ. 1).

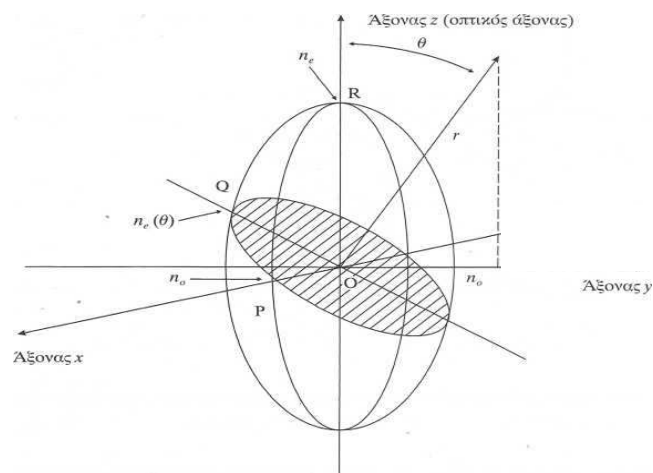


**Εικόνα 1:** Διαθλαστικότητα

Το κύριο επίπεδο περιέχει τον οπτικό άξονα και είναι κάθετο σ' ένα ζεύγος παράλληλων και αντικριστών επιφανειών του κρυστάλλου. Η σχέση μεταξύ των διαφόρων τιμών του δείκτη διάθλασης και της δομής του κρυστάλλου μπορεί να παρουσιασθεί στο *ελλειψοειδές του δείκτη διάθλασης*, που παριστάνεται στην Εικ. 2 για μονοαξονικούς κρυστάλλους και το οποίο παρουσιάζει δύο δείκτες διάθλασης. Όπως προαναφέρθηκε, αυτοί είναι ο τακτικός δείκτης διάθλασης  $n_o$ , ο οποίος δεν μεταβάλλεται με τη διεύθυνση διάδοσης, και ο έκτακτος δείκτης διάθλασης  $n_e$  [ή ακριβέστερα  $n_e(\theta)$ ], η τιμή του οποίου εξαρτάται από τη διεύθυνση διάδοσης  $\theta$  αναφορικά με τον οπτικό άξονα. (Chen 1966)

Ας θεωρήσουμε τη διάδοση μιας φωτεινής δέσμης κατά μήκος της διεύθυνσης  $r$  που παριστάνεται στην Εικ. 3, όπου για ευκολία (αλλά χωρίς να χαθεί η γενικότητα), η προβολή του  $r$  στο επίπεδο  $xy$  είναι κατά μήκος του άξονα. Το επίπεδο που είναι κάθετο στο  $r$  και που περνά από την αρχή των αξόνων τέμνει το ελλειψοειδές του δείκτη διάθλασης κατά μήκος της περιμέτρου της σκιασμένης

έλλειψης. Οι δύο διευθύνσεις πόλωσης, που αναφέρθηκαν παραπάνω, βρίσκονται κατά μήκος των κύριων αξόνων (OP και OQ) της έλλειψης αυτής. (Chen 1966)



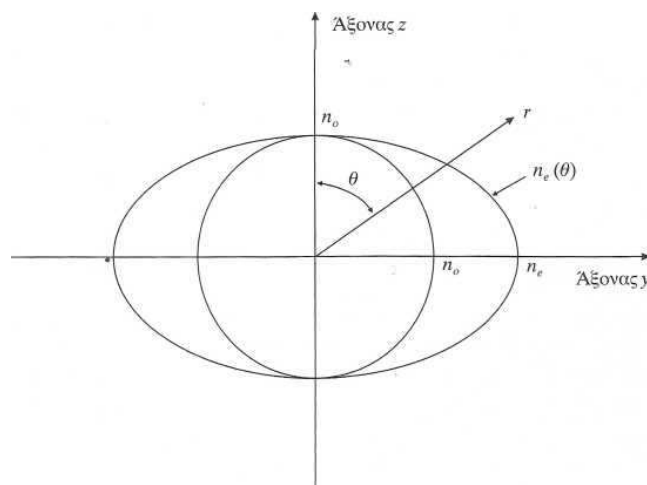
**Εικόνα 2:** Το ελλειψοειδές του δείκτη διάθλασης για ένα μονοαξονικό κρύσταλλο.

Τα κύματα που είναι γραμμικά πολωμένα παράλληλα στους άξονες  $x$  και  $y$  αντιλαμβάνονται ένα δείκτη διάθλασης  $n_o$ , ενώ εκείνα που είναι γραμμικά πολωμένα παράλληλα στον άξονα  $z$  αντιλαμβάνονται ένα δείκτη διάθλασης  $n_e$ . Για μια διάδοση κύματος σε μια γενική διεύθυνση  $r$  υπάρχουν δύο επιτρεπτές διευθύνσεις πόλωσης, π.χ. παράλληλα στον άξονα OP με δείκτη διάθλασης και παράλληλα στον άξονα OQ με δείκτη διάθλασης  $n_e(\theta)n_o$

Επιπλέον, οι αντίστοιχοι δείκτες διάθλασης δίνονται από το μήκος των αξόνων OP και OQ. Ένας από αυτούς, ο OP, είναι ανεξάρτητος της γωνίας  $\theta$  και αναπαριστά τον τακτικό δείκτη διάθλασης  $n_o$  που αντιστοιχεί στην τακτική ακτίνα, ενώ ο άλλος άξονας OQ που εξαρτάται από τη γωνία  $\theta$  αναπαριστά το δείκτη διάθλασης  $n_e(\theta)$  που αντιστοιχεί στην έκτακτη ακτίνα. Ίσως είναι βοηθητικό να φαντασθούμε τη συμπεριφορά των διπλοθλαστικών υλικών εάν σχεδιάσουμε

επιφάνειες στις οποίες η απόσταση κάθε σημείου από την αρχή των αξόνων αντιστοιχεί στις τιμές του  $n_e(\theta)$  και του  $n_o$  για διάδοση κύματος κατά μήκος της διεύθυνσης  $\theta$ . (Pauliat 1989)

Οι προκύπτουσες επιφάνειες θα ήταν μια σφαίρα, για τις τακτικές ακτίνες και ένα ελλειψοειδές για τις έκτακτες ακτίνες. Τέτοιες τομές επιφανειών (δείκτη διάθλασης) για ένα θετικό κρύσταλλο παρουσιάζονται στην Εικ. 3.



**Εικόνα 3:** Τομές επιφανειών (δείκτη διάθλασης) για ένα θετικό μονοαξονικό κρύσταλλο που έχει προβληθεί στο επίπεδο  $yz$ .

Μπορούμε τώρα να θεωρήσουμε τις φωτεινές ακτίνες που ξεκινούν από μια σημειακή πηγή που βρίσκεται στην αρχή των αξόνων, χρησιμοποιώντας την κατασκευή του Huygens. Οι τακτικές ακτίνες θα σχηματίσουν μια σφαιρική επιφάνεια, ενώ οι έκτακτες ακτίνες θα σχηματίσουν ένα ελλειψοειδές, το οποίο στην περίπτωση θετικών μονοαξονικών κρυστάλλων θα βρίσκεται μέσα στην σφαίρα, καθόσον η ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του δείκτη διάθλασης. Η σφαιρική και η ελλειπτική επιφάνεια βέβαια θα συμπίπτουν όταν διασταυρώνονται με τον οπτικό άξονα και θα απέχουν τη μεγαλύτερη απόσταση (και αντίστοιχα τη μεγαλύτερη διαφορά φάσης) στη διεύθυνση κάθετα στον οπτικό άξονα. (Chen 1966)

Η ανισοτροπία στους κρυστάλλους προκαλείται από τη διεύθυνση των ατόμων που είναι διαφορετικά, σε διαφορετικές διευθύνσεις μέσα στον κρύσταλλο. Κατά συνέπεια, η ηλεκτρική πόλωση (ή διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου)  $P$  που παράγεται μέσα σ' έναν κρύσταλλο από ένα δεδομένο ηλεκτρικό πεδίο  $E$  εξαρτάται από τη διεύθυνση του πεδίου. Επομένως, η σχετική ηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon_r$  και ο δείκτης διάθλασης, που δίνεται από τη σχέση  $n=(\epsilon_r)^{1/2}$  εξαρτώνται επίσης από τη διεύθυνση του πεδίου. Επειδή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια, ο δείκτης διάθλασης για μια δεδομένη διεύθυνση διάδοσης του φωτός μέσα στον κρύσταλλο εξαρτάται από την τιμή του ηλεκτρικού διανύσματος  $E$ , το οποίο είναι βέβαια κάθετο στη διεύθυνση αυτή. Στην πραγματικότητα, το ηλεκτρικό διάνυσμα ταλαντώνεται σ' ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση της ταχύτητας του κύματος και έτσι, η ταχύτητα των κυμάτων μέσα στον κρύσταλλο θα εξαρτάται από το επίπεδο πόλωσης του φωτός. Το φαινόμενο αυτό, αποκαλούμενο *διπλοθλαστικότητα*, συμβαίνει στη φύση σε μερικά υλικά και μπορεί να επαυξηθεί με την εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων, όπως αυτές που οφείλονται στην εφαρμογή των ηλεκτρικών πεδίων. Μπορεί επίσης να επαχθεί σε ισοτροπικά υλικά με τον ίδιο τρόπο. (Ganetal 1998)

### **2.3. Φυσική Διπλοθλαστικότητα**

Μπορούμε να εκτιμήσουμε τον τρόπο με τον οποίο προκαλείται η διπλοθλαστικότητα ως ακολούθως. Ας θεωρήσουμε ότι τοποθετούμε ένα διηλεκτρικό μέσο σ' έναν πυκνωτή με παράλληλους οπλισμούς στον οποίο εφαρμόζεται μια σταθερή τάση. Το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του υλικού το πολώνει και εμφανίζονται δίπολα σε όλο το υλικό, ευθυγραμμισμένα κατά τη



διεύθυνση του πεδίου. Η προκύπτουσα πόλωση μπορεί να δειχθεί ότι σχετίζεται με το ηλεκτρικό πεδίο και την ηλεκτρική μετατόπιση,  $D$ , μέσω των εξισώσεων (Ganetal 1998) :

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.1\alpha)$$

και

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E = \epsilon E \quad (2.1\beta)$$

Σε ιστροπικά υλικά (και κυβικούς κρυστάλλους) η διεύθυνση του υλικού δεν είναι σημαντική, τα διανύσματα  $E$ ,  $D$  και  $P$  είναι όλα παράλληλα και τα  $\epsilon_r$ ,  $n$  και  $\chi$  είναι όλα βαθμωτά μεγέθη. Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε τέτοια υλικά είναι σταθερή, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση διάδοσης. Αυτό δεν ισχύει στα διπλοθλαστικά υλικά. Γενικά, στα υλικά αυτά η πόλωση που προκύπτει σε απόκριση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται και από το πλάτος και από τη διεύθυνση του πεδίου και, επιπλέον, η επαγόμενη πόλωση μπορεί να είναι σε μια διαφορετική διεύθυνση από αυτήν του πεδίου. Έτσι, για παράδειγμα, ένα πεδίο που είναι εφαρμοσμένο στην κατεύθυνση  $x$ , θα επάγει όχι μόνον μια πόλωση  $P_x$  παράλληλη στον εαυτό της, αλλά πιθανόν και πολώσεις  $P_y$  και  $P_z$  στις διευθύνσεις  $y$  και  $z$ , αντίστοιχα. Έτσι, από την εξ. (2.1.a) μπορούμε να γράψουμε (Ashlittin 1966):

$$P_x = \epsilon_0 (\chi_{11} E_x + \chi_{12} E_y + \chi_{13} E_z) \quad (2.1.\gamma)$$

$$P_y = \epsilon_0 (\chi_{21} E_x + \chi_{22} E_y + \chi_{23} E_z)$$

$$P_z = \epsilon_0 (\chi_{31} E_x + \chi_{32} E_y + \chi_{33} E_z)$$

όπου τα κεφαλαία γράμματα αντιπροσωπεύουν τα μιγαδικά πλάτη των αντίστοιχων χρονικά μεταβαλλόμενων ποσοτήτων. Ο πίνακας  $\chi_{ij}$  διαστάσεων  $3 \times 3$ , ονομάζεται τανυστής ηλεκτρικής επιδεκτικότητας. Εναλλακτικά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον τανυστή ηλεκτρικής επιτρεπτότητας  $\epsilon_{ij}$  όπου  $D_i = \epsilon_{ij} E_j$ , για να περιγράψουμε τη διηλεκτρική απόκριση του κρυστάλλου στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Αυτοί οι τανυστές είναι επίσης πίνακες διαστάσεων  $3 \times 3$ . Το μέτρο των συντελεστών  $\chi_{ij}$  (και  $\epsilon_{ij}$ ) εξαρτάται από την επιλογή των αξόνων  $x$ ,  $y$  και  $z$  σε σχέση με τη δομή του κρυστάλλου. Είναι δυνατόν να επιλέξουμε τα  $x, y$  και  $z$  έτσι ώστε τα μη διαγώνια στοιχεία να εξαφανίζονται, δίνοντας έτσι:

$$P_x = \epsilon_0 \chi_{11} E_x, \quad P_y = \epsilon_0 \chi_{22} E_y, \quad P_z = \epsilon_0 \chi_{33} E_z \quad (2.1.δ)$$

και παρόμοια:

$$D_x = \epsilon_{11} E_x, \quad D_y = \epsilon_{22} E_y, \quad D_z = \epsilon_{33} E_z \quad (2.1.ε)$$

όπου από τις εξ. (2.1.α) και (2.1.δ) βλέπουμε ότι  $\epsilon_{11} = \epsilon_0(1 + \chi_{11})$  κ.λπ. Αυτές οι διευθύνσεις ονομάζονται *κύριοι άξονες* του κρυστάλλου και οι αντίστοιχοι διαγώνιοι συντελεστές  $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}$  και  $\epsilon_{33}$  *κύριες ηλεκτρικές επιτρεπτότητες*.

Ένα ηλεκτρικό πεδίο παράλληλο σ' έναν κύριο άξονα θα παράγει μόνον μια παράλληλη ηλεκτρική πόλωση, αλλά, γενικότερα, οι τρεις ηλεκτρικές επιδεκτικότητες είναι διαφορετικές. Αυτή η μεταβολή στην ηλεκτρική επιδεκτικότητα και η αντίστοιχη μεταβολή στο δείκτη διάθλασης και επομένως και στην ταχύτητα του κύματος είναι η προέλευση της διπλοθλαστικότητας. Γενικά, οι ανισοτροπικοί κρύσταλλοι χαρακτηρίζονται έτσι από τρεις *κύριους δείκτες διάθλασης*  $n_x, n_y$  και  $n_z$ , όπου οι δείκτες σχετίζονται με τη διεύθυνση-πόλωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και όχι με τη διεύθυνση διάδοσης και όπου  $n_x = (\epsilon_{11} / \epsilon_0)^{1/2} = (1 + \chi_{11})^{1/2}$  κ.λπ.

Έτσι, ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ένα κύμα που διαδίδεται κατά τη

διεύθυνση  $z$ . Εάν το ηλεκτρικό του πεδίο, που είναι το επίπεδο πόλωσής του, είναι παράλληλο στη διεύθυνση  $x$ , θα επάγει μόνο μια πόλωση  $P_x$  σύμφωνα με τις εξ. (2.1.δ) και (2.1.ε) και θα αντληφθεί την ηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon_{11}$ , δηλαδή το δείκτη διάθλασης  $n_x$ . Εάν, από την άλλη πλευρά, το κύμα έχει το επίπεδο πόλωσής του στη διεύθυνση  $y$ , θα αντληφθεί το δείκτη διάθλασης  $n_y$ . Οποιοδήποτε μη πολωμένο κύμα που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση  $z$  μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες με πολώσεις παράλληλες στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Αυτές οι δύο συνιστώσες θα οδεύσουν μέσα στον κρύσταλλο με διαφορετικές ταχύτητες και έτσι, θα βρεθούν προοδευτικά εκτός φάσης, με αποτέλεσμα το προκύπτον κύμα σε κάποιο σημείο  $z$  θα αντιπροσωπεύει, γενικά, ελλειπτικά πολωμένο φως. Η ακριβής φύση του φωτός εξαρτάται από τη διαφορά φάσης και τα σχετικά πλάτη των δύο συνιστωσών. (Kumar 1987)

Οι ανισοτροπικοί κρύσταλλοι χωρίζονται σε δύο τάξεις. Η πρώτη τάξη, που περιλαμβάνει τον ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ), χαρακτηρίζεται από ένα κύριο άξονα (κατά συμφωνία η διεύθυνση  $z$ ) στον οποίο η ηλεκτρική επιτρεπτότητα είναι  $\epsilon_{33}$ , αλλά κάθετα σ' αυτόν η ηλεκτρική επιτρεπτότητα είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση ( $\epsilon_{11} = \epsilon_{22}$ ).

Έτσι, οι κρύσταλλοι αυτοί έχουν μόνο δύο κύριους δείκτες διάθλασης. Η διεύθυνση  $z$  είναι μοναδική κατά το ότι η ταχύτητα διάδοσης είναι ανεξάρτητη από την πόλωση του κύματος. Ορίζεται μάλιστα ως οπτικός άξονας. Τέτοια υλικά ονομάζονται μονοαξονικά.

Η διαφορά μεταξύ  $n_x (= n_y)$  και  $n_z$  είναι ένα μέτρο της διπλοθλαστικότητας και λέγεται ότι είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με το εάν το  $n_z$  είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από το  $n_x$ . Έτσι, ο ασβεστίτης είναι ένας αρνητικός μονοαξονικός κρύσταλλος, ενώ ο χαλαζίας είναι ένας θετικός μονοαξονικός κρύσταλλος.

Κρύσταλλοι χαμηλότερης συμμετρίας έχουν δύο οπτικούς άξονες και

καλούνται *διαξονικοί*. Οι άξονες αυτοί δεν συμπίπτουν με κανέναν άλλο κύριο άξονα και κατά συνέπεια τα  $n_x$ ,  $n_y$  και  $n_z$  είναι όλα διαφορετικά.

Εάν η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell εφαρμοστεί σ' ένα ισοτροπικό υλικό, μπορεί ναδειχθεί ότι φως οποιασδήποτε πόλωσης μπορεί να διαδοθεί σε οποιαδήποτε διεύθυνση. Στην περίπτωση των ανιστροπικών υλικών, όμως, αυτό δεν συμβαίνει και προκύπτει ως αποτέλεσμα της διπλοθλαστικότητας ότι, μόνο δύο καταστάσεις πόλωσης μπορούν να διαδοθούν σε οποιαδήποτε διεύθυνση του κρυστάλλου. Τα επίπεδα των δύο πολώσεων είναι κάθετα μεταξύ τους, οι δύο συνιστώσες αντιλαμβάνονται διαφορετικούς δείκτες διάθλασης και ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες (εκτός εάν η διάδοση είναι παράλληλη στον κύριο οπτικό άξονα οπότε έχουν κοινή ταχύτητα). (Kumar 1987)

Οι τιμές των δεικτών διάθλασης και των καταστάσεων πόλωσης για μια συγκεκριμένη διεύθυνση διάδοσης μπορούν να προσδιοριστούν από μια τρισδιάστατη αναπαράσταση του δείκτη διάθλασης που είναι γνωστή ως το *ελλειψοειδές του δείκτη διάθλασης* (Εικ.2).

Η μορφή αυτού μπορεί να ληφθεί ως ακολούθως.

Η πυκνότητα ενέργειας  $W$  σ' ένα διηλεκτρικό δίνεται από τη σχέση:

$$W = 1/2 \mathbf{D} \cdot \mathbf{E}$$

ή

$$W = \frac{1}{2} \left( \frac{D_x^2}{\epsilon_{11}} + \frac{D_y^2}{\epsilon_{22}} + \frac{D_z^2}{\epsilon_{33}} \right)$$

Έτσι, μια επιφάνεια σταθερής ενέργειας λαμβάνει τη μορφή ενός ελλειψοειδούς σ' έναν τρισδιάστατο χώρο όπου η συντεταγμένη είναι η διηλεκτρική

μετατόπιση.

Διαιρώντας και τα δύο μέλη με το  $W$  και γράφοντας το  $D_x^2/2\epsilon_0 W$

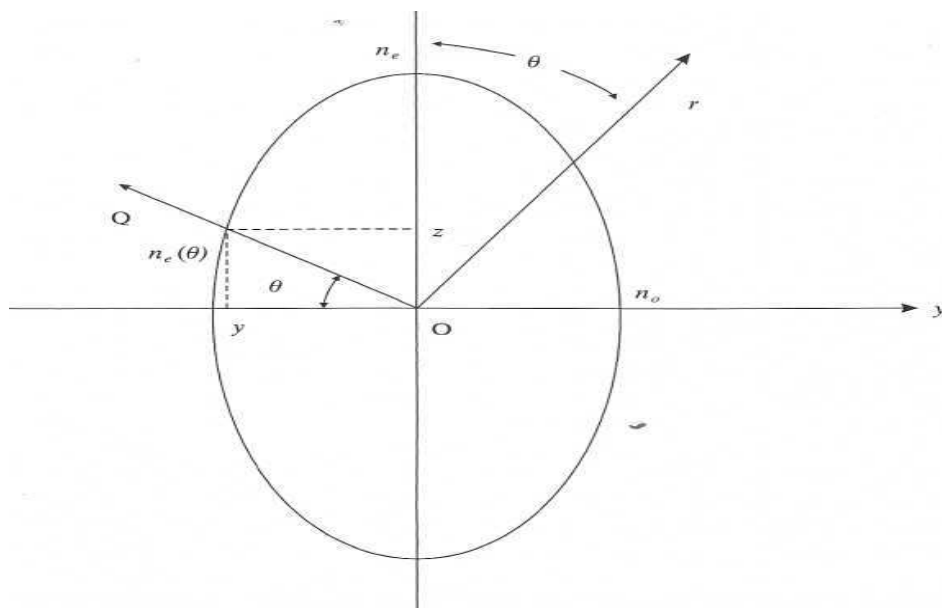
ως  $x^2$  κ.λπ.,

οδηγούμαστε στην έκφραση:

$$(x^2/n_x^2) + (y^2/n_y^2) + (z^2/n_z^2) = 1$$

Όπου  $n_x^2 = \epsilon_{11}/\epsilon_0$  κ.λπ.

Αυτή η εξίσωση παριστάνει ένα ελλειψοειδές με ημιάξονες τα  $n_x, n_y$  και  $n_z$ . Για έναν μονοαξονικό κρύσταλλο  $n_x = n_y \neq n_z$ , και το ελλειψοειδές του δείκτη διάθλασης, που έχει κυκλική συμμετρία γύρω από τον άξονα  $z$ , είναι αυτό που παριστάνεται στην Εικ. 4



**Εικόνα 4:** Τομή του ελλειψοειδούς του δείκτη διάθλασης με το επίπεδο  $yz$ . Το  $OQ = n_e(\theta)$  αντιπροσωπεύει το δείκτη διάθλασης του έκτακτου κύματος που διαδίδεται στη διεύθυνση  $r$ .

Είναι σύνηθες να αναφερόμαστε στο  $n_x (= n_y)$  ως τον τακτικό δείκτη διάθλασης  $n_0$  και στο  $n_z$  ως τον έκτακτο δείκτη διάθλασης  $n_e$ , οπότε στην περίπτωση αυτή μπορούμε να γράψουμε:

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (2.1.ζ)$$

Ας θεωρήσουμε φως που διαδίδεται στη διεύθυνση  $r$ , σε γωνία  $\theta$  ως προς τον οπτικό άξονα  $z$ . Λόγω της κυκλικής συμμετρίας που προαναφέρθηκε, μπορούμε να διαλέξουμε, χωρίς απώλεια της γενικότητας, τον άξονα  $y$  να συμπίπτει με την προβολή του άξονα  $r$  στο επίπεδο  $xy$ . Το επίπεδο κάθετα στο  $r$  τέμνει το ελλειψοειδές στην παριστάμενη σκιασμένη έλλειψη. Οι δύο επιτρεπτές διευθύνσεις πόλωσης είναι παράλληλες στους άξονες της έλλειψης αυτής και έτσι αντιστοιχούν στους  $OP$  και  $OQ$ . Είναι λοιπόν κάθετες στον άξονα  $r$  καθώς και μεταξύ τους. Τα δύο κύματα πολωμένα κατά μήκος αυτών των διευθύνσεων έχουν δείκτες διάθλασης που δίνονται από το  $OP = n_0$  και το  $OQ = n_e(\theta)$  (το έκτακτο κύμα). Στην περίπτωση του έκτακτου κύματος, το επίπεδο πόλωσης μεταβάλλεται με το  $\theta$  όπως και ο δείκτης διάθλασης. Μπορούμε να προσδιορίσουμε τη σχέση μεταξύ του  $n_e(\theta)$  και των  $n_e, n_0$  που παριστάνει την τομή του ελλειψοειδούς του δείκτη διάθλασης με το επίπεδο  $yz$ . Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι (Kumar 1987):

$$n_e^2(\theta) = z^2 + y^2$$

και

$$z = n_e(\theta) \sin \theta$$

Έτσι, αντικαθιστώντας τις εξισώσεις αυτές στην εξίσωση της παριστάμενης έλλειψης, δηλαδή:

$(y^2/n_o^2) + (z^2/n_e^2) = 1$  έχουμε:

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2}$$

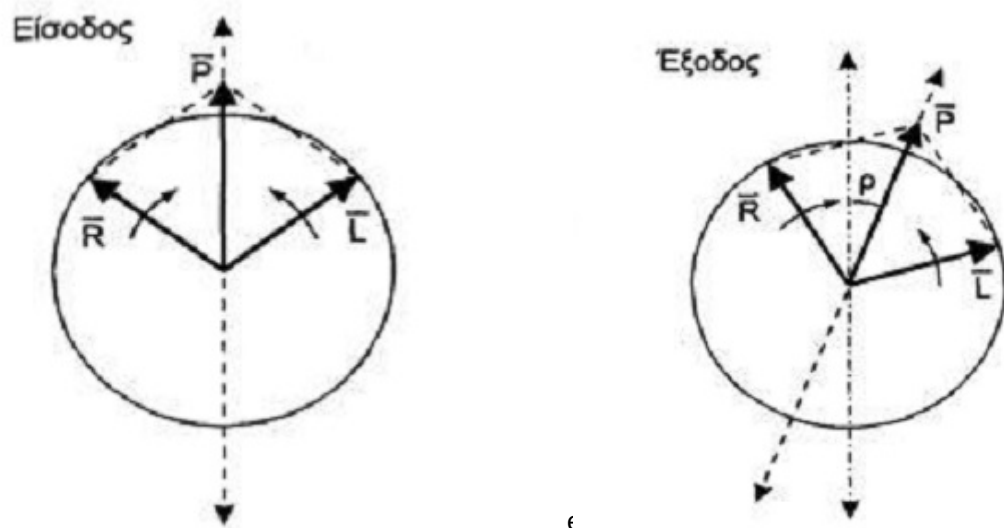
Έτσι, για  $\theta=0^\circ$ , δηλαδή για διάδοση κατά τον οπτικό άξονα,  $n_e(0^\circ)=n_o$ , ενώ για  $\theta=90^\circ$ ,  $n_e(90^\circ)=n_e$ . Οι δυο πολώσεις που μπορούν να διαδοθούν αντιστοιχούν στον ελάχιστο και στο μέγιστο δείκτη διάθλασης που δίνεται από το ελλειψοειδές του δείκτη διάθλασης (στην περίπτωση των θετικών κρυστάλλων  $n_e > n_o$  ενώ στην περίπτωση αρνητικών κρυστάλλων  $n_e < n_o$ ). Για διάδοση παράλληλη με τον οπτικό άξονα (δηλαδή στη διεύθυνση z), δεν υπάρχει διπλοθλαστικότητα καθόσον το τμήμα του ελλειψοειδούς που είναι κάθετο στη διεύθυνση αυτή είναι ένας κύκλος. Για διάδοση κάθετη στον οπτικό άξονα, για παράδειγμα στη διεύθυνση x, η διπλοθλαστικότητα θα παρουσιάζει ένα μέγιστο, οι επιτρεπτές πολώσεις θα είναι παράλληλες στον άξονα x με δείκτη διάθλασης  $n_o$  και παράλληλες στον άξονα z με δείκτη διάθλασης  $n_e$ .

## 2.4.Οπτική ενεργότητα

2

Το φαινόμενο της «οπτικής ενεργότητας» διακρίνεται από την φυσική διπλοθλαστικότητα στο ότι εμφανίζεται και σε ισότροπα υλικά, όπως κρυστάλλους πού ανήκουν στο κυβικό σύστημα. Έτσι όταν μια μονοχρωματική, γραμμικά πολωμένη, παράλληλη δέσμη φωτός διέλθει από ένα ισότροπο, οπτικά ενεργό κρύσταλλο το επίπεδο πόλωσης της στρέφεται κατά γωνία  $\rho$  πού είναι ανάλογη του πάχους του κρυστάλλου. (Sterapon 1985)

Η παρατηρούμενη στροφή του επιπέδου πόλωσης οφείλεται στο ότι, αν και ο κρύσταλλος είναι ισότροπος, στο εσωτερικό του μπορεί να διαδοθεί μόνο μία P δέσμη η οποία αναλύεται σε μια δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένη ιδιοκατάσταση R και σε μια αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένη L ιδιοκατάσταση (εικόνα 5), πού διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες.



**Εικόνα 5** :Διέλευση γραμμικά πολωμένης δέσμης από ισότροπο, οπτικά ενεργό κρύσταλλο



Όταν στην έξοδο του κρυστάλλου οι δύο κυκλικά πολωμένες δέσμες επανασυνδεθούν προκύπτει και πάλι μια γραμμικά πολωμένη δέσμη με επίπεδο πόλωσης στραμμένο κατά γωνία  $\rho$ . Η στροφή κατά  $\rho$  προκύπτει ουσιαστικά από την διαφορά φάσης  $2\rho$  μεταξύ των δύο κυκλικά πολωμένων ιδιοκαταστάσεων R, L στην έξοδο τον κρυστάλλου. Το φαινόμενο της οπτικής ενεργότητας είναι αντιστρεπτό αφού η φορά της στροφής του επιπέδου πόλωσης παραμένει σταθερή ως προς την διεύθυνση διάδοσης. Έτσι, αν μια γραμμικά πολωμένη δέσμη διέλθει από ένα οπτικά ενεργό κρύσταλλο και μετά ανακλαστεί προς τα πίσω για να διέλθει από αυτόν, αντίστροφα, για δεύτερη φορά, η συνολική στροφή του επιπέδου πόλωσης είναι μηδέν. Η οπτική ενεργότητα εμφανίζεται, όμως, και σε ανισότροπους κρυστάλλους που παρουσιάζουν φυσική διπλοθλαστικότητα. Στην γενική περίπτωση, η βασική εξίσωση τον υλικού (3.1) παίρνει την μορφή (Stepanov 1985):

$$\vec{D} = \epsilon_0 [\epsilon] \vec{E} + i \epsilon_0 \vec{G} \times \vec{E}, \quad (3.1)$$

όπου  $[\epsilon]$  ο συμμετρικός, αδιατάρακτος διηλεκτρικός τανυστής,  $i = \sqrt{-1}$  είναι το στροφικό διάνυσμα (gyration vector) που ορίζεται επακριβώς από τον μηχανισμό που παράγει την οπτική ενεργότητα. Το εξωτερικό γινόμενο  $\vec{G} \times \vec{E}$  στην εξίσωση (3.1) μπορεί να γραφεί ως το γινόμενο ενός αντισυμμετρικού τανυστή  $[G]$  με το διάνυσμα του ηλεκτρικού  $\vec{E}$  πεδίου, έτσι η (3.1) γίνεται:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \{ [\epsilon] + i[G] \} \vec{E} = \epsilon_0 [\epsilon'] \vec{E}, \quad (3.2)$$

ενώ ο αντισυμμετρικός τανυστής  $[G]$  περιγράφεται από την σχέση:

$$[\mathbf{G}] = \begin{pmatrix} 0 & -G_3 & G_2 \\ G_3 & 0 & -G_1 \\ -G_2 & G_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3.3)$$

όπου  $G_1, G_2, G_3$ , οι συνιστώσες του στροφικού διανύσματος  $\mathbf{G}$  ως προς τούς κύριους άξονες του διηλεκτρικού τανυστή.

$$(\epsilon'_{ij} = \epsilon''_{ij}).$$

Αντίστοιχα ο νέος τανυστής της αντιδιαπερατότητας περιγράφεται από την σχέση (Maldonado 1989):

$$[\mathbf{B}]' = \{[\mathbf{B}] - i[\mathbf{B}][\mathbf{G}][\mathbf{B}]\}. \quad (3.4)$$

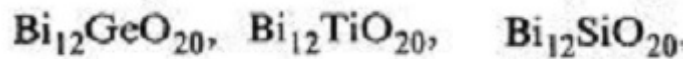
Η οπτική ενεργότητα δεν αλλοιώνει το πραγματικό, συμμετρικό μέρος του τανυστή αλλά εισάγει ένα φανταστικό, αντισυμμετρικό μέρος που δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} \text{Im}([\mathbf{B}]') &= -[\mathbf{B}][\mathbf{G}][\mathbf{B}] = \\ &= \begin{pmatrix} 0 & -B_{11}B_{22}G_3 & B_{11}B_{33}G_2 \\ B_{11}B_{22}G_3 & 0 & -B_{22}B_{33}G_1 \\ -B_{11}B_{33}G_2 & B_{22}B_{33}G_1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Το μέτρο  $|\bar{G}|$  του στροφικού διανύσματος  $\bar{G}$  υπολογίζεται με την βοήθεια τον στροφικού τανυστή  $[g]$  (gyration tensor) (Maldonado 1989):

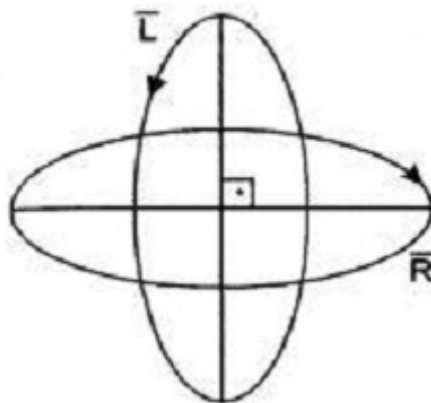
$$|\bar{G}| = g_{ij} l_i l_j, \quad (3.6)$$

όπου  $g_{ij}$  οι συνιστώσες του στροφικού τανυστή και  $l_i$  τα συνημίτονα κατεύθυνσης της κυματοκαθέτου  $F$ . Ο στροφικός τανυστής  $k$  περιγράφει πλήρως το φαινόμενο της φυσικής οπτικής ενεργότητας και για τους κρυστάλλους που ανήκουν στην κρυσταλλική τάξη όπως οι



έχει την μορφή:

$$[g_{ij}] = \begin{pmatrix} g & 0 & 0 \\ 0 & g & 0 \\ 0 & 0 & g \end{pmatrix}. \quad (3.7)$$



**Εικόνα 6:** Ιδιοκαταστάσεις πόλωσης σε διπλοθλαστικό, οπτικά ενεργό κρύσταλλο.

Οι ελλείψεις που περιγράφουν τις ελλειπτικά πολωμένες ιδιοκαταστάσεις έχουν αντίθετες φορές διαγραφής (αριστερόστροφα-δεξιόστροφα πολωμένη), ίδια ελλειπτικότητα  $K$  και οι κύριοι άξονες τους είναι κάθετοι μεταξύ τους (εικόνα 6).

Το ελλειψοειδές των δεικτών διάθλασης δεν αλλοιώνεται από την παρουσία της οπτικής ενεργότητας αφού καθορίζεται μόνο από το πραγματικό μέρος του τανυστή της αντιδιαπερατότητας. Όμως, οι δείκτες διάθλασης των δύο ελλειπτικά πολωμένων ιδιοκαταστάσεων δεν δίνονται πια από τα μήκη των ημιαξόνων της, κάθετης στην κυματοκάθετο  $k$ , ελλειπτικής κύριας τομής του ελλειψοειδούς των δεικτών διάθλασης. Αντίθετα, οι διευθύνσεις των μεγάλων αξόνων των ελλείψεων (αζιμούθια), που περιγράφουν τις ελλειπτικά πολωμένες ιδιοκαταστάσεις, ταυτίζονται με τις διευθύνσεις των κυρίων αξόνων της ελλειπτικής κύριας τομής του ελλειψοειδούς των δεικτών διάθλασης (Maldonado 1989).

Όταν ένα επίπεδο μέτωπο κύματος προσπέσει κάθετα στην επιφάνεια ενός οπτικά ενεργού διπλοθλαστικού κρυστάλλου, αναλύεται στο εσωτερικό του σε δύο αντίστοιχες ελλειπτικά πολωμένες ιδιοκαταστάσεις. Αν  $n_1$  και  $n_2$  είναι αντίστοιχα οι δείκτες διάθλασης των ιδιοκαταστάσεων, τότε αφού διασχίσουν μοναδιαίο πάχος του κρυστάλλου η διαφορά φάσης τους  $\phi$  δίνεται από την σχέση :

$$\phi \equiv \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_1 - n_2) d, \quad (3.8.)$$

όπου  $\lambda_0$  το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο κενό. Όπως αποδεικνύεται η διαφορά φάσης μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (Nye 1957):

$$\phi^2 = \delta^2 + (2\rho_0)^2, \quad (3.9.)$$

όπου  $2\rho_0$  η αντίστοιχη διαφορά φάσης μεταξύ των κυκλικά πολωμένων ιδιοκαταστάσεων αν ο κρύσταλλος ήταν μόνο οπτικά ενεργός ( $\rho_0$  είναι η στροφική ικανότητα του κρυστάλλου, δηλαδή η στροφή που προκαλείται στο επίπεδο πόλωσης γραμμικά πολωμένης δέσμης ανά μονάδα πάχους) και  $\delta$  η διαφορά φάσης μεταξύ των αντίστοιχων γραμμικά πολωμένων ιδιοκαταστάσεων αν ο κρύσταλλος ήταν μόνο διπλοθλαστικός. Η διαφορά φάσης  $\delta$  μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\delta = \frac{2\pi(n'_1 - n'_2)}{\lambda_0}, \quad (3.10)$$

όπου  $n_1, n_2$  είναι οι δείκτες διάθλασης των αντίστοιχων γραμμικά πολωμένων ιδιοκαταστάσεων αν ο κρύσταλλος ήταν μόνο διπλοθλαστικός (Nye 1957).

Οι δείκτες διάθλασης  $n_1, n_2$  μπορούν να υπολογιστούν με την βοήθεια του ελλειψοειδούς των δεικτών διάθλασης, από τα μήκη των ημιαξόνων της (κάθετης στην κυματοκάθετο  $k$ ) ελλειπτικής κύριας τομής του ελλειψοειδούς των δεικτών διάθλασης. (Maldonaldo 1989)

Η στροφική ικανότητα  $\rho_0$  μπορεί να υπολογιστεί από το μέτρο του στροφικού διανύσματος  $G$  από την σχέση:

$$\rho_0 = \frac{\pi|G|}{n_0\lambda_0}, \quad (3.11)$$

όπου  $\lambda_0$  μήκος κύματος στο κενό και  $n_0$  μία μέση τιμή δείκτη διάθλασης ( $n_0 = \sqrt{n'_1 n'_2}$ )

Επίσης, η ελλειπτικότητα  $K$  των δυο ελλειπτικά πολωμένων ιδιοκαταστάσεων δίνεται από την σχέση:

$$K = \tan \left[ \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\rho_0}{\delta} \right) \right]. \quad (3.12)$$

## 2.5. Οπτικές ιδιότητες παρουσία εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου

Οι οπτικές ιδιότητες ενός διαφανούς κρυστάλλου επηρεάζονται γενικά από την παρουσία εξωτερικού στατικού ηλεκτρικού πεδίου. Η μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων εκφράζεται ως διαταραχή στις επιμέρους συνιστώσες του τανυστή της αντιδιαπερατότητας. Έτσι, αν ο τανυστής της αντιδιαπερατότητας είχε πριν την εφαρμογή τον εξωτερικού πεδίου (εκφρασμένος ως προς τους κύριους άξονες του) την μορφή (Maldonaldo 1989):

$$[\mathbf{B}] = \begin{pmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} \end{pmatrix},$$

τότε μετά την εφαρμογή του εξωτερικού πεδίου παίρνει γενικά την μορφή:

$$[\mathbf{B}] = \begin{pmatrix} B_{11} + \Delta B_{11} & \Delta B_{12} & \Delta B_{13} \\ \Delta B_{12}^* & B_{22} + \Delta B_{22} & \Delta B_{23} \\ \Delta B_{13}^* & \Delta B_{23}^* & B_{33} + \Delta B_{33} \end{pmatrix}, \quad (3.13)$$

όπου  $\Delta B_{ij}$  οι αντίστοιχες διαταραχές των στοιχείων του ταυστή και  $\Delta B_{ij}^*$  οι συζυγείς- τους

Οι τιμές των διαταραχών  $\Delta B_{ij}$  καθορίζονται από την γεωμετρία του προβλήματος (διεύθυνση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, προσανατολισμός των εδρών του κρυστάλλου) και από τον συνδυασμό φαινομένων όπως το πρωτεύον και το δευτερεύον ηλεκτροοπτικό φαινόμενο καθώς και το ηλεκτροστροφικό φαινόμενο.

## **2.6. Γραμμικό ηλεκτροοπτικό φαινόμενο (πρωτεύον ηλεκτροοπτικό)**

Σε ένα κρύσταλλο που δεν διαθέτει κέντρο συμμετρίας, η εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου οδηγεί γενικά σε διαταραχές  $\Delta B_{ij}^{eo}$  των στοιχείων του ταυστή της αντιδιαπερατότητας που οφείλονται στο γραμμικό ή πρωτεύον ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο (Pockelseffects) και δίνονται από την σχέση (Nye 1957):

$$\Delta B_{ij}^{eo} = r_{ijk} E_k \quad (3.14)$$

όπου  $r_{ijk}$  είναι τα στοιχεία του γραμμικού ηλεκτροοπτικού ταυστή και  $E_k$  οι συνιστώσες του εξωτερικού πεδίου. Εξαιτίας της συμμετρίας του ταυστή της αντιδιαπερατότητας οι δείκτες  $i, j$  στην εξίσωση (3.14) μπορούν να συμπτυχθούν σε έναν δείκτη σύμφωνα με τον κανόνα (Maldonaldo 1989):

$$\begin{pmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 21 & 22 & 23 \\ 31 & 32 & 33 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 6 & 5 \\ 6 & 2 & 4 \\ 5 & 4 & 3 \end{pmatrix}.$$

Έτσι, η εξίσωση (3.14) μπορεί να γραφτεί σε μορφή πίνακα ως εξής:

$$\begin{pmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} \\ \Gamma_{41} & \Gamma_{42} & \Gamma_{43} \\ \Gamma_{51} & \Gamma_{52} & \Gamma_{53} \\ \Gamma_{61} & \Gamma_{62} & \Gamma_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}.$$

Από την παραπάνω εξίσωση είναι φανερό ότι στην γενική περίπτωση ο γραμμικός ηλεκτροοπτικός τανυστής έχει 18 ανεξάρτητα στοιχεία. Οι διαταραχές που εμφανίζονται στα στοιχεία του τανυστή της αντιδιαπερατότητας εξαιτίας του γραμμικού ηλεκτροοπτικού φαινομένου είναι πραγματικές και συμμετρικές επομένως δεν αλλοιώνουν την συμμετρία του τανυστή. Αλλάζουν όμως το σχήμα και τον προσανατολισμό του ελλειψοειδούς των δεικτών διάθλασης. Επίσης, όλοι οι οπτικά ενεργοί κρύσταλλοι παρουσιάζουν γραμμικό ηλεκτροοπτικό φαινόμενο, ενώ το αντίστροφο δεν ισχύει πάντα. (Maldonaldo 1989).



## **2.7. Ακουστοοπτικό Φαινόμενο**

2

Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου αλλάζει με την παρουσία του ήχου. Ο ήχος συνεπώς τροποποιεί την επίδραση που έχει το μέσο πάνω στο φως όταν αυτό προσπέσει πάνω του. Άρα, συμπεραίνουμε ότι ο ήχος μπορεί να ρυθμίσει το φως . Ο ήχος υπό την μορφή κύματος έχει μια χαρακτηριστική ταχύτητα που διαδίδεται στο μέσο. Ένα επίπεδο ηχητικό κύμα περιλαμβάνει διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα στο μέσο στο οποίο διαδίδεται. Στις περιοχές που το μέσο συμπιέζεται, η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη και ο δείκτης διάθλασης υψηλότερος. Στα στερεά, ο ήχος περιλαμβάνει ταλαντώσεις των μορίων γύρω από την θέση ισορροπίας, γεγονός που μεταβάλλει την οπτική πολωσιμότητα άρα και τον δείκτη διάθλασης.

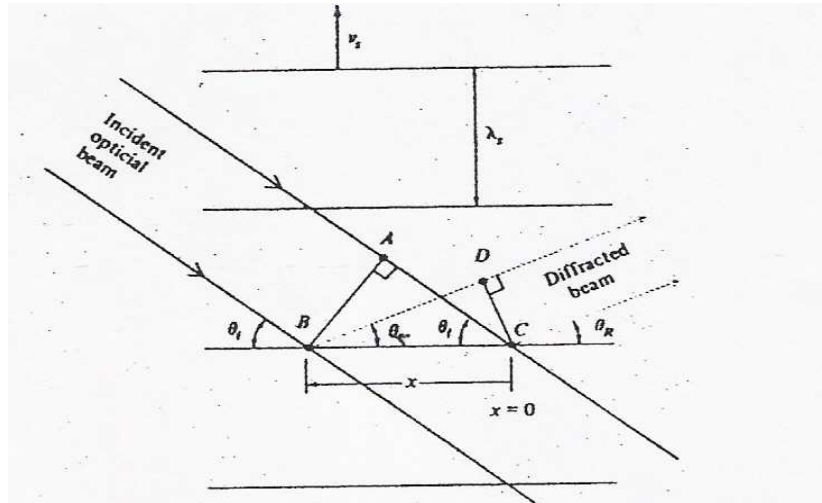
Η θεωρία του ακουστοοπτικού φαινομένου ασχολείται με την διαταραχή του δείκτη διάθλασης που προκαλείτε από τον ήχο και με την διέλευση του φωτός μέσα από αυτό το διαταραγμένο χρονομεταβαλλόμενο μέσο που έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος του φωτός να περιθλάται σε μια νέα διεύθυνση με ταυτόχρονη αλλαγή της συχνότητας κατά ποσό ίσο με την συχνότητα του ακουστικού κύματος. Λόγω του ότι οι οπτικές συχνότητες είναι κατά πολύ μεγαλύτερες των ακουστικών, οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης του μέσου που διαταράσσεται από τον ήχο, είναι συνήθως πολύ αργές σε σύγκριση με την οπτική περίοδο.

Είναι φανερό ότι μετά τη δημιουργία της δέσμης laser, πρέπει αυτή να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να μεταφέρει τις χρωματικές πληροφορίες του φωτογραφικού αρχείου. Εδώ βρίσκει εφαρμογή το οπτικοακουστικό φαινόμενο. Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου αλλάζει με την παρουσία του ήχου. Ο ήχος δηλαδή τροποποιεί την επίδραση που έχει το μέσο πάνω στο φως όταν αυτό

προσπέσει πάνω του. Από τα παραπάνω συμπεραίνονται ότι ο ήχος μπορεί να ρυθμίσει το φως. Ο ήχος υπό την μορφή κύματος έχει μία χαρακτηριστική ταχύτητα που διαδίδεται στο μέσο.

Ένα ηχητικό κύμα περιλαμβάνει διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα στο μέσο στο οποίο διαδίδεται. Στις περιοχές που το μέσο συμπιέζεται, η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη και ο δείκτης διάθλασης υψηλότερος. Στα στερεά ο ήχος περιλαμβάνει ταλαντώσεις των μορίων γύρω από τη θέση ισορροπίας γεγονός που μεταβάλλει την οπτική πολωσιμότητα άρα και τον δείκτη διάθλασης. Η θεωρία του οπτικοακουστικού φαινομένου ασχολείται με την διαταραχή του δείκτη διάθλασης που προκαλείται από τον ήχο με τη διέγερση του φωτός μέσα από αυτό το διαταραγμένο χρονομεταβαλλόμενο μέσο που έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος του φωτός να περιθλάται σε μια νέα διεύθυνση με ταυτόχρονη αλλαγή της συχνότητας κατά ποσό ίσο με την συχνότητα του ακουστικού κύματος.

Λόγω του ότι οι οπτικές συχνότητες είναι κατά πολύ μεγαλύτερες των ακουστικών, οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης του μέσου που διαταράσσεται από τον ήχο είναι συνήθως πολύ αργές σε σύγκριση με την οπτική περίοδο. Η έκφραση της αλληλεπίδρασης του φωτός με τον ήχο είναι γνωστή ως Bragg-diffraction ή σκέδαση Bragg. Οι διατάξεις που βασίζονται στην σκέδαση Bragg καλούνται Bragg Cell. Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές του παραπάνω φαινομένου είναι η εκτροπή των οπτικών δεσμών η οποία μπορεί να επιτευχθεί αλλάζοντας τη συχνότητα του ήχου ενώ βρισκόμαστε κοντά στην συνθήκη Bragg. Έστω μια οπτική δέσμη που προσπίπτει σε ένα ηχητικό κύμα υπό γωνία  $\theta$  όπως φαίνεται στο σχήμα 7.



Εικόνα 7- Περίθλαση μιας προσπίπτουσας δέσμης από διάταξη ανακλαστών

Θεωρούμε το ηχητικό κύμα ως μια αλληλουχία από μερικώς ανακλαστικά κάτοπτρα που απέχουν μεταξύ τους ίση με το μήκος κύματος του ήχου  $\lambda_s$  και κινούνται με ταχύτητα  $u_s$ . Αγνοώντας προσωρινά την κίνηση αυτής μελετήσουμε το φαινόμενο της περίθλασης που συμβαίνει υπό γωνία  $\theta_r$ . Με βάση την συνθήκη της περίθλασης, σύμφωνα με την οποία σε κάθε διεύθυνση η φάση πρέπει να είναι σύμφωνη για τα ανακλώμενα οπτικά κύματα, αν υπολογίσουμε τη διαφορά οπτικού δρόμου της δέσμης (AC-BD) από τα σημεία B,C αυτή είναι πολλαπλάσια του οπτικού μήκους κύματος  $\lambda/n$  δηλαδή

$$x(\cos \theta_i - \cos \theta_r) = m\lambda/n$$

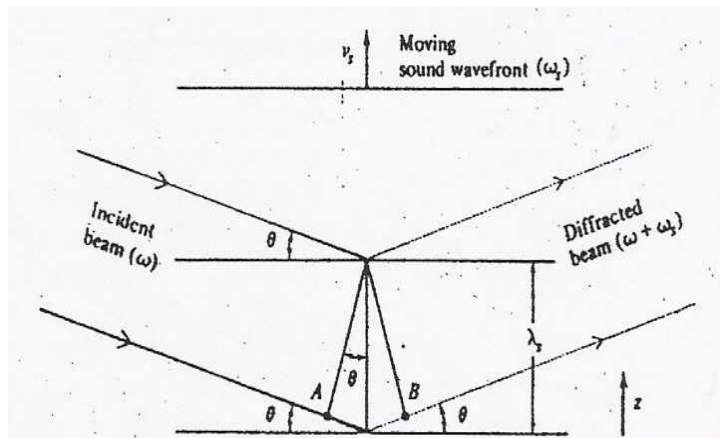
όπου το  $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Η μόνη περίπτωση για να ισχύει η παραπάνω σχέση σε όλα τα σημεία  $x$  κατά μήκος του κατόπτρου είναι για  $m=0$ , οπότε έχουμε  $\theta_i = \theta_r = \theta$

Επίσης, η διαφορά οπτικού δρόμου ( $AO+OB$ ) ενός οπτικού συστήματος που προέρχεται από την ανάκλαση σε δύο διαδοχικά ισοδύναμα ηχητικά κύματα που χωρίζονται από απόσταση  $\lambda_s$  πρέπει να ισούται με το μήκος του οπτικού κύματος. Έτσι με βάση το σχήμα 2 έχουμε ότι

$$2\lambda_s = \sin \theta = \lambda/n$$

Η έκφραση της αλληλεπίδρασης του φωτός με τον ήχο είναι γνωστή ως **Braggdiffraction** ή σκέδαση Bragg. Οι διατάξεις που βασίζονται στη σκέδαση Bragg καλούνται **Braggcell**.



**Εικόνα 8:** Οι ανακλάσεις από δύο ισοδύναμα επίπεδα στην ηχητική δέσμη (δηλαδή επίπεδα που απέχουν απόσταση ίση με  $\lambda_s$ ) που βρίσκονται σε συμφωνία φάσης στη διεύθυνση  $\theta$ , εάν η διαφορά οπτικού δρόμου  $OA+OB$  είναι ίση με ένα οπτικό μήκος κύματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

2

### ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ-ΕΙΔΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ

#### **3.1 Ο Ασβεστίτης ή Καλσίτης**

Ορισμένα κρυσταλλικά υλικά, όπως είναι ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ) ή ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ), με κατάλληλα διαμορφωμένες εξωτερικές επιφάνειες εμφανίζουν το φαινόμενο της διπλοθλαστικότητας, κατά το οποίο ακτίνα που πέφτει σε μία εξωτερική επιφάνεια τους εισέρχεται στον κρύσταλλο διαχωρισμένη σε δύο ακτίνες κάθετα πολωμένες μεταξύ τους. Από αυτές η μία ακολουθεί τον νόμο της διαθλάσεως (τακτική ακτίνα) σε αντίθεση με την άλλη (έκτακτη ακτίνα). Για μία διεύθυνση, τον οπτικό άξονα τακτική και έκτακτη ακτίνα συμπίπτουν (έχουν την ίδια ταχύτητα διάδοσης μέσα στο διπλοθλαστικό υλικό).



**Εικόνα 9:** Ασβεστίτης

Ο ασβεστίτης ανευρίσκεται παγκοσμίως και αποτελεί το βασικό συστατικό των ασβεστόλιθων, των μαρμάρων καθώς και των σταλακτιτών/σταλαγματιών των σπηλαίων. Λόγω των ποικίλων τρόπων σχηματισμού του - είναι ιζηματογενούς προελεύσεως - έχουν περιγραφεί πάνω από 800 διαφορετικές μορφές του. Απαντά, επίσης, και ως Αραγονίτης (πολυμορφική μορφή του με την ίδια χημική σύσταση αλλά διαφορετικό σύστημα κρυστάλλωσης). Η ολοσχερώς διαφανής παραλλαγή του ονομάζεται ισλανδική κρύσταλλος (αγγλ. Iceland spar ή calcite spar) και εμφανίζει έντονα το φαινόμενο της διπλοθλαστικότητας, γι' αυτό και χρησιμοποιείται στην κατασκευή οπτικών οργάνων (πρίσματα Nicol).



**Εικόνα 10:** Ισλανδική κρύσταλλος



Είναι ένα από τα πιο κοινά και διαδεδομένα ορυκτά του κόσμου. Ο ασβεστίτης είναι συνήθως χρώματος άσπρου αλλά συναντάται και σε άλλα χρώματα όπως το πράσινο ή το μπλε.

Ο ασβεστίτης βρίσκεται σε όλους τους ασβεστόλιθους. Ανεξάρτητα από την θερμοκρασία παραμένει σταθερός. Ο ασβεστίτης έχει μεγάλη επιστημονική



σημασία, γιατί είναι κλασικό ορυκτό που εμφανίζει το φαινόμενο της διπλής διάθλασης. λάμπουν προς διαφορετικές κατευθύνσεις.

Έναν και πλέον αιώνα αργότερα, έπειτα από λεπτομερή μελέτη του ασβεστίτη, ο μεγάλος Γάλλος ορυκτολόγος Ρενέ-Ζιστ Αουί (1743-1822) διατύπωσε τη θεωρία του για την κρυσταλλική δομή, που συνέβαλε στη σύγχρονη αντίληψη μας για την κρυσταλλογραφία.

### 3.2 Χαλαζίας

Ο **χαλαζίας** είναι ορυκτό του πυριτίου και συγκεκριμένα πολύ καθαρό οξείδιο πυριτίου, το δεύτερο πιο διαδεδομένο ορυκτό στη φύση. Τα ιόντα του χαλαζία είναι πολύ ισχυρά συνδεδεμένα και για αυτό έχει μεγάλη σκληρότητα. Απαντάται σε πολλές και ποικίλες μορφές, έχοντας χρώμα από σκούρο καφέ-μαύρο (καπνιάς) έως τελείως διαφανές. Στα πετρώματα συναντάται σε κοκκώδη ή κρυσταλλική μορφή.



**Εικόνα 11:** Χαλαζίας



### 3.3. Ολιβίνης

Ο ολιβίνης είναι ένα άνυδρο πυριτικό ορυκτό του Fe και του Mg. Αποτελεί ισόμορφη μίξη μεταξύ του μαγνησιούχου ολιβίνη με την ονομασία φορστερίτης ( $Mg_2SiO_4$ ) και του σιδηρούχου ολιβίνη με την ονομασία φαΰαλίτης ( $Fe_2SiO_4$ ). υπερβασικών (περιδοτίτης, δουνίτης) πυριγενών πετρωμάτων. Απαντά, επίσης, και σε μεταμορφωμένα πετρώματα, κυρίως στο πράσινο μάρμαρο (ολιβινικά μάρμαρα). Οι δείκτες διάθλασης κυμαίνονται ανάλογα με τη χημική σύσταση του ολιβίνη: φορστερίτης  $n_\alpha=1,635$  και  $n_\gamma=1,670$ , φαΰαλίτης  $n_\alpha=1,827$  και  $n_\gamma=1,879$ .

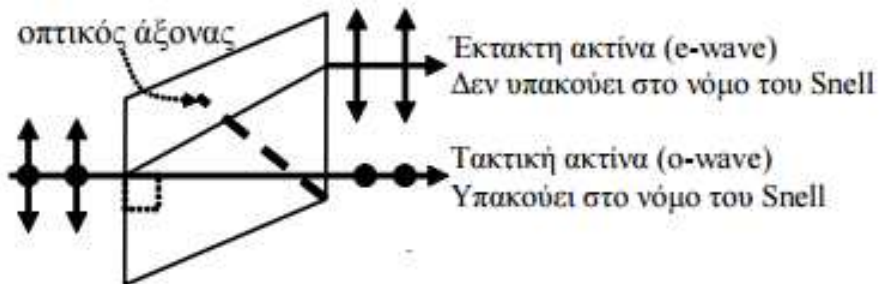


**Εικόνα 12:** Ολιβίνης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

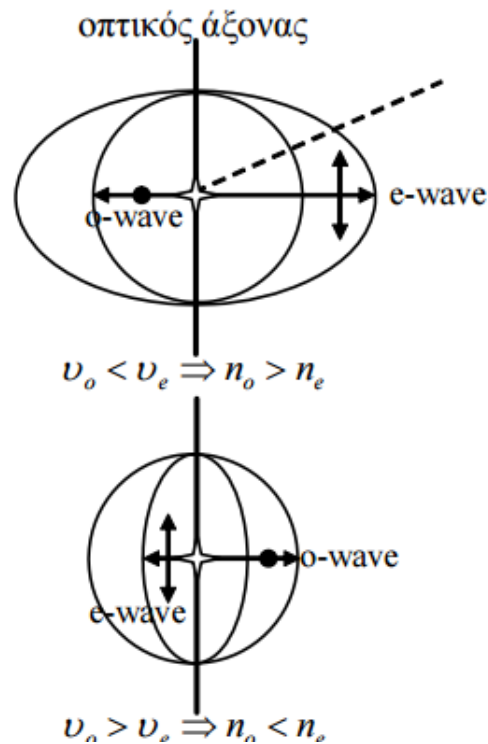
### ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΚΙΔΙΩΝ ΦΑΣΗΣ ΣΤΑ LASERS

Υπάρχουν υλικά (φυσικοί κρύσταλλοι ή άλλα) όπου η ταχύτητα διάδοσης του φωτός μέσα σε αυτά (και συνεπώς και ο δείκτης διάθλασης) εξαρτάται, εν γένει, από τη διεύθυνση διάδοσης και τον προσανατολισμό του επιπέδου της γραμμικής πόλωσης. Υπάρχει όμως μια διεύθυνση για την οποία η ταχύτητα διάδοσης είναι ανεξάρτητη του επιπέδου πόλωσης. Η διεύθυνση αυτή ονομάζεται οπτικός άξονας. Εάν φυσικό φως προσπέσει σε ένα τέτοιο διπλοθλαστικό υλικό, κατά κανόνα διαχωρίζεται σε δύο κύματα (εικόνα 1) με επίπεδα πόλωσης κάθετα μεταξύ τους και διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης. Το κύμα με επίπεδο πόλωσης κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης υπακούει στο νόμο του Snell (στην εικόνα 13 λόγω της κάθετης πρόσπτωσης συνεχίζει την πορεία του στο υλικό χωρίς αλλαγή διεύθυνσης) και ονομάζεται τακτικό κύμα (ordinary wave). Το άλλο κύμα δεν υπακούει στο νόμο του Snell και ονομάζεται έκτακτο κύμα (extraordinary wave).



Εικόνα 13- Πλακίδιο καθυστέρησης φάσης

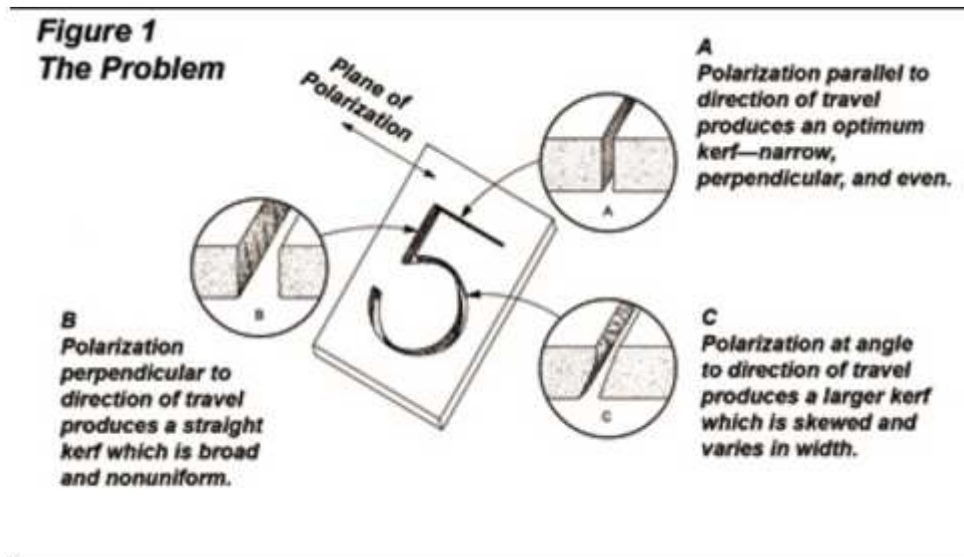
Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω θεωρούμε την φωτεινή πηγή φυσικού ή μη-πολωμένου φωτός που βρίσκεται εμβαπτισμένη στο διπλοθλαστικό υλικό, όπως στην εικόνα 14.



Εικόνα 14

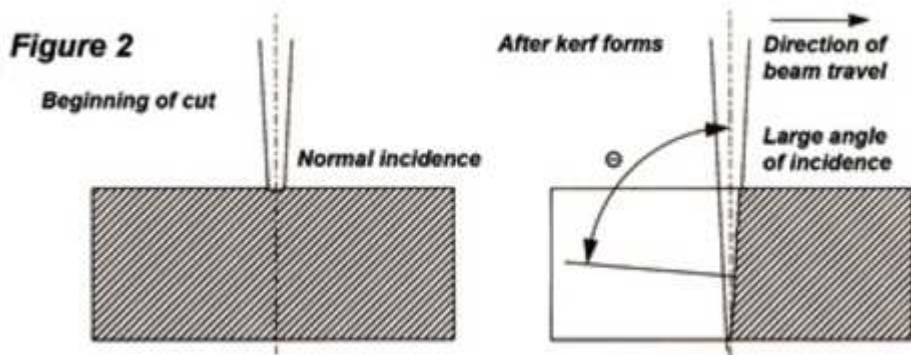
Το τακτικό κύμα διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα προς όλες τις διευθύνσεις (κυκλικό μέτωπο κύματος στην εικόνα 13) με ταχύτητα  $v_o$  και αντίστοιχο δείκτη διάθλασης  $n_o=c_o/v_o$ . Το έκτακτο κύμα από την άλλη μεριά διαδίδεται με ταχύτητα που εξαρτάται από τη διεύθυνση διάδοσης (ελλειπτικό μέτωπο κύματος στην εικόνα 14). Κατά τη διεύθυνση του οπτικού άξονα η ταχύτητα διάδοσης είναι ίση με αυτή του τακτικού κύματος ενώ η μεγαλύτερη διαφορά ταχυτήτων παρατηρείται για διάδοση κάθετα στο άξονα.

Η κοπή των μετάλλων με την χρήση λέιζερ και άλλες λειτουργίες λέιζερ είναι ευαίσθητες σε οποιαδήποτε μεταβολή στο πλάτος της εγκοπής ή της διατομής. Η ποιότητα της εγκοπής εξαρτάται από την πόλωση και τον προσανατολισμό σε σχέση με την κατεύθυνση κοπής. Αυτό απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 15

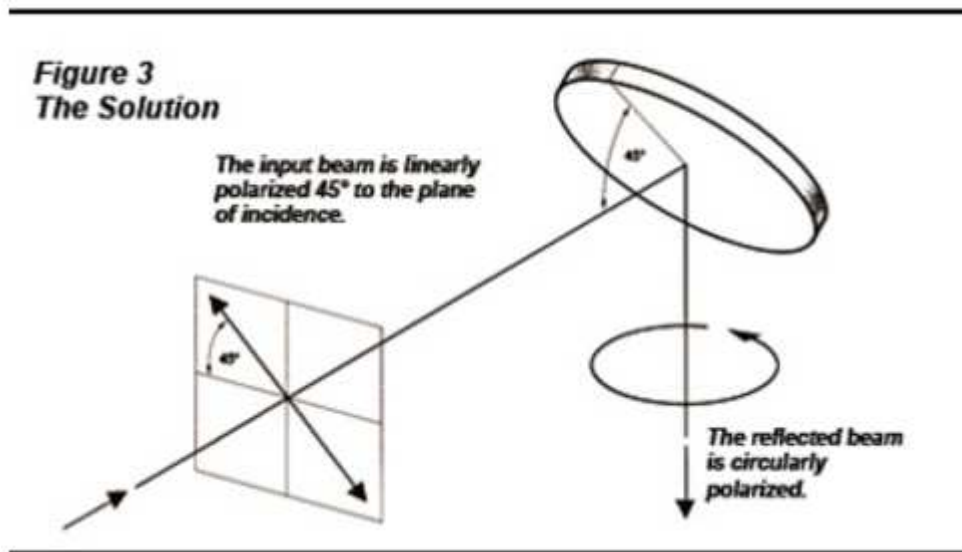
Η τρέχουσα θεωρία εξηγεί ότι η υπόθεση μιας εστιασμένης δέσμης χτυπάει το κομμάτι σε κανονική συχνότητα. Αυτό βέβαια ισχύει μόνο στην αρχή της κοπής του. Μόλις σχηματιστεί η εγκοπή, η δέσμη συναντά μέταλλο σε μια μεγάλη γωνία πρόσπτωσης,  $\Theta$ , όπως φαίνεται στο. Το φως το οποίο είναι s-πολωμένο με αναφορά σε μια τέτοια επιφάνεια αντανακλάται πολύ περισσότερο από ό, τι το φως το οποίο είναι p-πολωμένο και αυτό οδηγεί σε διαφορετική ποιότητα κοπής.



Εικόνα 16

Εισάγοντας ένα πλακίδιο καθυστέρησης φάσης  $90^\circ$  στην πορεία της δέσμης εξαλείφει τις διακυμάνσεις εγκοπής με τη μετατροπή της γραμμικής πόλωσης σε κυκλική πόλωση. Η κυκλική πόλωση αποτελείται από ίσες ποσότητες s-πόλωσης και p-πόλωσης για οποιονδήποτε προσανατολισμό της δέσμης, ως εκ τούτου, όλοι οι άξονες αντιμετωπίζουν την ίδια σύνθεση της πόλωσης, και το υλικό αφαιρείται ομοιόμορφα, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση.

Μια γραμμικά πολωμένη δέσμη προσανατολίζεται έτσι ώστε το επίπεδο πόλωσης να είναι  $45^\circ$  προς το επίπεδο πρόσπτωσης και χτυπά το RPR στις  $45^\circ$  ως προς το φυσιολογικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Η ανακλώμενη δέσμη είναι κυκλικά πολωμένη.



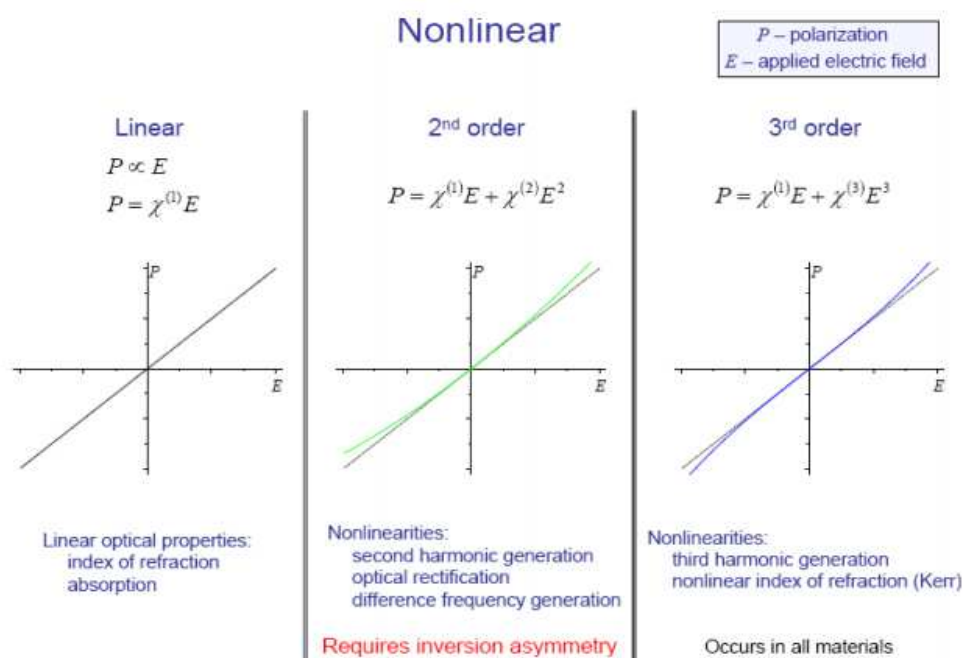
Εικόνα 17

Η επιλογή του υποστρώματος εξαρτάται από το επίπεδο ισχύος στο οποίο λειτουργεί το λέιζερ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα περιγραφούν και θα ομαδοποιηθούν έννοιες και φαινόμενα που οφείλονται στη μη γραμμική απόκριση της ύλης κάτω από ισχυρής έντασης ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία



**Εικόνα 18:** Ανάπτυγμα Taylor της πόλωσης σε δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου και τα επαγόμενα φαινόμενα.

Γραμμική Οπτική: Η πόλωση που επάγεται σε ένα υλικό υπό την επίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, είναι γενικά ανάλογη της έντασης του πεδίου

$$\tilde{P}(t) = \chi^{(1)} \tilde{E}(t) \quad (4.1)$$



όπου  $\chi^{(1)}$  είναι εν γένει ένας μιγαδικός αριθμός που ονομάζεται γραμμική επιδεκτικότητα.

Μη γραμμική Οπτική: Η πόλωση υπό την επίδραση ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών δίνεται ως ανάπτυγμα Taylor σε δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου.

$$\tilde{P}(t) = \chi^{(1)} \tilde{E}(t) + \chi^{(2)} \tilde{E}^2(t) + \chi^{(3)} \tilde{E}^3(t) + \dots \quad (4.2)$$

Στο ανάπτυγμα αυτό  $\chi^{(2)}$ ,  $\chi^{(3)}$  είναι οι μη γραμμικές επιδεκτικότητες δεύτερης και τρίτης τάξης αντίστοιχα. Οι ποσότητες  $\chi^{(2)}$ ,  $\chi^{(3)}$  είναι μιγαδικές, το πραγματικό τους μέρος σχετίζεται με τη μη γραμμική διάθλαση ενώ το φανταστικό, με τη μη γραμμική απορρόφηση. Λαμβάνοντας υπόψη τη διανυσματική φύση της πόλωσης και του πεδίου, προκύπτει ότι οι ποσότητες που τα συνδέουν, είναι τανυστές. Συγκεκριμένα το  $\chi^{(2)}$ , είναι τανυστής τρίτης τάξης και το  $\chi^{(3)}$  τανυστής τέταρτης τάξης.

Σε μικροσκοπικό επίπεδο χρησιμοποιείται η διπολική ροπή η οποία συνδέεται με την πόλωση μέσω της σχέσης:

$$\bar{P} = N\bar{p}$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου. Η επαγόμενη διπολική ροπή μπορεί να γραφεί σαν ανάπτυγμα σε δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου ως εξής:

$$p = aE_{loc} + \beta E_{loc}^2 + \gamma E_{loc}^3 \quad (4.3)$$

όπου  $\alpha$  η πολωσιμότητα (τανυστής δεύτερης τάξης),  $\beta$  η υπερπολωσιμότητα που ασκείται σε ένα μόριο εξαιτίας όλων των υπολοίπων

$$E_{loc} = LE \quad (4.4)$$

όπου  $L$  ο συντελεστής διόρθωσης τοπικού πεδίου

$$L = \frac{n_0^2 + 2}{3} \quad (4.5)$$

και  $n_0$  γραμμικός δείκτης διάθλασης.

### Μη αρμονικοί όροι στην Πόλωση

#### Μη γραμμική πόλωση δεύτερης τάξης

Έστω ότι σε ένα υλικό εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο συχνότητας  $\omega$

$$\tilde{E}(t) = Ee^{-i\omega t} + E^*e^{i\omega t} \quad (4.6)$$

Η μη γραμμική πόλωση δεύτερης τάξης γράφεται ως

$$P = 2\chi^{(2)}EE^* + \chi^{(2)}E^2e^{-2i\omega t} + c.c \quad (4.7)$$

Ο πρώτος όρος χαρακτηρίζεται από μηδενική συχνότητα και αντιστοιχεί σε μια διαδικασία που ονομάζεται οπτική ανόρθωση (optical rectification). Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές της γένεσης της δεύτερης αρμονικής είναι η μετατροπή της θεμελιώδους συχνότητας της δέσμης του laser, σε δέσμη διπλάσιου μήκους

κύματος της ακτινοβολίας λέιζερ από τα 1064nm στα 532nm. Όταν ηλεκτρικά πεδία συχνοτήτων  $\omega_1$  και  $\omega_2$ ,

$$\tilde{E}(t) = E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + E_1^* e^{i\omega_1 t} + E_2^* e^{i\omega_2 t} \quad (4.8)$$

προσπίπτουν σε ένα μέσο μη γραμμικής επιδεκτικότητας  $\chi^{(2)}$ , η πόλωση αποκτά τη μορφή :

$$P = 2\chi^{(2)}[E_1 E_1^* + E_2 E_2^*] + \chi^{(2)}[E_1^2 e^{-2i\omega_1 t} + E_2^2 e^{-2i\omega_2 t} + 2E_1^* E_2 e^{-i(\omega_1 + \omega_2)t} + 2E_1 E_2^* e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t} + c.c] \quad (4.9)$$

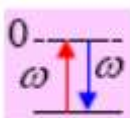
Λαμβάνοντας υπόψη τον τανυστικό χαρακτήρα της μη γραμμικής επιδεκτικότητας, ένας άλλος τρόπος γραφής της πόλωσης είναι ο παρακάτω :

$$P_i(\omega_n + \omega_m) = \sum_{jk} \sum_{(nm)} \chi_{ijk}^{(2)}(\omega_n + \omega_m; \omega_n, \omega_m) E_j(\omega_n) E_k(\omega_m) \quad (4.10)$$

### Ηλεκτροοπτικό φαινόμενο

$$P^{(2)}(\omega_i) = \chi^{(2)}(\omega_i; \omega_i, 0) E(\omega_i), E^*(0)$$

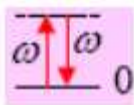
Ένα σταθερά χρονικό ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στο μέσο και σε ένα ηλεκτρικό πεδίο συχνότητας  $\omega$



### Οπτική Ανόρθωση

$$P^{(2)}(0) = \chi^{(2)}(0; \omega_i, -\omega_i) E(\omega_i), E^*(\omega_i)$$

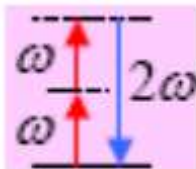
Κατά την διάρκεια της οπτικής ανόρθωσης παράγεται στατικό ηλεκτρικό πεδίο.



### Δεύτερη αρμονική (SHG)

$$P^{(2)}(2\omega_i) = \chi^{(2)}(2\omega_i; \omega_i, \omega_i) E(\omega_i), E(\omega_i)$$

Η συχνότητα  $\omega$  διπλασιάζεται κατά την παραγωγή της δεύτερης αρμονικής



### Μη γραμμικά φαινόμενα

**Pockel's effect** (ή γραμμικό ηλεκτροοπτικό φαινόμενο)

Στο φαινόμενο Pockel σημειώνεται γραμμική εξάρτηση του δείκτη διάθλασης

$$n(E) = n_0 + En_1 \quad (4.11)$$

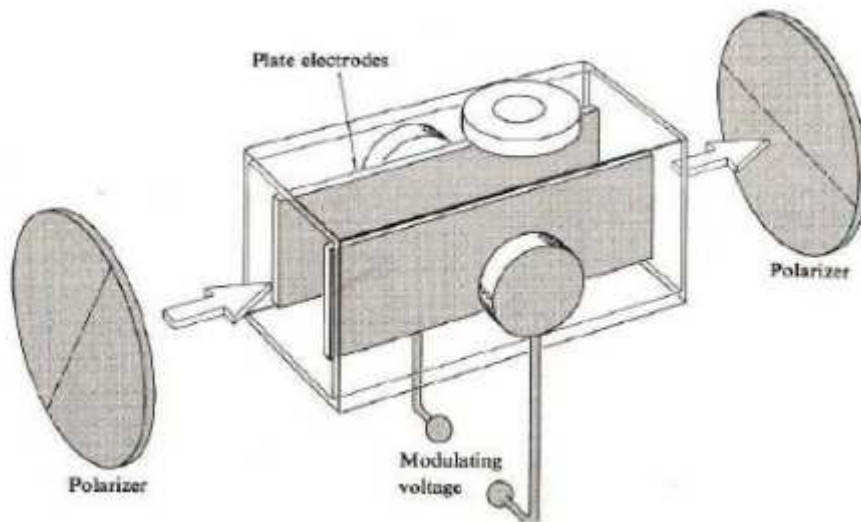
### DC Φαινόμενο Kerr

Το φαινόμενο Kerr συνδέει τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης ενός υλικού συναρτήσει του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου [6]

$$n(E) = n_0 + \frac{1}{2}n_2E^2 \quad (4.12)$$

Στο παρακάτω σχήμα (εικ. 19) απεικονίζεται η διάταξη με την οποία μπορούμε να μελετήσουμε το φαινόμενο Kerr. Η διαφορά των δεικτών διάθλασης σε δυο κάθετες διευθύνσεις δίνεται από τη σχέση

$$\Delta n = \lambda KE^2 \quad (4.13)$$



Εικόνα 12- Κύτταρο Kerr όπου εκατέρωθεν τοποθετούνται ο πολωτής και ο αναλυτής αντίστοιχα.

### Η σημασία της εφαρμοζόμενης τάσης V και της πόλωσης της αρχικής ακτινοβολίας

Στην περίπτωση που η εφαρμοζόμενη τάση είναι μηδέν  $V=0$  , τότε δεν διαδίδεται η ακτινοβολία. Αντίθετα για μη μηδενική τάση το κύτταρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διάφραγμα (optical shutter ) ή ακόμη και ως πλακίδιο συγκεκριμένου μήκους κύματος του οποίου η διαφορά φάσης των συνιστωσών θα δίνεται από τη σχέση

$$\Delta\phi = \frac{2\pi K V^2 l}{d^2} \quad (4.14)$$

όπου K η σταθερά Kerr, V η τάση, και l , d οι διαστάσεις του κυττάρου. Η ακτινοβολία στην περίπτωση της μη μηδενικής τάσης, εξέρχεται γενικά από το υλικό ελλειπτικά (Jonathan 2006)

## Μαγνητο-οπτικό φαινόμενο Kerr

2

Το **φαινόμενο Kerr** είναι η αλλαγή στο δείκτη διάθλασης ενός υλικού σε σχέση με ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Το φαινόμενο **Kerr** διαφέρει από το **φαινόμενο Pockels** στο ότι το επαγόμενο δείκτη διάθλασης είναι ευθέως ανάλογα προς το τετράγωνο του ηλεκτρικού πεδίου αντί να μεταβάλλεται γραμμικά με αυτό. Όλα τα υλικά παρουσιάζουν το φαινόμενο Kerr, αλλά μερικά υγρά το παρουσιάζουν πιο έντονα από άλλα υγρά. Το **φαινόμενο Kerr** το ανακάλυψε το 1875 ο **John Kerr**, ένας Σκοτσέζος Φυσικός.

Δύο ειδικές περιπτώσεις του φαινομένου Kerr είναι το Kerr ηλεκτρο-οπτικό αποτέλεσμα, ή αποτέλεσμα DC Kerr, και το οπτικό αποτέλεσμα Kerr, ή αποτέλεσμα AC Kerr.

Το μαγνητο-οπτικό φαινόμενο παρατηρήθηκε από τον John Kerr, το 1874



JohnKerr(1824- 1907)

### Ηλεκτρο-οπτικό αποτέλεσμα Kerr

Το Kerr ηλεκτρο-οπτικό αποτέλεσμα, ή αποτέλεσμα DC Kerr, είναι η ειδική περίπτωση στην οποία εφαρμόζεται ένα αργά μεταβαλλόμενο εξωτερικό ηλεκτροοπτικό πεδίο, για παράδειγμα, μια τάση επί των ηλεκτροδίων κατά μήκος του υλικού του δείγματος. Στο πλαίσιο αυτής της επιρροής, το δείγμα αποκτά διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για το φως, άλλον σε κατεύθυνση πόλωσης παράλληλη και άλλον σε κατεύθυνση πόλωσης κάθετη προς το εφαρμοζόμενο πεδίο. Η διαφορά στον δείκτη διάθλασης,  $\Delta n$ , δίνεται από

$$\Delta n = \lambda K E^2$$

όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος του φωτός,  $K$  είναι η σταθερά Kerr, και  $E$  είναι η ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου.

Όταν το φως προσπίπτει πάνω στο ηλεκτρικό πεδίο με κάθετη κατεύθυνση τότε αυτή η διαφορά στον δείκτη διάθλασης έχει ως συνέπεια το υλικό να δράσει σαν ένα waveplate (επιβραδυντή). Εάν το υλικό τοποθετηθεί κάθετα μεταξύ δύο διασταυρωμένων γραμμικών πολωτών, τότε φως δεν θα μεταδίδεται όταν το ηλεκτρικό πεδίο είναι απενεργοποιημένο, ενώ σχεδόν όλο το φως θα μεταδίδεται για κάποια βέλτιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου. Στις υψηλότερες τιμές της σταθεράς Kerr είναι δυνατόν να επιτευχθεί η πλήρης μετάδοση του φωτός με ένα μικρότερο εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

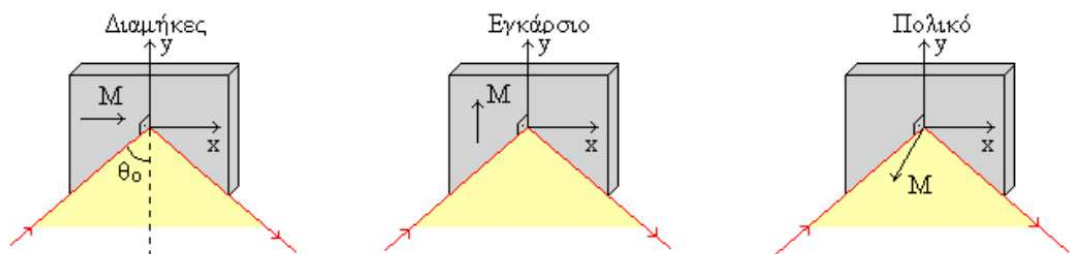
Μερικά πολικά υγρά, όπως νιτροτολουόλιο και νιτροβενζόλιο ( $C_6H_5NO_2$ ) παρουσιάζουν πολύ μεγάλη τιμή Kerr. Αυτά χρησιμοποιούνται συχνά για να ρυθμίσουν το φως, δεδομένου ότι η επίδραση Kerr ανταποκρίνεται πολύ γρήγορα στις μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου. Το φως μπορεί να ρυθμίζεται με αυτές τις συσκευές σε συχνότητες τόσο υψηλές ίσες με 10 GHz. Επειδή η επίδραση Kerr είναι σχετικά αδύναμη, ένα τυπικό κύτταρο Kerr μπορεί να απαιτήσει τάσεις τόσο υψηλό



όπως 30 kV για να επιτευχθεί πλήρης διαφάνεια. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα κύτταρα Rockels, τα οποία μπορεί να λειτουργεί σε πολύ χαμηλότερες τάσεις. Ένα άλλο μειονέκτημα των κυττάρων Kerr είναι ότι το καλύτερο διαθέσιμο υλικό, νιτροβενζόλιο, είναι δηλητηριώδες. Ορισμένες διαφανείς κρύσταλλοι έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για Kerr διαμόρφωση, αν και έχουν μικρότερες σταθερές Kerr.

Σε μέσα που στερούνται αντίστροφη συμμετρία, η επίδραση Kerr γενικά καλύπτεται από την πολύ ισχυρότερη επίδραση Rockels. Η επίδραση Kerr είναι ακόμη παρούσα, όμως, και σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να ανιχνευθούν ανεξαρτήτως συνεισφορών επίδραση Rockels.

Υπάρχουν τρία είδη μαγνητοοπτικού φαινομένου Kerr: Το διαμήκες (longitudinal), το εγκάρσιο (transverse) και το πολικό (polar) φαινόμενο. Η εκδήλωση του καθενός σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό εξαρτάται από τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου ως προς το υμένιο. Στην εικόνα 21 εξηγούμε σχηματικά τα τρία είδη φαινομένου Kerr. Στο εγκάρσιο φαινόμενο η μαγνήτιση είναι κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης που απεικονίζεται κίτρινο χρώμα, στο διαμήκες η μαγνήτιση είναι παράλληλη στο επίπεδο πρόσπτωσης αλλά και παράλληλη στην επιφάνεια του υμενίου. Στο πολικό φαινόμενο όμως η μαγνήτιση είναι παράλληλη στο επίπεδο πρόσπτωσης αλλά βρίσκεται κάθετα στην επιφάνεια του υμενίου.

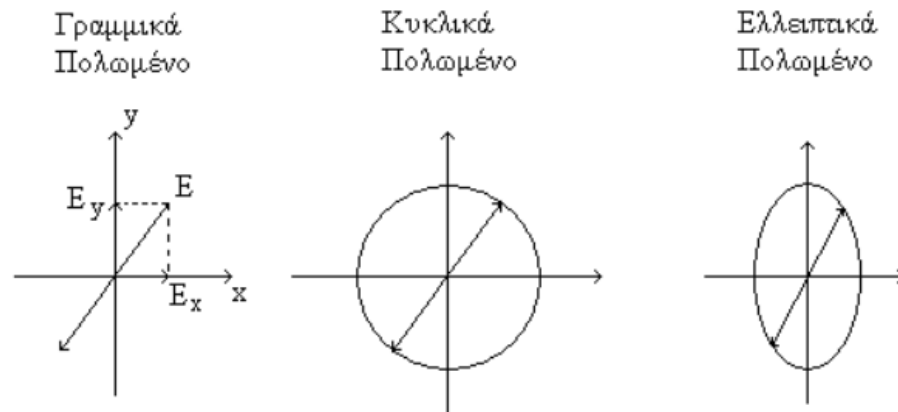


**Σχήμα 20** Τα τρία φαινόμενα Kerr και οι διευθύνσεις μαγνήτισης σε σχέση με το επίπεδο πρόσπτωσης

2

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, τα τρία είδη πόλωσης είναι:

- Γραμμική πόλωση
- Κυκλική πόλωση
- Ελλειπτική πόλωση



**Σχήμα 21** Τα τρία είδη πόλωσης του φωτός.

Παρατηρώντας τα, μπορούμε να προχωρήσουμε σε περαιτέρω ανάλυση δύο άλλων κάθετων διανυσμάτων:

- $E_x$
- $E_y$
- $E_z$

$$\underline{E} = \begin{bmatrix} E_{in,p} \\ E_{in,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 \cos\theta_p \\ E_0 \sin\theta_p \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας ο οποίος αλλάζει τις συνιστώσες του πολωμένου φωτός που προσπίπτει στο δείγμα είναι :

$$S = m_t^2 S_t + m_l^2 S_l + m_p^2 S_p$$

Όπου:

$$S_t = \begin{bmatrix} r_{pp}^t & r_{ps}^t \\ r_{sp}^t & r_{ss}^t \end{bmatrix} \quad S_l = \begin{bmatrix} r_{pp}^l & r_{ps}^l \\ r_{sp}^l & r_{ss}^l \end{bmatrix} \quad S_p = \begin{bmatrix} r_{pp}^p & r_{ps}^p \\ r_{sp}^p & r_{ss}^p \end{bmatrix}$$

Και:

$$m_t = \frac{M_t}{M_s} \quad m_p = \frac{M_p}{M_s} \quad m_l = \frac{M_l}{M_s}$$

$$\text{με την ιδιότητα} \quad m_t^2 + m_l^2 + m_p^2 = 1$$

Τα στοιχεία  $r_{ps}$  και  $r_{sp}$  των πινάκων συσχετίζονται με το φαινόμενο Kerr. Τα στοιχεία  $r_{ps}$ ,  $r_{sp}$  μαζί με τα  $r_{pp}$ ,  $r_{ss}$  ονομάζονται και συντελεστές Fresnel της ανακλώμενης επιφάνειας του υμενίου. Τα  $m_t$ ,  $m_l$  και  $m_p$  είναι τα συνημίτονα κατεύθυνσης της μαγνήτισης  $M_s$ . Η μήτρα  $S$  συνδυάζοντας τις 3.2, 3.3 μπορεί να γραφτεί επίσης ως εξής :

$$S = \begin{bmatrix} m_t^2 r_{pp}^t + m_l^2 r_{pp}^l + m_p^2 r_{pp}^p & m_t^2 r_{ps}^t + m_l^2 r_{ps}^l + m_p^2 r_{ps}^p \\ m_t^2 r_{sp}^t + m_l^2 r_{sp}^l + m_p^2 r_{sp}^p & m_t^2 r_{ss}^t + m_l^2 r_{ss}^l + m_p^2 r_{ss}^p \end{bmatrix}$$

Στους παρακάτω πίνακες δίνουμε τους συντελεστές της μήτρας  $S$  για το διαμήκες (longitudinal), το εγκάρσιο (transverse) και το πολικό (polar) φαινόμενο Kerr.

	$r_{ss}$	$r_{pp}$
Polar	$\frac{(n_0 \cos\theta_0 - n_1 \cos\theta_1)}{(n_0 \cos\theta_0 + n_1 \cos\theta_1)}$	$\frac{(n_1 \cos\theta_0 - n_0 \cos\theta_1)}{(n_1 \cos\theta_0 + n_0 \cos\theta_1)}$
Longitudinal	$\frac{(n_0 \cos\theta_0 - n_1 \cos\theta_1)}{(n_0 \cos\theta_0 + n_1 \cos\theta_1)}$	$\frac{(n_1 \cos\theta_0 - n_0 \cos\theta_1)}{(n_1 \cos\theta_0 + n_0 \cos\theta_1)}$
Transverse	$\frac{(n_0 \cos\theta_0 - n_1 \cos\theta_1)}{(n_0 \cos\theta_0 + n_1 \cos\theta_1)}$	$\frac{(n_1 \cos\theta_0 - n_0 \cos\theta_1)}{(n_1 \cos\theta_0 + n_0 \cos\theta_1)} \frac{(i2n_0 n_1 \cos\theta_0 \sin\theta_1 Q)}{((n_1 \cos\theta_0 + n_0 \cos\theta_1))}$

	$r_{sp}$	$r_{ps}$
Polar	$\frac{(i n_0 n_1 \cos \theta_0 Q)}{((n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1)(n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1))}$	$\frac{(i n_0 n_1 \cos \theta_0 Q)}{((n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1)(n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1))}$
Longitudinal	$\frac{(i n_0 n_1 \cos \theta_0 \tan \theta_1 Q)}{((n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1)(n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1))}$	$\frac{(-i n_0 n_1 \cos \theta_0 \tan \theta_1 Q)}{((n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1)(n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1))}$
Transverse	0	0

Στις παραπάνω σχέσεις  $\theta_0$ ,  $n_0$  και  $n_1$  είναι η γωνία πρόσπτωσης, ο δείκτης διαθλάσεως του μη μαγνητικού μέσου (στη προκειμένη περίπτωση του αέρα) και ο δείκτης διαθλάσεως του μαγνητικού μέσου (λεπτού υμενίου) αντίστοιχα. Όπως φαίνεται, οι συντελεστές Fresnel (τα στοιχεία της μήτρας S) εξαρτώνται πολύ από τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_0$ . Το μέτρο των συντελεστών  $r_{ps}$  και  $r_{sp}$  εκφράζει τη στροφή Kerr, ενώ το φανταστικό μέρος την καθυστέρηση που εισάγει το υμένιο στη φάση του ανακλώμενου φωτός ως προς το προσπίπτον. Αυτή η διαφορά φάσης είναι που δημιουργεί την ελλειπτικότητα εκτός από τη στροφή Kerr.  $Q$  είναι μια μιγαδική σταθερά που χαρακτηρίζει ένα μαγνητικό μέσο και ονομάζεται μαγνητοοπτική σταθερά.

Όλα τα κβαντομηχανικά φαινόμενα υπεύθυνα για το MOKE –οι διαφορετικοί δείκτες διάθλασης των αριστερά και δεξιά κυκλικά πολωμένων  $p$  καταστάσεων εξαιτίας της αλληλεπίδρασης σπιν-τροχιάς εξαρτώνται από την

παράμετρο Q. Στο όριο των μη μαγνητικών δειγμάτων, το Q πηγαίνει στο μηδέν, και τα μη διαγώνια στοιχεία του S που αυξάνουν το MOKE εξαφανίζονται, και έτσι οι συντελεστές Fresnel γίνονται οι συνήθεις συντελεστές Fresnel για την ανάκλαση.

Από τους παραπάνω πίνακες βλέπουμε επίσης ότι  $r_{pst}$  και  $r_{spt}$  είναι μηδενικά στοιχεία. Από το τελευταίο συμπεραίνουμε πως η εγκάρσια συνιστώσα μαγνήτισης δεν συνεισφέρει καθόλου στη στροφή Kerr. Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε ότι στη παρούσα εργασία δεν μας ενδιαφέρει η ελλειπτικότητα άλλα μόνο η στροφή Kerr. Τελικά έχουμε με συνοπτική μορφή :

$$\begin{bmatrix} E_{r,p} \\ E_{r,s} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} E_0 \cos\theta_p \\ E_0 \sin\theta_p \end{bmatrix}$$

Ή αλλιώς (ποιο εκτεταμένα):

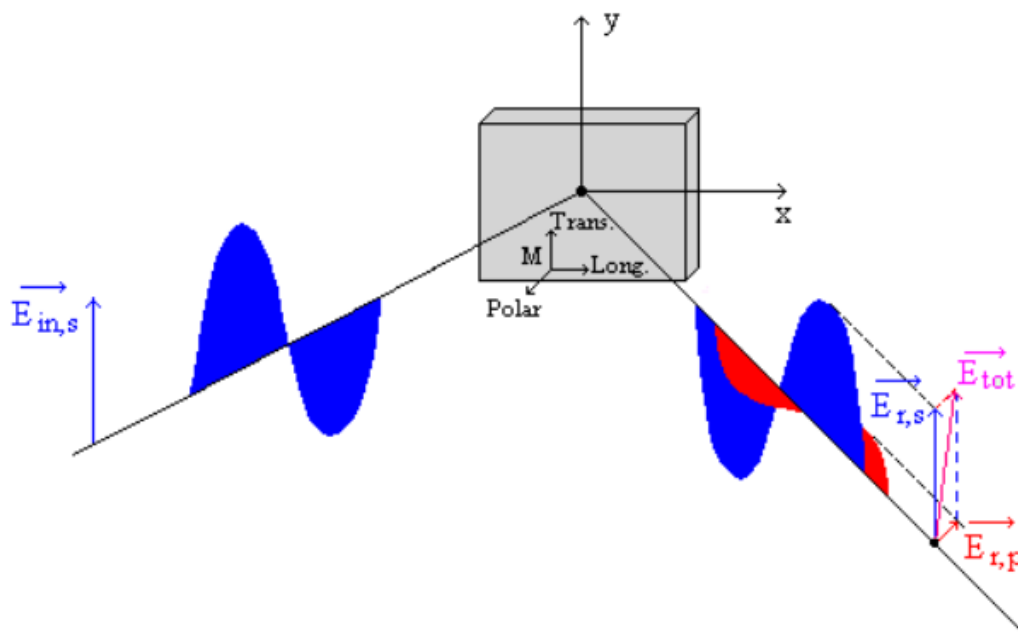
$$E_{r,p} = (m_t^2 r_{pp}^t + m_l^2 r_{pp}^l + m_p^2 r_{pp}^p) E_0 \cos\theta_p + (m_t^2 r_{ps}^t + m_l^2 r_{ps}^l + m_p^2 r_{ps}^p) E_0 \sin\theta_p$$

$$E_{r,s} = (m_t^2 r_{sp}^t + m_l^2 r_{sp}^l + m_p^2 r_{sp}^p) E_0 \cos\theta_p + (m_t^2 r_{ss}^t + m_l^2 r_{ss}^l + m_p^2 r_{ss}^p) E_0 \sin\theta_p$$

Στη συνέχεια, θέτουμε  $\theta_p = 90^\circ$ . Οπότε οι παραπάνω σχέσεις γίνονται:

$$E_{r,p} = (m_l^2 r_{ps}^l + m_p^2 r_{ps}^p) E_0$$

$$E_{r,s} = (m_t^2 r_{ss}^t + m_l^2 r_{ss}^l + m_p^2 r_{ss}^p) E_0$$



**Εικόνα 22** Αναπαράσταση του φαινομένου Kerr : Το ανακλώμενο φως έχει μία επιπλέον συνιστώσα, την  $E_{r,p}$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΕΙΖΕΡ

#### 6.1. Εισαγωγή

«Το λέιζερ, συμπεριλαμβάνεται μεταξύ των πιο θαυμαστών δώρων της Φύσης»

Πλίνιος ο Πρεσβύτερος, Φυσική Ιστορία, βιβλίο XXII, XLIX, 1ος αιώνας μ.Χ.

Τα λόγια αυτά του Πλίνιου, αν και στην πραγματικότητα αναφέρονται σε ένα φυτό που ευδοκίμωσε στην Κυρήνη, εντούτοις ήταν προφητικά για το σύγχρονο λέιζερ. Μια σύντομη ματιά στην εξέλιξη του πολιτισμού πάνω στον πλανήτη μας, οδηγεί στη διαπίστωση ότι υπάρχει μια άρρηκτη σχέση μεταξύ της ικανότητας του ανθρώπου να θέτει σε εφαρμογή νέες μορφές ενέργειας και της βελτίωσης της ποιότητας της ζωής του. (Pivtoraiko&Rozhkon 2003)

Σχεδόν όλα τα ανθρώπινα επιτεύγματα εξαρτώνται από την εφαρμογή της ενέργειας σε διάφορες μορφές, με μοναδική ίσως εξαίρεση τον εικαστικό τομέα. Είναι επομένως εύλογο να υπογραμμιστεί αυτή η σχέση μεταξύ της ικανότητας εφαρμογής των διαφόρων μορφών ενέργειας και της συνεχώς βελτιούμενης ποιότητας της ζωής μας. (Pivtoraiko&Rozhkon 2003)

Στη χαραυγή της ανθρωπότητας ο άνθρωπος μπόρεσε να επιβιώσει με τη βοήθεια διαφόρων εργαλείων και όπλων τα οποία κατασκεύαζε με χρήση της ενέργειας.



Όσο περισσότερο κατανοούσε την εφαρμογή της ενέργειας και τις δυνατότητές της, τόσο τελειοποιούσε και τα διάφορα εργαλεία του καθιστώντας τα έτσι πιο αποτελεσματικά. Η χρήση της ενέργειας αποτέλεσε και την απαρχή του πολιτισμού στη γη κατά τη λίθινη εποχή πριν 10000 χρόνια.

Είναι επίσης γεγονός ότι η ανακάλυψη τρόπων ελέγχου της ενέργειας οδήγησαν την εξέλιξη και άρα την άνοδο της ποιότητας της ζωής, ένα σημαντικό βήμα εξέλιξης. Την εποχή του λίθου τη διαδέχτηκε η εποχή του χαλκού, όπου ο άνθρωπος εφάρμοσε την ικανότητά του να ελέγχει την ενέργεια. Η χρήση της θερμικής ενέργειας κατά την εποχή αυτή, σε συνδυασμό με την ικανότητα του ανθρώπου να μπορεί να ελέγχει και να δημιουργεί τα επιθυμητά για την τήξη και τη στερεοποίηση επίπεδα θερμοκρασίας, οδήγησαν άλλο ένα βήμα τον ανθρώπινο πολιτισμό προς τα εμπρός. Υπάρχει εδώ μια άμεση σχέση που κανείς δε θα μπορούσε να αγνοήσει μεταξύ της δυνατότητας ελέγχου της ενέργειας και της δημιουργίας νέων υλικών. (Pivtoraiko&Rozhkon 2003)

Τα ανοδικά αυτά βήματα του ανθρώπινου πολιτισμού οδηγούν σιγά σιγά αλλά σταθερά στην εκμετάλλευση νέων μορφών ενέργειας. Έτσι με τη χρήση της αιολικής ενέργειας ο άνθρωπος αρχίζει πλέον να ταξιδεύει, να εμπορεύεται και να συναλλάσσεται, να διευρύνει τους ορίζοντές του αλλά και να μεταδίδει τις γνώσεις του.

Στην πορεία αυτής της εξέλιξης σημαντικός σταθμός αποτελεί το έτος 1705 όταν οι Newcomen και Cawley ανακάλυψαν την ατμομηχανή. Αν και η πρόοδος δεν ήταν ακαριαία, αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι τα πρώτα τρένα μπαίνουν σε λειτουργία 125 χρόνια μετά, σίγουρα όμως η ανακάλυψη της ατμομηχανής δίκαια θεωρείται η απαρχή της βιομηχανικής επανάστασης. Μιας επανάστασης της οποίας οι ταχύτερες αλλαγές στην ποιότητα ζωής ήταν σίγουρα πέρα και πάνω από τις προσδοκίες των ανθρώπων της εποχής εκείνης.

Το 1831 ο Faraday πραγματοποιεί τη δική του τομή στην ιστορία της προόδου και της εξέλιξης, με την από μέρους του ανακάλυψη του ηλεκτρικού κινητήρα και άρα του ηλεκτρισμού σε άμεσα εφαρμόσιμη μορφή. Τα αποτελέσματα αυτής της τομής δεν μπορούν να αμφισβητηθούν από κανένα.

Έτσι φθάνουμε στο 1960 όταν ο Mainman ανακάλυψε τον πρώτο λέιζερ οπότε η οπτική ενέργεια μπαίνει σε εφαρμόσιμη και άρα εκμεταλλεύσιμη μορφή. Κάποιοι θα μπορούσε να αναρωτηθεί πού θα μας οδηγήσει αυτή η νέα μορφή ενέργειας. Η απάντηση είναι απλή. Σίγουρα το λέιζερ δεν μπορεί να αποτελέσει εξαίρεση στον ιστορικό κανόνα της εξέλιξης και άρα με βεβαιότητα θα μας οδηγήσει σε νέα σημαντικά επιτεύγματα. (Pivtoraiko&Rozhkov 2003)

## **6.2. Τι είναι το Λέιζερ**

Ο ενισχυτής φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, γνωστότερος ως laser (ακρωνύμιο του light amplification by stimulated emission of radiation), είναι μια τεχνητή φωτοπηγή η οποία παράγει και εκπέμπει μια ενισχυμένη ακτινοβολία ειδικού τύπου με μοναδικές ιδιότητες. Η ακτινοβολία αυτή τοποθετείται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μεταξύ του υπεριώδους και του υπέρυθρου, συμπεριλαμβανομένου και του ορατού. (Singhetal 2012)

Παρά το ότι από το 1917 ο Albert Einstein είχε δείξει τη δυνατότητα ύπαρξης της ονομαζόμενης εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τον λέιζερ, εντούτοις μόλις το 1960 ο T. H. Mainman στην ιστορικής σημασίας εργασία του "Stimulated optical radiation in ruby", που δημοσιεύτηκε στο περιοδικά Nature, πέτυχε πρώτος τη λειτουργία του λέιζερ ρουβιδίου. Από τη δεκαετία του 1960 μέχρι σήμερα η ανάπτυξη του λέιζερ ήταν ραγδαία με

αποτέλεσμα σήμερα να υπάρχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που καλύπτει πολλούς τομείς της επιστήμης.

2

### 6.3. Αρχή λειτουργίας

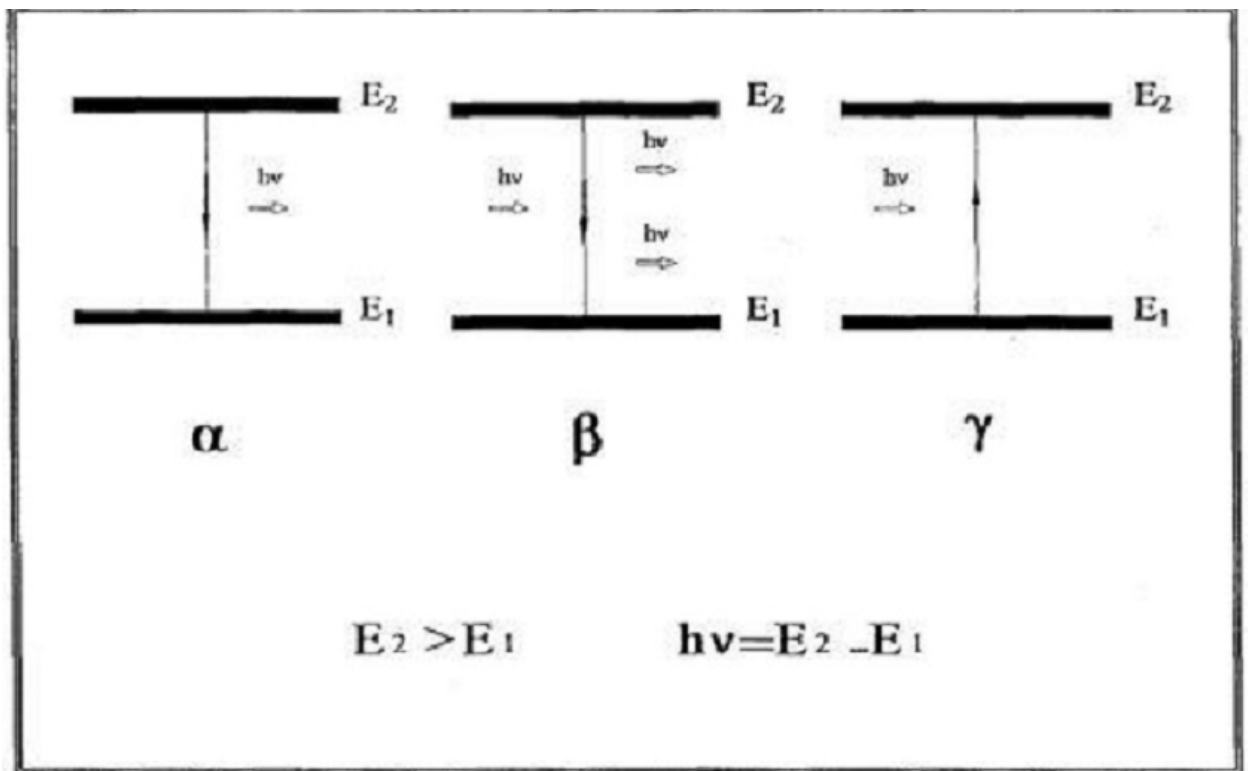
Όπως είναι γνωστό· όταν ένα ηλεκτρόνιο σε ένα άτομο μεταπηδά μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών, τότε είτε απορροφά ένα φωτόνιο (διεργασία διέγερσης) είτε εκπέμπει ένα φωτόνιο (διεργασία αποδιέγερσης) του οποίου η συχνότητα δίνεται από τη σχέση

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{\hbar} = \frac{\Delta E}{\hbar}$$

όπου  $\Delta E$ : διαφορά ενέργειας μεταξύ των δύο ενεργειακών σταθμών

$h$  : σταθερά του Plank

Αν θεωρηθεί ένα υποθετικό σύστημα δύο ενεργειακών σταθμών 1 και 2, που οι ενέργειές τους είναι  $E_1$  και  $E_2$ , αντίστοιχα, με  $E_1 < E_2$ , (εικόνα 19) και ότι οι μεταπηδήσεις ενός ηλεκτρονίου μπορούν να γίνουν μόνο μεταξύ των δύο αυτών σταθμών, τότε μπορούν να παρατηρηθούν οι ακόλουθες διεργασίες:



**Εικόνα 23:** Πραγματοποιούμενες δράσεις κατά τη μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου μεταξύ των ενεργειακών σταθμών: α. αυθόρμητη εκπομπή, β. εξαναγκασμένη εκπομπή και γ. απορρόφηση.

### 6.3.1. Αυθόρμητη εκπομπή (Εικόνα 23)

Ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου βρίσκεται αρχικά στην ενεργειακή στάθμη 2. Αφού  $E_1 < E_2$  το ηλεκτρόνιο έχει την τάση να αποδιεγερθεί στη στάθμη 1. Κατά την αποδιέγερση αυτή η αντίστοιχη ενεργειακή διαφορά ( $E_2 - E_1$ ) ελευθερώνεται από το άτομο και αποδίδεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος συχνότητας  $\nu$  (εξίσωση A 1.1).

Στην αυθόρμητη εκπομπή το ηλεκτρόνιο που διεγείρεται μένει στην κατάσταση διέγερσης ελάχιστο χρόνο, στη συνέχεια αποδιεγείρεται και εντελώς τυχαία

επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Αυθόρμητες εκπομπές προκαλούν την ακτινοβολία από τον ήλιο, τα άστρα, τους λαμπτήρες και τις φλόγες.

### **6.3.2 . Εξαναγκασμένη εκπομπή**

Ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στην ενεργειακή κατάσταση 2, εξαναγκάζεται από προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα να υποστεί μετάπτωση από τη στάθμη 2 στη στάθμη 1. Το ηλεκτρομαγνητικό αυτό κύμα έχει συγκεκριμένη συχνότητα που δίνεται από την παραπάνω εξίσωση (ίση δηλαδή με εκείνη του αυθόρμητα εκπεμπόμενου κύματος). Στην περίπτωση αυτή η ενεργειακή διαφορά αποδίδεται με τη μορφή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο προστίθεται στο προσπίπτον. (Singhetal 2012)

Υπάρχει μια βασική διάκριση μεταξύ αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής. Στην περίπτωση της αυθόρμητης, το άτομο εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που δεν έχει ορισμένη σχέση φάσης με εκείνο που εκπέμπεται από άλλο άτομο. Επίσης, το κύμα μπορεί να εκπεμφθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης εκπομπής, λόγω του ότι η διεργασία επάγεται από το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα, η εκπομπή είναι σε φάση με το προσπίπτον κύμα. Το προσπίπτον κύμα επίσης καθορίζει τη διεύθυνση του εκπεμπόμενου κύματος. Έτσι, κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή λαμβάνεται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα του οποίου τόσο η έντασή του, όσο και η διεύθυνσή του μπορεί να καθορίζεται και να ελέγχεται. (Pivtoraiko&Rozhkon 2003)

### **Απορρόφηση**

Κατά τη διεργασία της απορρόφησης το ηλεκτρόνιο βρίσκεται αρχικά στην ενεργειακή στάθμη 1 και παραμένει σε αυτή εκτός αν υποστεί κάποιο κατάλληλο

εξωτερικό ερέθισμα. Αν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας  $\nu$  προσπίπτει στο άτομο τότε το ηλεκτρόνιο θα διεγερθεί στην ενεργειακή στάθμη 2. Η ενεργειακή διαφορά που απαιτείται από το ηλεκτρόνιο για να διεγερθεί παρέχεται από την ενέργεια του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο και απορροφάται. ( Singhetal 2012)

### **Δράση λέιζερ**

Η δράση λέιζερ στηρίζεται στο φαινόμενο της εκπομπής ενέργειας, υπό τη μορφή φωτονίου, κατά τη μετάπτωση ηλεκτρονίου μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών.

Υπάρχουν τρεις τύποι μεταπτώσεων:

1. Ηλεκτρονιακές (σε άτομα και μόρια)
2. Δονητικές (σε μόρια μόνο).
3. Περιστροφικές (σε μόρια μόνο).

Οι ηλεκτρονιακές μεταπτώσεις ατόμων ή ιόντων λαμβάνουν χώρα ανεξάρτητα διότι τόσο τα άτομα όσο και τα ιόντα δε διαθέτουν δονητικές ή περιστροφικές καταστάσεις. Στην περίπτωση όμως των μορίων, τυχόν μεταβολές της δονητικής κατάστασης τους συνδέονται με μεταβολές και της περιστροφικής κατάστασής τους. ( Singhetal 2012)

Υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ μεταπτώσεων που περιλαμβάνουν μεταπτώσεις μόνο ενός τύπου και μεταπτώσεων που περιλαμβάνουν ταυτόχρονες μεταπτώσεις δύο ή και περισσότερων τύπων. Στην πρώτη περίπτωση η μετάπτωση πραγματοποιείται σε ένα μήκος κύματος αυστηρά καθορισμένα ενώ στη δεύτερη η μετάπτωση πραγματοποιείται σε ένα φάσμα μηκών κύματος.

Η δράση των λέιζερ βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή, η οποία και επιτρέπει την ενίσχυση της ακτινοβολίας. Όταν ένα φωτόνιο, κατάλληλης

συχνότητας, προσπίπτει σε ένα υλικό (ενεργό μέσο) που περιέχει πολυάριθμα διεγερμένα άτομα, τα οποία βρίσκονται στην ίδια διεγερμένη κατάσταση, εξαναγκάζει ένα άτομο να αποδιεγερθεί και να εκπέμψει ένα φωτόνιο. Τότε ο αριθμός των φωτονίων αυξάνει σε δύο, καθένα από τα οποία θα προκαλέσει την αποδιέγερση ενός άλλου φωτονίου οπότε τα φωτόνια αυξάνουν σε τέσσερα. (Singhetal 2012)

Η διαδικασία αυτής της αλυσιδωτής αντίδρασης συνεχίζεται ούτως ώστε ένα αρχικά μεμονωμένο φωτόνιο, να μπορεί να παράγει μια πληθώρα άλλων παρόμοιων φωτονίων. Αυτό αποτελεί και τη διαδικασία ενίσχυσης. Αυτή η διαδικασία για να καταστεί δυνατή πρέπει το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής να υπερσχύσει της απορρόφησης. Κάτω από φυσιολογικές συνθήκες θερμοδυναμικής. (Pivtoraiko&Rozhkon 2003)

#### **6.4. Τύποι λέιζερ**

Υπάρχουν οι ακόλουθοι τύπο Laser (Rao&Loyola 2013):

##### **1. Λέιζερ στερεάς κατάστασης**

- α. Λέιζερ ρουβιδίου
- β. Λέιζερ νεοδυμίου (NdYAG)

##### **2. Λέιζερ αερίων**

- α\_ λέιζερ ουδέτερων ατόμων
- β. Λέιζερ ιόντων

Λέιζερ αερίων ιόντων

Λείζερ μεταλλικών ατμών

γ. Λείζερ μοριακών αερίων 2

Αρνητικά-Περιστροφικά λείζερ

Δονητρονιακά λείζερ

Λείζερ διεγερμένων διμερών (KrF)

**3. Λείζερ υγρών**

**4. Χημικά λείζερ**

**5. Λείζερ ημιαγωγών**

**6. Λείζερ χρωματικών κέντρων**

**7. Λείζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων.**

## **6.5. Ιδιότητες Laser**

### **Μονοχρωματικότητα**

Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι:

1. Μόνο ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας  $\nu$  μπορεί να ενισχυθεί
2. Το σύστημα των δυο κατόπτρων σχηματίζει μια κοιλότητα συντονισμού και άρα ταλάντωση μπορεί να συμβεί μόνο στη συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας αυτής γεγονός που οδηγεί σε εύρος χρωματικής φασματικής γραμμής πρακτικά μηδέν.

### **Κατευθυντικότητα**

Η ιδιότητα αυτή είναι άμεσο επακόλουθο του γεγονότος ότι το ενεργό υλικό τίθεται σε μια κοιλότητα συντονισμού. Πράγματι μόνο ένα κύμα διαδιδόμενο κατά



μήκος του άξονα της κοιλότητας μπορεί να διατηρείται μέσα στην κοιλότητα. Έτσι το λέιζερ εκπέμπει ακτινοβολία, η οποία είναι εξόχως κατευθυντική και συγκεντρωτική, ευθυγραμμισμένη μέσα σε μια φωτοδέσμη πολύ μικρής γωνίας απόκλισης (περίπου 1 mrad). Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ σημαντική διότι η ενέργεια που μεταφέρεται από τη δέσμη λέιζερ είναι συγκεντρωμένη σε μια στενή διάυλο και μπορεί να συγκεντρωθεί εύκολα ολόκληρη σε κάποια απομακρυσμένη θέση και εκεί με τη βοήθεια φακών και κατόπτρων να εστιαστεί και να επικεντρωθεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Ακόμα με χρησιμοποίηση ειδικών ηλεκτροπτικών διατάξεων, η συγκεντρωμένη δέσμη λέιζερ μπορεί να καθοδηγηθεί σε οποιαδήποτε απόσταση, χωρίς μεγάλες απώλειες ισχύος, με μεγάλη ευχέρεια ταχείας αλλαγής θέσης. (Pivtoraiko&Rozhkon 2003)

### **Φωτεινότητα**

Η φωτεινότητα του λέιζερ είναι κατά πολύ υψηλότερη των κλασικών φωτεινών πηγών. Αυτό οφείλεται στη συγκέντρωση μεγάλης οπτικής ισχύος, μέσα σε μια πολύ λεπτή δέσμη πάρα πολύ μικρού ανοίγματος. Η εξαιρετική λαμπρότητα του λέιζερ συνδυασμένη με κατάλληλη εστίαση μπορεί να δώσει τεράστιες τιμές επιτόπιας πυκνότητας ισχύος.

### **Ικανότητα εστίασης**

Λόγω της συγκεντρωτικότητας και της χρωματικής καθαρότητάς της, η δέσμη λέιζερ μπορεί να εστιαστεί σε μια φωτεινή κηλίδα εξαιρετικά μικρών διαστάσεων χωρίς ιδιαίτερες απώλειες ισχύος. Η συγκέντρωση αυτή της δέσμης λέιζερ σε πολύ μικρή επιφάνεια προκαλεί στην εστία αυτή τεράστιες τιμές πυκνότητας ισχύος. Η θέση της εστίας μπορεί να ελέγχεται πλήρως (κατευθυντικότητα).

Τέτοιες υψηλές τοπικές συγκεντρώσεις ισχύος επιτρέπουν επίλεκτη αλλά και δραστική προσβολή στόχων στη θέση της εστίας. (Rao&Loyola 2013):

### **Συνεκτικότητα φάσης**

Η φωτοδέσμη που εκπέμπεται από μια πηγή λέιζερ έχει πολύ υψηλό βαθμό συνεκτικότητας φάσης. Η συνεκτικότητα αυτή σημαίνει ότι η διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων της φωτοδέσμης παραμένει διαρκώς σταθερή είτε στο επίπεδο του κυματομετώπου (χωρική συνεκτικότητα) είτε κατά μήκος του (χρονική συνεκτικότητα).

Η συνεκτικότητα φάσης παίζει σημαντικό ρόλο σε όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν δύο τμήματα της ίδιας δέσμης λέιζερ ή δύο διαφορετικές δέσμες λέιζερ. (Rao&Loyola 2013):

### **Ικανότητα διαμόρφωσης**

Λόγω των καθαρών κυματικών χαρακτηριστικών της, η δέσμη λέιζερ μπορεί να υποστεί εύκολα διαμόρφωση της τάξης των πολλών GHz πράγμα πολύτιμο για τις οπτικές επικοινωνίες.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

### **ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ**

### **ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ ΖΩΗ**

#### **7.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ**

Η τεχνολογία λέιζερ έχει διεισδύει σήμερα με ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών σε πολλούς κλάδους της επιστήμης (Rao&Loyola 2013):

##### **7.1.1. Κατεργασία υλικών**

Το laser χρησιμοποιείται στην κοπή, στη συγκόλληση, στη χάραξη, στη διάτρηση, στην επιφανειακή σκλήρυνση, στην επιφανειακή κραματοποίηση κτλ.

Σημαντική είναι η χρήση του Laser για το τρύπημα και το κόψιμο των μετάλλων με μεγάλη ακρίβεια. Η απορροφούμενη ένταση μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας λέιζερ. Και όταν η φωτεινή κηλίδα στην επιφάνεια φτάσει σε θερμοκρασία βρασμού, γίνεται αφαίρεση του υλικού. Το Laser δίνει τη δυνατότητα διάτρησης των διαμαντιών μέσα σε λίγα λεπτά, έναντι 20 ωρών που θα χρειαζόταν με συμβατικές μεθόδους. Επίσης το λέιζερ χρησιμοποιείται στην πραγματοποίηση μικροανοιγμάτων σε ρουμπίνια εκτός από διαμάντια.

Επίσης, υπάρχουν τα λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα που χρησιμοποιείται ευρέως για την κοπή μεγάλης ποικιλίας υλικών, όπως γραφίτης, διαμάντι, βολφράμιο, καρβίδιο, μεταλλικά φύλλα, κεραμικά, ζαφείρι, και φερρίτη. Στις περισσότερες

περιπτώσεις, η συνεχής κοπή διεξάγεται με την βοήθεια αερίων όπως το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία παράγουν τόσο μηχανικές και χημικές αντιδράσεις εντείνοντας τις θερμικές επιδράσεις. Αυτά τα αέρια με τη βοήθεια της κοπής είναι εφαρμόσιμα στα μέταλλα πάχους έως και 5 mm, με επιφάνεια κοπής μέχρι 30 μm. Η πλέον υποσχόμενη τεχνολογία στον τομέα της κοπής με λέιζερ είναι η κοπή του χάλυβα μικρού πάχους (αρκετά χιλιοστά) και επίσης σε μη-μεταλλικά υλικά.

Επίσης, στον τομέα της βιομηχανίας ενδυμάτων και με τη βοήθεια των υπολογιστών, το λέιζερ μπορεί να κόψει τα ρούχα πολύ πιο γρήγορα από ότι οι ράφτες χρησιμοποιώντας παλιές τεχνικές. Είναι δυνατόν τώρα να τεμαχίζουν μέσα από πολλές στρώσεις από χοντρό ύφασμα με ακρίβεια και σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα χρησιμοποιώντας έναν κόπτη λέιζερ.



**Εικόνα 24:** χρήση του laser στην κατεργασία υλικών

### 7.1.2. Βιομηχανικοί αυτοματισμοί

2

Στον τομέα της ρομποτικής η χρήση του laser είναι ύψιστης σημασίας



Εικόνα 25: χρήση του laser στην ρομποτική

### 7.1.3. Μετρολογία



Παρέχοντας υψηλό βαθμό συνοχής και μονοχρωματικότητας, το λέιζερ είναι ιδανικό στη χρήση της μετρολογίας για τη μέτρηση μηκών, ταχυτήτων και οπτικών χαρακτηριστικών. Μια ακριβής μέθοδος μέτρησης αποστάσεων είναι το μήκος κύματος του φωτός. Μια συμβατική τεχνική χρησιμοποιεί ένα όργανο που ονομάζεται συμβολόμετρο για τις οπτικές μετρήσεις (επιφάνεια , παραλληλισμό των κατόπτρων, η διακύμανση της διάθλασης , κλπ).

Χρησιμοποιώντας όμως ένα λέιζερ αερίου ως πηγή φωτός στον μετρητή παρεμβολής, επιτυγχάνεται η υψηλότερη ακρίβεια. Στην πραγματικότητα, το διεθνές πρότυπο του μήκους, δηλαδή, ένα μέτρο βαθμονομείται με τη βοήθεια μιας συχνότητας που είναι σταθεροποιημένη από ένα λέιζερ. Επίσης το laser χρησιμοποιείται για μετρήσεις αποστάσεων, στα οπτικά radar, στα στροφόμετρα.

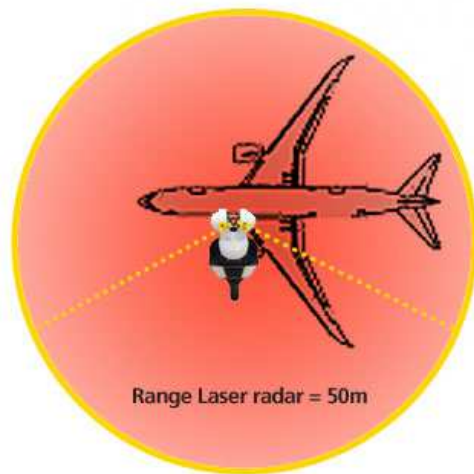
#### 7.1.4. Κατασκευή- Τοπογραφία - Δομική

Η αμελητέα απόκλιση της ακτίνας του λέιζερ έδωσε το <sup>2</sup> έναυσμα για μια σειρά από ιδέες για να παρέχει μέχρι σήμερα μια ιδιαίτερη ακρίβεια και ευαισθησία στην ευθυγράμμιση των εργαλείων. Χρησιμοποιεί ως ένας οπτικός άξονας και η ακτίνα καθοδηγεί τις μηχανές που χρησιμοποιούνται για την ισοπέδωση του σκυροδέματος επένδυση αεροδρομίων, ελέγχοντας την καθετότητα του πλαισίου των ψηλών κτιρίων, τη βύθιση μεταλλείων, και την κοπή σηράγγων από τα δύο άκρα και την κατασκευή τους χωρίς να υπάρχει κλίση.

Στη Μόσχα για παράδειγμα, μια συσκευή κεντραρίσματος λέιζερ χρησιμοποιείται για να ελέγχει τον κατακόρυφο άξονα κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενός πύργου τηλεόρασης με ακρίβεια 6 χιλιοστών . Στις ΗΠΑ, ένα μηχάνημα έκοψε ένα τούνελ 6,5 m σε διάμετρο και 2 χιλιομέτρων σε μήκος, χωρίς να αποκλίνει από την προγραμματιζόμενη πορεία πάνω από 1,58 cm σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αυτό το κατόρθωμα επιτεύχθηκε με την βοήθεια της ακτίνας λέιζερ.



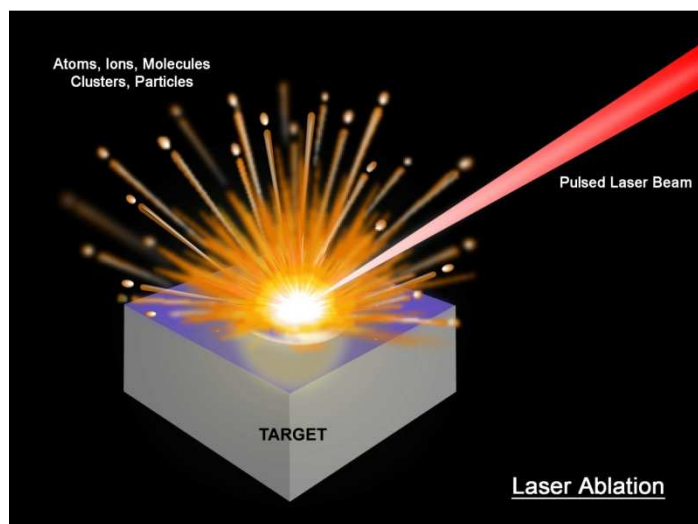
**Εικόνα 26:** Χρήση του laser στην τοπογραφία



Εικόνα 27: χρήση του laser στα radar

#### 7.1.5.Χημεία

Φασματοσκοπία - Φωτοχημικές αντιδράσεις



Εικόνα 28: χρήση του laser στην χημεία



### 7.1.6. Ιατρική

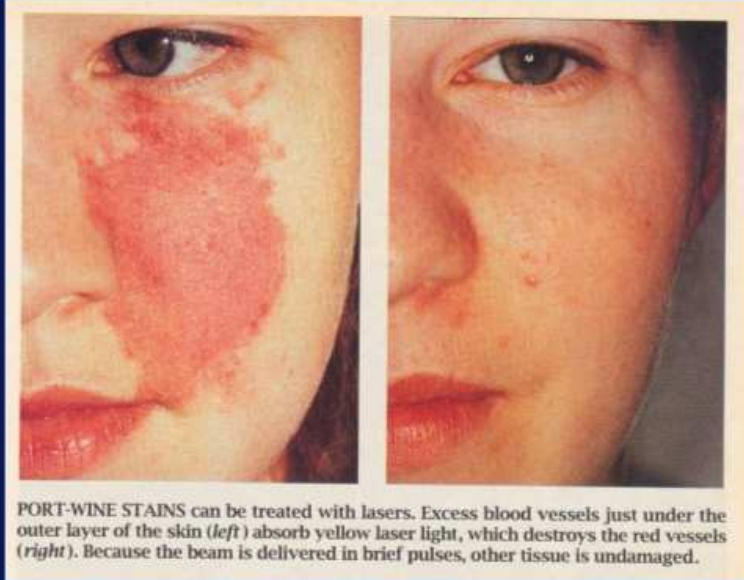
Τα λέιζερ χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική και στις χειρουργικές επεμβάσεις. Γίνεται χρήση στις χειρουργικές επεμβάσεις ματιών, όπου το λέιζερ χρησιμοποιείται για την συγκόλληση ή την αποκόλληση αμφιβληστροειδούς. Η ακτίνα λέιζερ εύκολα περνά μέσα από τα διαφανή τμήματα του οφθαλμού, συμπεριλαμβανομένου του κερατοειδούς και του φακού στην περιοχή του ματιού, όπου η ενέργεια του απορροφάται για θεραπεία.

Πριν από την εφεύρεση του λέιζερ, αυτή η λεπτή λειτουργία γινόταν με ακτινοβολία του ματιού με χρήση λάμπας xenon. Η διαδικασία αυτή ήταν περίπλοκη, επίπονη και σχετικά αργή, ενώ με την χρήση του λέιζερ η εγχείρηση είναι ανώδυνη και ελαφριά χωρίς να επηρεάζονται οι γύρω υγιείς ιστοί. Στον τομέα της ιατρικής το laser χρησιμοποιείται στα χειρουργικά εργαλεία, στην ενδοσκοπία και στην φωτοχημική θεραπεία



**Εικόνα 29:** χρήση του laser στην Οδοντιατρική

## Laser removal of port-wine stain



Yellow laser is absorbed by the presence of hemoglobin in blood vessels.

Εικόνα 30: χρήση του laser στο δέρμα

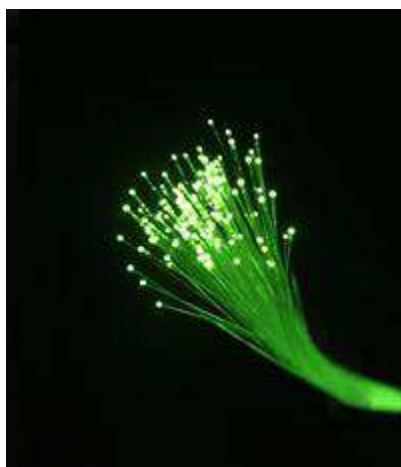


### 7.1.7. Επικοινωνίες- οπτικές ίνες

2

Στον τομέα της επικοινωνίας το laserχρησιμοποιείται κυρίως στις οπτικές ζεύξεις στις τηλεπικοινωνίες. Η επικοινωνία με τη χρήση φωτός ως φορέα σήματος και τις οπτικές ίνες ως μέσο μετάδοσης, ονομάζεται επικοινωνία οπτικών ινών. Από την πρώτη εμπορική εγκατάσταση ενός συστήματος οπτικών ινών, δηλαδή από το 1977, οι αιτήσεις των επικοινωνιών με οπτικές ίνες έχουν αυξηθεί πάρα πολύ. Σήμερα, κάθε μεγάλη εταιρεία τηλεπικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων ξοδεύει εκατομμύρια δολάρια για την δημιουργία επικοινωνιακών συστημάτων με την χρήση οπτικών ινών. Σε ένα σύστημα επικοινωνιών με οπτικές ίνες, η φωνή και τα δεδομένα μετατρέπονται σε ένα κωδικοποιημένο παλμό φωτός. Αυτό το ρεύμα σε μορφή φωτός μεταφέρεται από τις οπτικές ίνες σε ένα σταθμό. Στον τελικό σταθμό λήψης, οι παλμοί φωτός μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα και αποκωδικοποιούνται και στη συνέχεια μετατρέπονται στη μορφή των αρχικών πληροφοριών.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι οι τεράστιες χωρητικότητας πληροφορίες του μεταφέρουν. Υπάρχουν ήδη συστήματα που μπορούν να μεταφέρουν αρκετές χιλιάδες ταυτόχρονες συνομιλίες πάνω σε οπτικές ίνες οι οποίες είναι τόσο λεπτές όσο μια ανθρώπινη τρίχα. Εκτός από την εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα, τα καλώδια των οπτικών ινών είναι ελαφριά και πολύ φθηνά σε σύγκριση με τα καλώδια χαλκού. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε κυματοδηγούς επικοινωνίας κατασκευασμένους από διάφανα διηλεκτρικά των οποίων η λειτουργία είναι να κατευθύνουν το φως σε μεγάλες αποστάσεις. Μία οπτική ίνα αποτελείται από έναν εσωτερικό κύλινδρο από γυαλί που ονομάζεται πυρήνας, που περιβάλλεται από ένα κυλινδρικό κέλυφος από γυαλί με χαμηλό δείκτη διάθλασης, που ονομάζεται επένδυση. Οι οπτικές ίνες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το δείκτη διάθλασης του πυρήνα και εάν έχουν λειτουργία (ενιαία ίνα mode) ή πολλούς τρόπους λειτουργίας (ίνες multimode)



**Εικόνα 31:** χρήση laser σε οπτικές ίνες

#### **7.1.8. Στρατιωτική τεχνολογία**

Στον στρατιωτικό τομέα η χρήση του laser είναι σημαντική για σκοπεύσεις ακρίβειας. Για να καταρρίψει ένα άρμα μάχης τον εχθρό, είναι απαραίτητη η ακρίβεια στο στόχο. Λόγω της υψηλής έντασης και της πολύ χαμηλής απόκλισης ακόμα και μετά από στόχευση αρκετών χιλιομέτρων, το λέιζερ είναι ιδανικό για το σκοπό αυτό. Οι ανιχνευτές ακτίνας λέιζερ χρησιμοποιώντας νεοδυμίο και λέιζερ με διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιούν ένα πρότυπο στοιχείο για το πυροβολικό σύστημα στα άρματα μάχης. Αυτοί οι ανιχνευτές λέιζερ είναι ελαφριοί και έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και επιτυγχάνουν την μέγιστη ακρίβεια σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα οπλισμού.

Το τηλεμετρικό λέιζερ λειτουργεί βάσει της αρχής του ραντάρ. Κάνει χρήση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων της ακτίνας λέιζερ, δηλαδή, της μονοχρωματικότητας της υψηλής έντασης, της συνοχής και της κατευθυντικότητας. Το τηλεμετρικό λέιζερ είναι ανώτερο ακόμη και από το ραντάρ μικροκυμάτων και προσφέρει καλύτερη

ευθυγράμμιση και κατευθυντικότητα που καθιστά δυνατή την υψηλή γωνιακή ανάλυση.

2



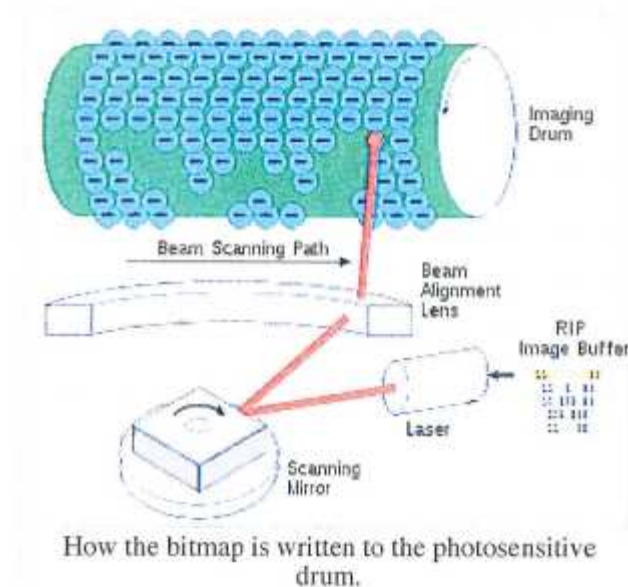
**Εικόνα 32:** χρήση laser στον στρατιωτικό τομέα

## **7.2. Χρήση του laser στην καθημερινή ζωή**

### **7.2.1 Εκτυπωτές laser**

Ένας εκτυπωτής λέιζερ είναι ένας κοινός τύπος εκτυπωτή υπολογιστή που παράγει αρκετά γρήγορα υψηλής ποιότητας κείμενο και γραφικά σε απλό χαρτί. Όπως και με τα ψηφιακά φωτοτυπικά, οι εκτυπωτές laser χρησιμοποιούν την «Ξηρογραφική» διαδικασία εκτύπωσης, αλλά διαφέρουν από τα αναλογικά φωτοτυπικά μηχανήματα στο γεγονός ότι η εικόνα παράγεται από την άμεση σάρωση μιας ακτίνας λέιζερ φωτοδέκτη του εκτυπωτή.

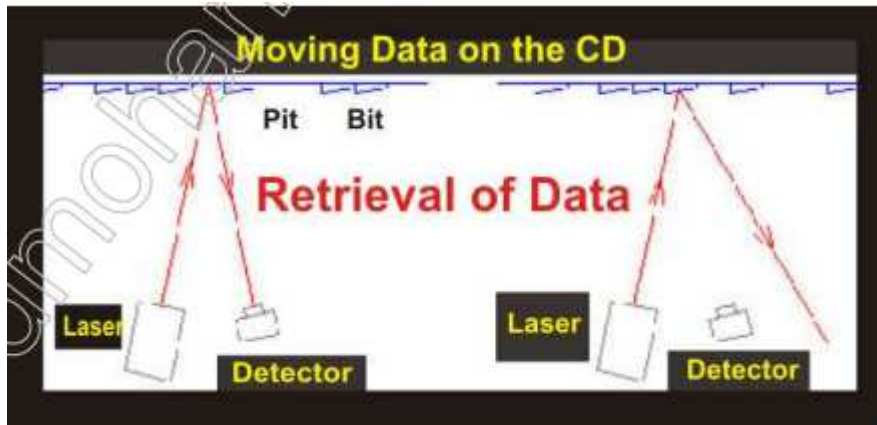
Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε πως το laser επιδρά στο τύμπανο και στην συνέχεια γίνεται η απεικόνιση της εικόνας



Εικόνα 33: τρόπος λειτουργίας του laser στους εκτυπωτές

### 7.2.2. CD (compactdisk)

Οι συσκευές αναπαραγωγής CD χρησιμοποιούν την τεχνολογία λέιζερ για να διαβάσουν τα οπτικά δεδομένα που καταγράφονται με τη μορφή των bits και Pits σε ένα CD. Ένα CD διαβάζεται με την εστίαση σε μήκος κύματος 780 nm ημιαγωγών λέιζερ μέσα από τον πυθμένα του πολυανθρακικού στρώματος.



Εικόνα 34: Εγγραφή και ανάκτηση δεδομένων σε ένα CD

Πηγή: <https://dmohankumar.files.wordpress.com/2011/05/compact-disc-technology.pdf>

### 7.2.3. Laser σαρωτές για barcodes

Οι σαρωτές λέιζερ λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως και οι αναγνώστες τύπου πένας εκτός του ότι χρησιμοποιούν μια ακτίνα λέιζερ ως πηγή φωτός και συνήθως χρησιμοποιούν είτε έναν παλινδρομικό καθρέφτη ή περιστρεφόμενο πρίσμα για να ανιχνεύσουν την ακτίνα λέιζερ γύρω από την επιφάνεια του barcode. Μια φωτοδίοδος χρησιμοποιείται για να μετρήσει την ένταση του φωτός που ανακλάται πίσω από τον γραμμωτό κώδικα. Το φως που εκπέμπεται από τον αναγνώστη είναι συντονισμένο σε μια συγκεκριμένη συχνότητα .



**Εικόνα 35:** Laser σαρωτής barcode

Πηγή: [http://www.taltech.com/barcodesoftware/articles/how\\_barcode\\_reader\\_works](http://www.taltech.com/barcodesoftware/articles/how_barcode_reader_works)

#### **7.2.4. Ολογραφία**

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή της δέσμης λέιζερ είναι η παραγωγή των αληθινών τρισδιάστατων εικόνων στο χώρο χωρίς τη χρήση φακού. Το ρεκόρ αυτής της τρισδιάστατης εικόνας του αντικείμενου σε μια ταινία ονομάζεται ολόγραμμα. Το φαινόμενο αυτό παράγεται λόγω της αλληλεπίδρασης των δύο δεσμών μονοχρωματικού κύματος φωτός, υπό ορισμένες συνθήκες. Το σχέδιο συμβολής παράγεται με ανάμιξη δύο δεσμών λέιζερ. Το φως του λέιζερ είναι χωρισμένο σε δύο δέσμες. Μία δέσμη ονομάζεται δέσμη αναφοράς και κατευθύνεται προς την φωτογραφική πλάκα. Η άλλη δέσμη κατευθύνεται προς το αντικείμενο που πρέπει να καταγραφεί και ανακλάται από το αντικείμενο.



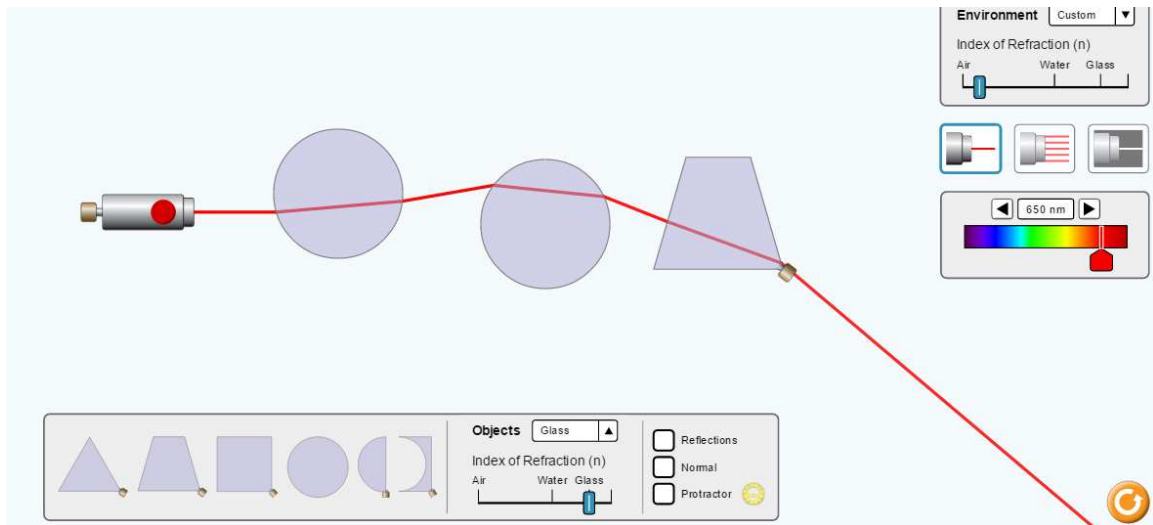
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### <sup>2</sup> APPLETS

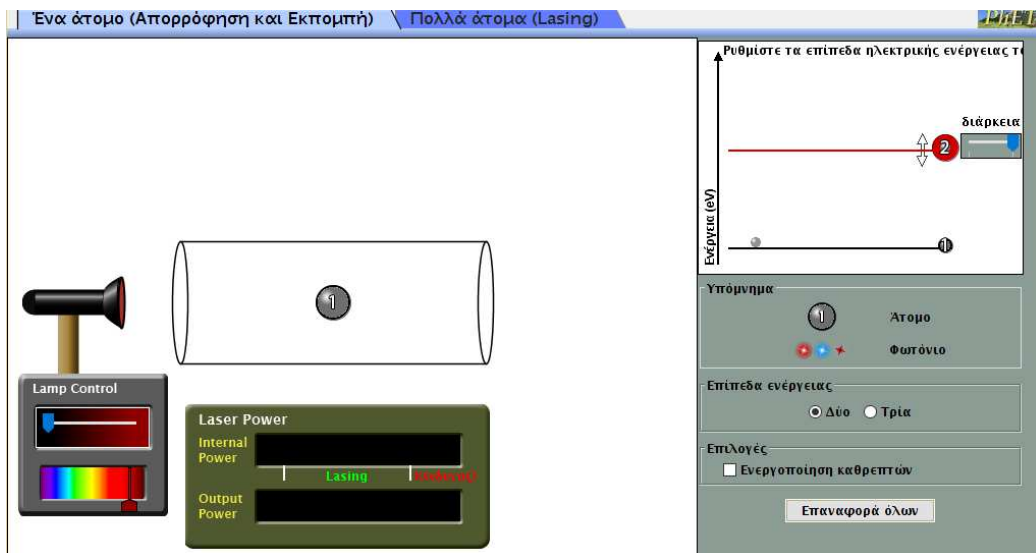
#### PHET

Η εταιρία PhETInteractive ιδρύθηκε το 2002 από τον νομπελίστα Carl Wieman, στο Πανεπιστήμιο του Κολοράντο Boulder και έχει δημιουργήσει δωρεάν διαδραστικά μαθηματικά και την επιστήμη προσομοίωσης. Οι PhET προσομοιώσεις βασίζονται σε εκτενή έρευνα και είναι κατάλληλες στην εκπαίδευση όπου ο μαθητής μπορεί μέσα από το περιβάλλον των εφαρμογών να κατανοήσει πολλά πράγματα στον τομέα της Φυσικής.

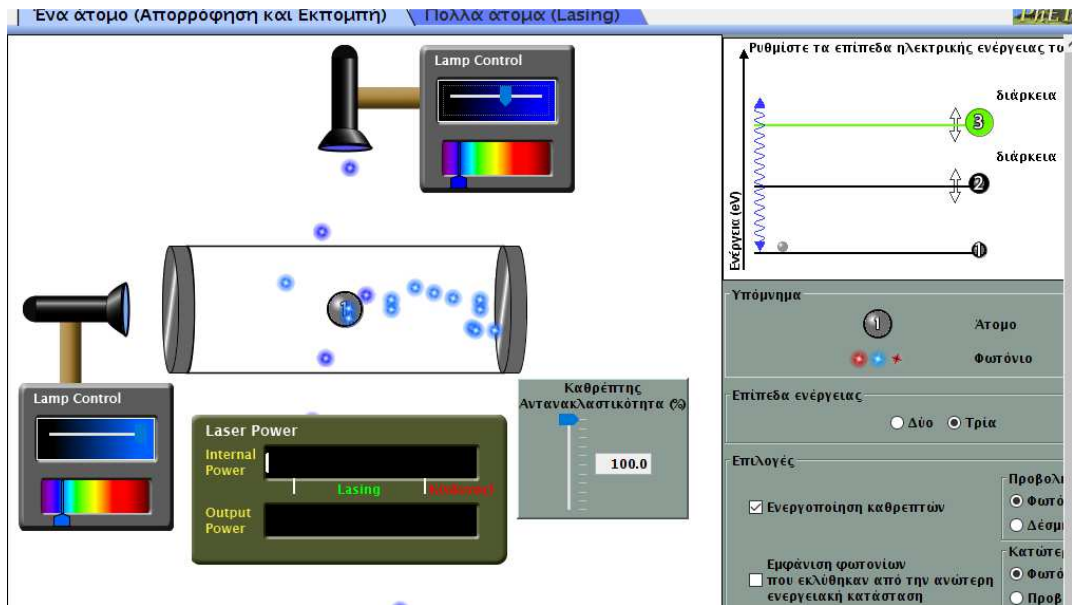
Για την κατανόηση της λειτουργίας του laser, για παράδειγμα σε ένα από τα πολλά applets που προσφέρει η PhET, ο χρήστης μπορεί να εξερευνήσει την διάθλαση του φωτός μεταξύ δύο μέσων με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Μπορεί να δει πώς η αλλαγή από τον αέρα στο νερό και το γυαλί αλλάζει την γωνία κάμψης.



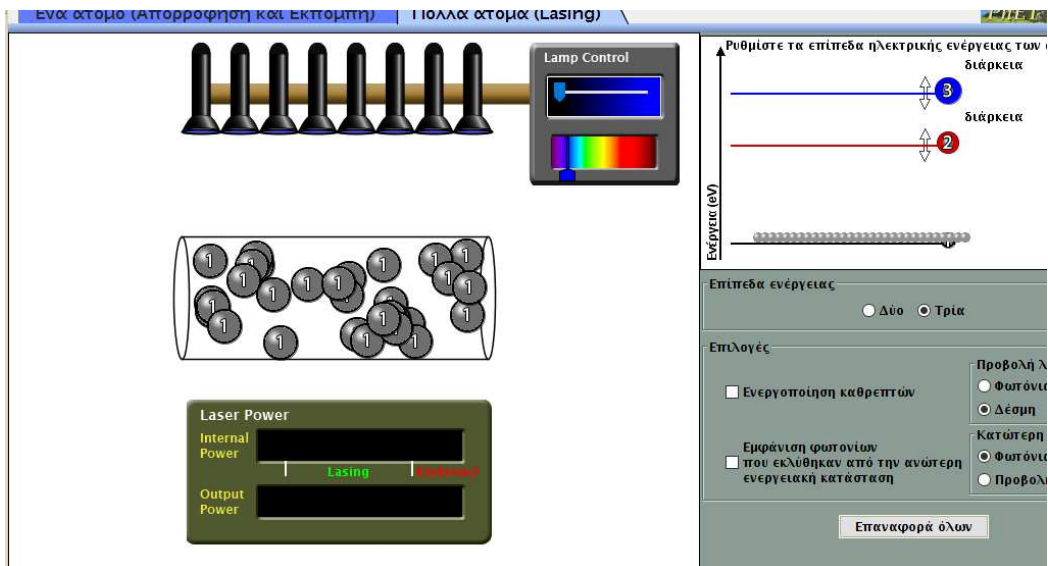
Σε μια άλλη εφαρμογή του PhET(εικόνα 36, εικόνα 37, 38) μπορούμε να ρυθμίσουμε την λάμπα laser και γι' αυτό υπάρχει το πάνελ ελέγχου της ενέργειας του laser. Στην εφαρμογή αυτή μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε δύο ή τρία επίπεδα ενέργειας. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα της ενεργοποίησης καθρεπτών.



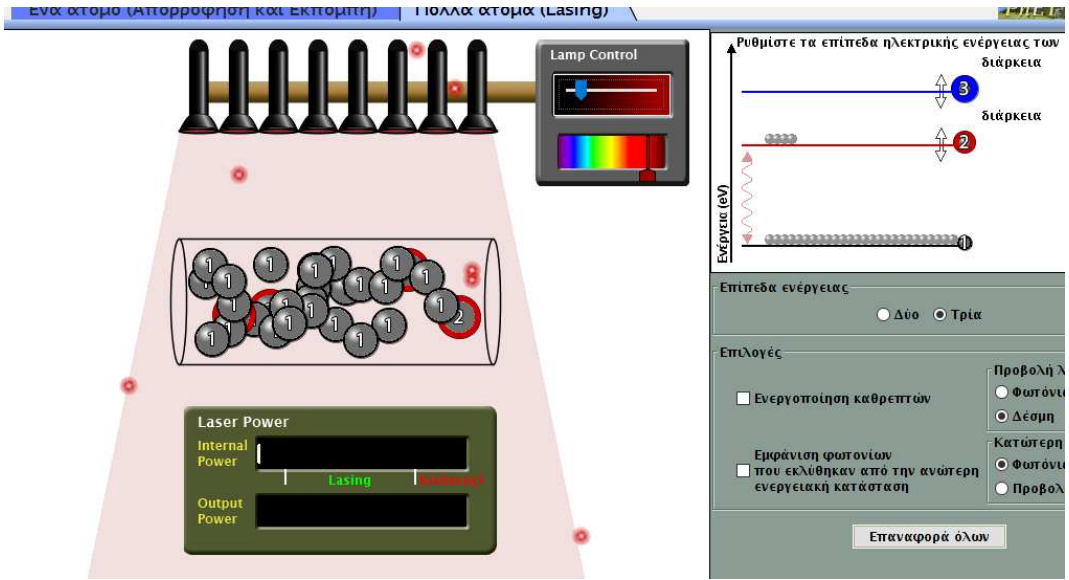
Εικόνα 36: Αρχική οθόνη εφαρμογής PhetLaser



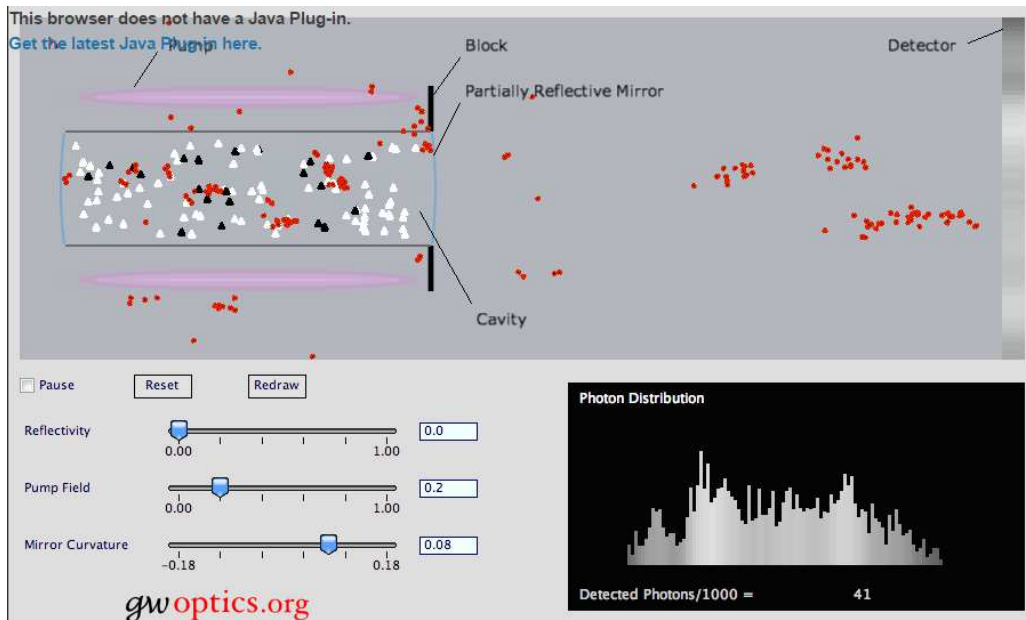
Εικόνα 37:Ενεργοποίηση τριών επιπέδων ενέργειας



Εικόνα 38:Πολλά άτομα lasing



## Gwoptics



Εικόνα 39

## RPResonator

Σε σύγκριση με άλλα λογισμικά σχεδιασμού το πρόγραμμα RP resonator είναι πολύ πιο ευέλικτο. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί δώσει οποιοσδήποτε παραμέτρους της ρύθμισης αντηχείου που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας κάποιες μαθηματικές εκφράσεις. Επίσης μπορεί ακόμη και να δημιουργήσει συνιστώσες του αντηχείου μέσα σε βρόχους με την αλλαγή μίας και μόνο παραμέτρου. Επίσης, μπορεί ακόμη και να τροποποιήσει τον αριθμό των στοιχείων. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα να επιλέξει την ακολουθία N κρυστάλλων με κάποια κενά αέρος και φακούς ή κάτοπτρα. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να βελτιστοποιήσει αυτόματα τις παραμέτρους του αντηχείου.

These forms allow one to construct code snippets for the scripts based on simple form inputs.

Complete resonators | Single optical elements | Graphs

With these forms, you can define resonators with some simple types.  
You can later edit the script code to obtain modified resonator types.

General resonator: **Bow-tie ring resonator**

Arm length a:  Angle alpha:

Crystal length:  Ref. index:

Dioptric power of crystal:

Mirror radii: R1:  R2:

Arm length b:

Crystal length:  Ref. index:

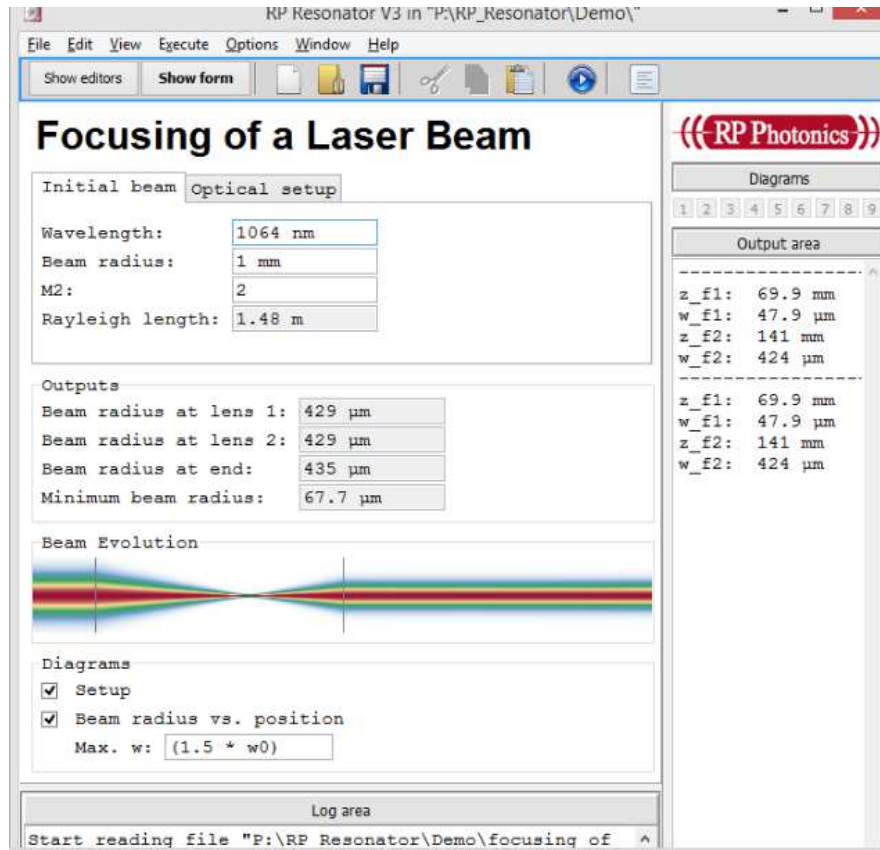
Dioptric power of crystal:

Mirror radii: R3:  R4:

Here, you can generate the definition of a resonator with a bow-tie geometry.  
If you do not require the crystals, for example, simply leave the corresponding fields empty.

```
resonator: ring
* mirror (M1): R = R1
* air: d = (a - (L_cr1)) / 2
* prism (Crystal1): l = L_cr1, d = 2 mm, n = n1, theta = 0, alpha = 0
* air: d = (a - (L_cr1)) / 2
* mirror (M2): R = R2, theta = alpha
* air: d = 0.5 * (a + b) * tan(alpha)
```

Εικόνα 40: RP Resonator



Εικόνα 41: RP Resonator

## Συμπεράσματα

Στην παρούσα πραγματοποιήθηκε μελέτη της διαμόρφωσης φωτός και της διπλοθλαστικότητας υλικών με χρήση του ηλεκτροοπτικού, του μαγνητοοπτικού και του ελαστοοπτικού φαινομένου. Μελετήθηκε επίσης η ικανότητα κάποιων σύνθετων υλικών (διπλοθλαστικοί κρύσταλλοι) να διαμορφώνουν το φως που διέρχεται από μέσα τους και ως προς την έντασή του, αλλά και ως προς την πόλωσή του. Επίσης, μελετήθηκε η κατάλληλη επιλογή κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται ως διαμορφωτές φωτός. Τέλος εξεταστάκην οι ιδιότητες φωτός Laser, οι εφαρμογές του Laser και τα πλεονεκτήματά του έναντι των άλλων κλασικών τεχνικών επεξεργασίας υλικών.

Το φωτοδιαθλαστικό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Arthur Ashkin και τους συνεργάτες του στα εργαστήρια Bell στα 1966. Στα φωτοδιαθλαστικά υλικά, το φως που προσπίπτει στο υλικό καθορίζει το πόσο γρήγορα διαδίδεται μέσα από αυτό. Πιο συγκεκριμένα το φωτοδιαθλαστικό φαινόμενο είναι μια διαδικασία κατά την οποία το φως μεταβάλλει τον δείκτη διάθλασης ενός υλικού.

Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου αλλάζει με την παρουσία του ήχου. Ο ήχος συνεπώς τροποποιεί την επίδραση που έχει το μέσο πάνω στο φως όταν αυτό προσπέσει πάνω του. Άρα, συμπεραίνουμε ότι ο ήχος μπορεί να ρυθμίσει το φως. Ο ήχος υπο την μορφή κύματος έχει μια χαρακτηριστική ταχύτητα που διαδίδεται στο μέσο. Ένα επίπεδο ηχητικό κύμα περιλαμβάνει διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα στο μέσο στο οποίο διαδίδεται. Στις περιοχές που το μέσο συμπιέζεται, η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη και ο δείκτης διάθλασης υψηλότερος.

Ορισμένα κρυσταλλικά υλικά, όπως είναι ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ) ή ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ), με κατάλληλα διαμορφωμένες εξωτερικές επιφάνειες εμφανίζουν το φαινόμενο της διπλοθλαστικότητας, κατά το οποίο ακτίνα που πέφτει σε μία εξωτερική επιφάνεια τους εισέρχεται στον κρύσταλλο διαχωρισμένη σε δύο ακτίνες κάθετα πολωμένες μεταξύ τους. Ο ολιβίνης είναι ένα άνυδρο πυριτικό ορυκτό του Fe και του Mg. Αποτελεί ισόμορφη μίξη μεταξύ του μαγνησιούχου ολιβίνης με την ονομασία φορστερίτης ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) και του σιδηρούχου ολιβίνης με την ονομασία φαυαλίτης.

Υπάρχουν υλικά (φυσικοί κρύσταλλοι ή άλλα) όπου η ταχύτητα διάδοσης του φωτός μέσα σε αυτά (και συνεπώς και ο δείκτης διάθλασης) εξαρτάται, εν γένει, από τη διεύθυνση διάδοσης και τον προσανατολισμό του επιπέδου της γραμμικής πόλωσης. Υπάρχει όμως μια διεύθυνση για την οποία η ταχύτητα διάδοσης είναι ανεξάρτητη του επιπέδου πόλωσης. Η διεύθυνση αυτή ονομάζεται οπτικός άξονας. Εισάγοντας ένα πλακίδιο καθυστέρησης φάσης  $90^\circ$  στην πορεία της δέσμης εξαλείφει τις διακυμάνσεις εγκοπής με τη μετατροπή της γραμμικής πόλωσης σε κυκλική πόλωση.

Το Kerrηλεκτρο-οπτικό αποτέλεσμα, ή αποτέλεσμα DC Kerr, είναι η ειδική περίπτωση στην οποία εφαρμόζεται ένα αργά μεταβαλλόμενο εξωτερικό ηλεκτροοπτικό πεδίο, για παράδειγμα, μια τάση επί των ηλεκτροδίων κατά μήκος του υλικού του δείγματος. Στο πλαίσιο αυτής της επιρροής, το δείγμα αποκτά διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για το φως, άλλον σε κατεύθυνση πόλωσης παράλληλη και άλλον σε κατεύθυνση πόλωσης κάθετη προς το εφαρμοζόμενο πεδίο.



Η τεχνολογία λέιζερ έχει διεισδύει σήμερα με ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών σε πολλούς κλάδους της επιστήμης. Χρησιμοποιείται στην Κατεργασία υλικών στους Βιομηχανικούς αυτοματισμούς, στην Κατασκευή, στην τοπογραφία και στη Δομική, στην Ιατρική αλλά και στις επικοινωνίες.

Για την κατανόηση του φαινομένου της διπλοθλαστικότητας και της λειτουργίας της ακτίνας laser, έχουν δημιουργηθεί αρκετές εφαρμογές. Μερικές από αυτές παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία. Γίνεται κατανοητό πως αυτές οι εφαρμογές αποτελούν πολύτιμα εργαλεία για κάποιον που θέλει να πειραματιστεί σε εικονικό περιβάλλον.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

A. Ashltin, G. D Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballnum, H. J. Levinstein, and K. Massau: Appl. Phys. Lett. 9, 72 (1966) "Photorefractive Materials Effects and Devices, (Optical Society of America. 1991 Technical Dig. Series, Postconference Edition July 29-31. Beverly, MA)

P. Yeh: IEEE J. Quantum Electron. 25, 484 (1989)

F. S. Chen: Appl Phys. Let. 13, 233 (1968)

M. Peltier and F. Micheron: J. Appl Ph, 48, 3683 (1977)

J. J. Amodei: RCA Review 32, 185 (1971)

N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin and L. Vinetskii: Ferroelectrics  
22, 949 (1989)

J. F. Nye: "Physical Properties of Crystals" (Clarendon Press, Oxford 1957)

N. V. Kulduarev. V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin and L. Vinetsldi: Ferroelcctrks  
22, 961 (1979)

J. P. Huignard, and F. Micheron: Appl Phys. Let 29, 591 (1996)

J. P. Huipard, A. Marrakci: Opt. Lett. 6, 622 (1981)

S. L Stepanov and M. P. Pertov: Opt. Commun. 56, 292 (1985)

J. Kumar, G. Albanese, and W. H. Steier: J. Opt. Soc. Amer. B 4, 1079 (1987)

X. Gan, S. Ye, and Y. Sun: Opt. Commun. 66, 155 (1998)

G. Pauliat, C. Besson, and Gerald Roosen: IEEE J. Quantum. Electron. 25, 1736 (1989)

Subhash Chandra Singh, Haibo Zeng, Chunlei Guo, and Weiping Cai (2012) Lasers: Fundamentals, Types, and Operations

Mihail Pivtoraiko Andrei Rozhkov Applied Optics Winter ( 2003) A Survey of Laser Types [http://web.pdx.edu/~larosaa/Applied\\_Optics\\_464564/Projects\\_Presented/Mikhail\\_Types\\_of\\_Lasers.pdf](http://web.pdx.edu/~larosaa/Applied_Optics_464564/Projects_Presented/Mikhail_Types_of_Lasers.pdf). Προσπελάστηκε στις 10-06-2016

Photonics Arthur Guenther Leno S. Pedrotti Chandrasekhar Roychoudhuri 2010, Lasers Fundamentals of , University of Central Florida Orlando, Florida

Rao M.C. Andhra Loyola (2013), A Brief Introduction to Lasers and Applications: Scientific Approach Department of Physics, College, Vijayawada, INDIA, Research Journal of Material Sciences 1(2), 20-24, March (2013)

S. Brown and Craig B. Arnold , Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification Matthew , university of Princeton, lectures notes

Wang , Yanyan Sun , Lu Han General laws of reflection and refraction for subwavelength phase grating Zhaona / University, Beijing Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, /, China 2012

Nolan petepr (2015 ) Chapter 31 The Law of Refraction“Charge Transfer Enhances two photon Absorption in Transition Metal Porphyrins” Jonathan L. Humphrey, Darius Kuciauskas, J.Am.Chem.Soc. Vol.128 No 12, 3903, (2006)

“Nonlinear Optical Properties of Ferrocene- and Porphyrin- [60] Fullerene Dyads”, Evangelia Xenogiannopoulou, Miroslav Medved, Kostas Iliopoulos, Stelios Couris, et al, Chem. Phys. Chem. Vol.8 p.1056-1064 (2006)

Α. Λοτσάρη, Μαγνητο-οπτικό φαινόμενο Kerr σε νανοδομημένα υμένια, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πάτρα (Φεβρουάριος **2005**).

H. - H. Perkampus, Encyclopedia of Spectroscopy, VCH , Weinheim (**1993**).

H.F. Ding, S. Putter, H.P. Oepen, J. Kirschner, J. Magn. Mat. 212, L5 (**2000**).

## **ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ**

[http://www.gwoptics.org/processing/stimulated\\_emission/stimulated\\_emission.php](http://www.gwoptics.org/processing/stimulated_emission/stimulated_emission.php)

[http://www.taltech.com/barcodesoftware/articles/how\\_barcode\\_reader\\_works](http://www.taltech.com/barcodesoftware/articles/how_barcode_reader_works)

<https://dmohankumar.files.wordpress.com/2011/05/compact-disc-technology.pdf>