

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



**Διπλωματική Εργασία**  
**‘ΟΠΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΟ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ**  
**ΣΕ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ**  
**ΦΙΛΤΡΟ ΣΥΜΒΟΛΗΣ’**

Ευαγγελάτου Δέσποινα

Εξεταστική Επιτροπή : Μπάλας Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)  
Χατζάκης Ιωάννης  
Ζερβάκης Μιχάλης

Χανιά, Φεβρουάριος 2004

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα τελευταία χρόνια η φασματοσκοπία έχει προσελκύσει ιδιαίτερα το ενδιαφέρον λόγω των ποικίλων εφαρμογών της σε διάφορους τομείς, όπως η ιατρική, η βιομηχανία, η αναλυτική χημεία, η βιοχημεία και το περιβάλλον.

Σ' αυτή τη διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε ένα οπτικό φασματόμετρο με γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης είναι ότι το όργανο που κατασκευάστηκε έχει την δυνατότητα να αναλύει φάσμα στο ορατό και το κοντινό υπέρυθρο (400-1000nm).

Το σύστημα που υλοποιήθηκε στηρίζεται κυρίως στη χρήση ενός γραμμικού CCD (Charge Coupled Device) ως φωτοανιχνευτή και ενός γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρου συμβολής (Variable Interference Filter), το οποίο έχει την δυνατότητα της ανίχνευσης μεγάλου εύρους ζώνης.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Μπάλα για την επίβλεψη του και την συμπαράστασή του σ' αυτή την εργασία, καθώς και τους μεταπτυχιακούς και προπτυχιακούς συναδέλφους για τις συμβουλές και την βοήθειά τους.

Ιδιαίτερα δε θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή εφαρμογών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης και διδάσκοντα Π.Δ.407/80 του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ιωάννη Χατζάκη, για την αμέριστη βοήθεια και συμβολή του στην διπλωματική αυτή.

## **Περιεχόμενα:**

### **Συντομεύσεις**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>:**

### **1.1 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας ύλης— Φασματοσκοπία**

#### **1.1.1 Απορρόφηση - Εκπομπή**

##### **1.1.1.1 Είδη απορρόφησης**

1.1.1.1.1 Είδη απορρόφησης που περιέχουν  $\pi$ ,  $\sigma$  και  $n$  ηλεκτρόνια (absorbing species containing  $\pi$ ,  $\sigma$  and  $n$  electrons)

1.1.1.1.2 Είδη απορρόφησης που περιέχουν  $d$  και  $f$  ηλεκτρόνια (absorbing species containing  $d$  and  $f$  electrons)

1.1.1.1.3 Απορρόφηση φορτίου (charge-transfer absorption)

#### **1.1.2 Φθορισμός – Φωσφορισμός**

#### **1.1.3 Σκέδαση**

##### **1.1.3.1 Σκέδαση Rayleigh**

##### **1.1.3.2 Σκέδαση Mie**

##### **1.1.3.3 Σκέδαση Stokes και anti-Stokes**

##### **1.1.3.4 Σκέδαση Brillouin**

##### **1.1.3.5 Σκέδαση Raman**

### **1.2 Ενδεικτικές εφαρμογές φασματοσκοπίας**

- 1.3 Είδη Φασματοσκοπίας — Φασματοσκοπικές διατάξεις
- 1.4 Σύγχρονη Τεχνολογία Φασματοσκοπίας
  - 1.4.1 Μεταβλητές σχεδιασμού οργάνων
  - 1.4.2 Όργανα μονής ακτίνας
  - 1.4.3 Όργανα διπλής ακτίνας
  - 1.4.4 Σύγκριση οργάνων μονής ακτίνας με όργανα διπλής
  - 1.4.5 Φασματόμετρα
    - 1.4.5.1 Όργανα στην περιοχή του ορατού
    - 1.4.5.2 Μονής ακτίνας όργανα για την περιοχή του υπεριώδους-ορατού
    - 1.4.5.3 Μονής ακτίνας αυτοματοποιημένα φασματόμετρα
    - 1.4.5.4 Διπλής ακτίνας όργανα για την περιοχή του υπεριώδους-ορατού
    - 1.4.5.5 Όργανα διπλής διασκόρπισης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>:**

- 2.1 Σχεδίαση νέου Φασματόμετρου με ευαίσθητο στην περιοχή 400-1000 nm
- 1.2 Ανάλυση των χαρακτηριστικών των υπομονάδων
  - 2.2.1 CCD arrays
    - 2.2.1.1 Παράμετροι καθορισμού λειτουργίας του CCD
    - 2.2.1.2 Αρχιτεκτονικές Λειτουργίας του CCD

### 2.2.1.3 Μέθοδοι ανάγνωσης του CCD

### 2.2.1.4 CCD153A – 153-element high speed linear image sensor (Fairchild Imaging)

## 2.2.2 Οπτικές ίνες

### 2.2.2.1 Φαινόμενα ολικής ανάκλασης στην οπτική ίνα

### 2.2.2.2 Διάδοση διαφορετικών τρόπων (modes)

### 2.2.2.3 Γωνία υποδοχής (acceptance angle) και αριθμητικό άνοιγμα (numerical aperture)

### 2.2.2.4 Γενικά χαρακτηριστικά και απώλειες

### 2.2.2.4 Είδη οπτικών ινών

### 2.2.2.5 Διακλαδούμενη οπτική ίνα

## 2.2.3 Fiber Bundle (Taper)

## 2.2.4 Κατευθυνόμενο ή ολογραφικό πλέγμα περίθλασης

### 2.2.4.1 Βασικές εξισώσεις

### 2.2.4.2 Γωνιακή διασπορά

### 2.2.4.3 Γραμμική διασπορά

### 2.2.4.4 Μήκος κύματος και διάταξη

### 2.2.4.5 Διαχωριστική ικανότητα

### 2.2.4.6 Blazed gratings

#### 2.2.4.6.1 Παράγοντας Littrow

#### 2.2.4.6.2 Σχεδιάγραμμα αποδοτικότητας

#### 2.2.4.6. Αποδοτικότητα

### 2.2.4.7 Πλέγμα περίθλασης παρασιτικής ακτινοβολίας

#### 2.2.4.7.1 Διάχυση φωτός

#### 2.2.4.8 Επιλογή grating

##### 2.2.4.8.1 Πότε επιλέγεται ολογραφικό grating

##### 2.2.4.8.2 Πότε επιλέγεται ruled grating

#### 2.2.5 Γραμμικά Μεταβαλλόμενο Φίλτρο Συμβολής (Variable Interference Filter -V.I.F)

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

#### 3.1 Υλοποίηση οπτοηλεκτρονικού μέρους

#### 3.2 Υλοποίηση ηλεκτρονικού μέρους

#### 3.3 Υλοποίηση λογισμικού

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

#### 4.1 Μέτρηση φάσματος

#### 4.2 Τεχνική αξιολόγηση

##### 4.2.1 Επαναληψιμότητα

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**

#### 5.1 Συμπεράσματα

#### 5.2 Προοπτικές — Βελτιώσεις

## **Αναφορές-Βιβλιογραφία**

### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι :**

I.1 Κώδικας προγραμματισμού μικροελεγκτή

I.2 Κώδικας επικοινωνίας υπολογιστή-φασματομέτρου



## **ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ**

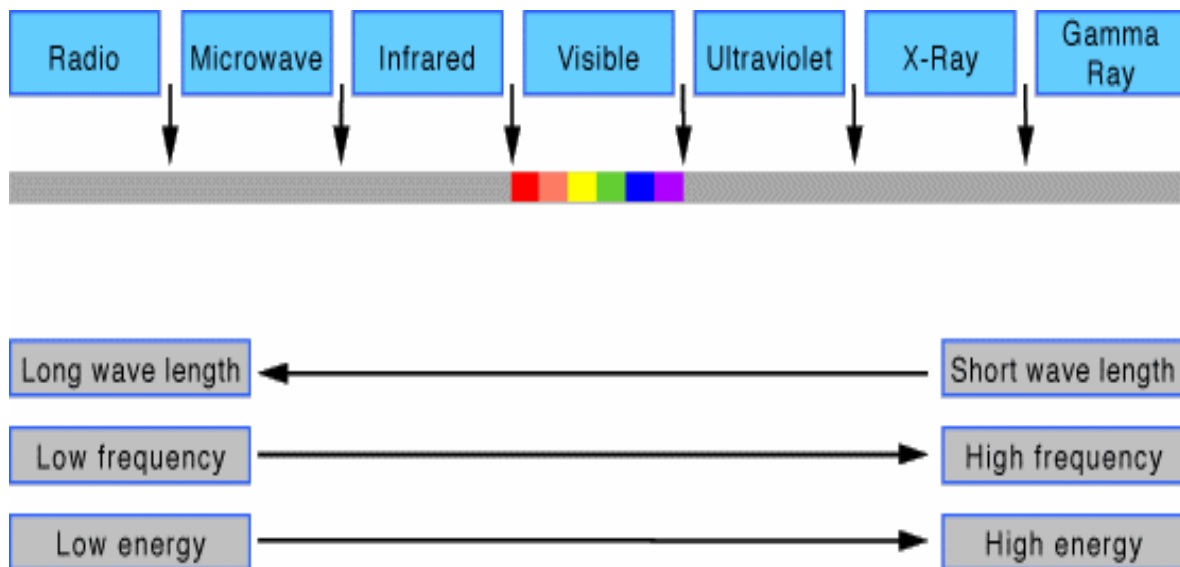
<b>CCD</b>	Charge Coupled Devices
<b>CCT</b>	Charge Transfer Efficiency
<b>CID</b>	Charge Injection Devices
<b>CMOS</b>	Complimentary Metal Oxide Semiconductor Image Sensor
<b>CCE</b>	Charge Collection Efficiency
<b>FPN</b>	Fixed Pattern Noise
<b>MPP</b>	Multi Pinned Phase
<b>MTF</b>	Modulation Transfer Function
<b>SNR</b>	Signal to Noise
<b>SOC</b>	Start of Conversion
<b>TDI</b>	Time Delay Integration
<b>QE</b>	Quantum Efficiency

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>:

### 1.1 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας ύλης— Φασματοσκοπία

Η οπτική ακτινοβολία είναι η περιοχή του ηλεκτρικού φάσματος μεταξύ των ακτίνων Χ και των μικροκυμάτων. Η διάδοση του φωτός, ως κυματικό φαινόμενο, χαρακτηρίζεται από ένα μήκος κύματος  $\lambda$  και μία συχνότητα  $\nu$  που συνδέονται με τη σχέση,

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{όπου } c \text{ είναι η ταχύτητα του φωτός } (3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}).$$



Για να μπορέσουμε να διαχωρίσουμε τα διάφορα μήκη κύματος που συνιστούν το φάσμα μιας φωτεινής δέσμης μπορούμε είτε να χρησιμοποιήσουμε ένα πρίσμα είτε ένα φράγμα περίθλασης. Αν η πηγή της δέσμης αυτής είναι θερμό στερεό (π.χ. το νήμα ενός λαμπτήρα φωτισμού) ή

υγρό, το φάσμα είναι συνεχές, δηλαδή αποτελείται από φως όλων των μηκών κύματος. Αν όμως σαν πηγή φωτός χρησιμοποιούμε μια λυχνία εκκένωσης αίγλης σε ένα αέριο (όπως στο σωλήνα μιας φωτεινής επιγραφής από λυχνία νέου) ή ένα πτητικό άλας που θερμαίνεται σε μια φλόγα (όπως όταν ρίξουμε άλας στη φωτιά), τότε εμφανίζονται ορισμένα μόνο χρώματα, που έχουν στο φάσμα τη μορφή μεμονωμένων λεπτών παράλληλων γραμμών. Σε αυτή τη περίπτωση το φάσμα ονομάζεται γραμμικό και η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος και συχνότητα.

Η φασματοσκοπία είναι πλέον ένα ευρέως διαδεδομένο εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες για το χαρακτηρισμό του φάσματος χημικών ουσιών. Η φυσική βάση της φασματοσκοπίας είναι η αλληλεπίδραση φωτός και ύλης πράγμα το οποίο εντοπίστηκε από τον Hertz κατά την διάρκεια ενός πειράματος ανακαλύπτοντας τυχαία το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Hertz το 1887 κατά τη διάρκεια πειραμάτων με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο Hertz παρατήρησε ότι ο σπινθήρας μπορεί να προκληθεί πιο εύκολα μεταξύ δύο ηλεκτρικά φορτισμένων σφαιρών αν αυτές φορτίζονταν από το φως ενός άλλου σπινθήρα. Το φως που φωτίζει τις επιφάνειες καθιστούσε πιο εύκολη την απελευθέρωση ηλεκτρονίων αφού απορροφούσαν την απαραίτητη ενέργεια που χρειάζονταν από την προσπίπτουσα ακτινοβολία κατορθώνοντας έτσι να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικού. Το 1883 ο Thomas Edison προσέφερε την απαραίτητη ενέργεια διαφυγής στα ηλεκτρόνια με θέρμανση του υλικού σε πολύ ψηλή θερμοκρασία (Θερμιονική εκπομπή). Η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να αποκτήσει ένα ηλεκτρόνιο για να μπορέσει να διαφύγει από μια επιφάνεια ονομάζεται φράγμα δυναμικού. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μελετήθηκε λεπτομερώς

από τους Wilhelm Hallwachs Phillip Lenard. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποίησαν δύο αγώγιμα υλικά, την άνοδο και την κάθοδο, τα οποία περικλείονται σε ένα γυάλινο σωλήνα υψηλού κενού με μια μπαταρία να προσφέρει την απαραίτητη διαφορά δυναμικού. Παρατήρησαν ότι όταν στην κάθοδο προσπίπτει μονοχρωματικό φως του οποίου η συχνότητα δεν είναι μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή τότε δεν παρατηρείται καμιά εκπομπή ηλεκτρονίων. Η συχνότητα αυτή ονομάζεται συχνότητα κατωφλίου και η τιμή της εξαρτάται από το υλικό.

Ένα ακόμα φαινόμενο αλληλεπίδρασης φωτός και ύλης είναι και το φαινόμενο Compton. Ο Arthur Holly Compton καθώς και ο Peter Debye το 1923 ερμήνευσαν την σκέδαση των ακτινών X, δηλαδή φωτονίων και ηλεκτρονίων θεωρώντας ότι οι ακτίνες X είναι σωμάτια σημειακών διαστάσεων που έχουν ενέργεια  $hf$  και ορμή  $hf/c$ , και εφάρμοσαν τη διατήρηση της ορμής και της ενέργειας του συστήματος φωτόνιο-ηλεκτρόνιο κατά τη σκέδαση. Ο Compton είχε ήδη αποδείξει από το 1922 ότι η κλασσική φυσική δεν μπορούσε να ερμηνεύσει τη σκέδαση των ακτινών X από ηλεκτρόνια. Προσπίπτουσες ακτίνες X, συχνότητας  $f_0$ , πρέπει να επιταχύνουν ηλεκτρόνια εξαναγκάζοντας τα σε ταλάντωση, τότε αυτά θα εκπέμψουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας  $f < f_0$ . Σύμφωνα με την κλασσική φυσική, η συχνότητα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το χρόνο έκθεσης του δείγματος στην προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς και από την έντασης της, γεγονός που δεν αποδείχθηκε πειραματικά. Αντίθετα τα πειράματα του Compton έδειξαν ότι η μεταβολή του μήκους κύματος των σκεδαζόμενων κατά μια γωνία ακτινών, εξαρτάται μόνο από τη γωνία σκέδασης και μόνο από αυτήν.

Ο Compton μέτρησε την εξάρτηση της έντασης των σκεδαζόμενων ακτινών X από το μήκος κύματος για τρεις διαφορετικές γωνίες σκέδασης.

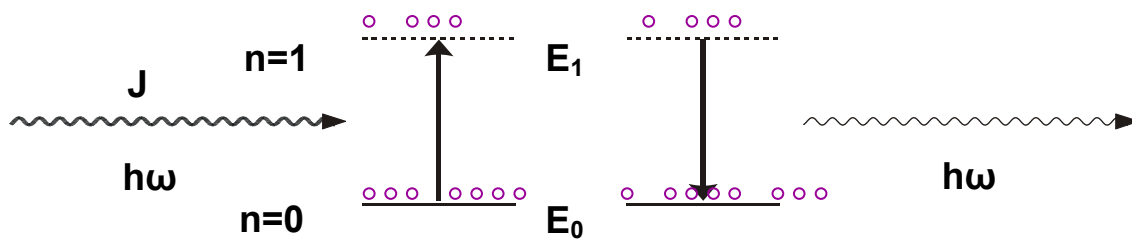
Το μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας το μέτρησε χρησιμοποιώντας ένα φασματογράφο περιστρεφόμενου κρυστάλλου. Για στόχο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε άνθρακας ενώ την ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας τη μέτρησε χρησιμοποιώντας ένα θάλαμο ιονισμού, του οποίου το ρεύμα ήταν ανάλογο προς την ένταση της ακτινοβολίας  $X$  που έπεφτε πάνω του. Η αρχική ακτινοβολία  $X$  ήταν μονοχρωματική με μήκος κύματος  $\lambda_0 = 0,071$  και παρατήρησε την ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε γωνίες πρόσπτωσης  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  και  $135^\circ$ . Ακόμη, παρατήρησε ότι κάθε καμπύλη είχε δυο κορυφές, εκ των οποίων η μία αντιστοιχεί σε μήκος κύματος  $\lambda_0$  της αρχικής ακτινοβολίας και οφείλεται στη σκέδαση των ακτινών  $X$  από ηλεκτρόνια που είναι ισχυρά δέσμια στα άτομα του στόχου. Η δεύτερη αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος  $\lambda'$  κάθε φορά και οφείλεται στη σκέδαση των ακτινών  $X$  από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του στόχου. Μελετώντας το πρόβλημα ο Compton κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η εξάρτηση της δεύτερης κορυφής από τη γωνία σκέδασης  $\theta$  περιγράφεται από τη σχέση  $\lambda' - \lambda_0 = h(1 - \cos\theta)/mc$ . Η ποσότητα  $h/mc$  λέγεται μήκος κύματος Compton. Τα πειραματικά αποτελέσματα του Compton έπεισαν τους επιστήμονες για τη θεμελιώδη ορθότητα της κβαντικής θεωρίας.

Υπάρχουν όμως και άλλα φαινόμενα αλληλεπίδρασης ύλης και φωτός στα οποία βασίζονται τα διάφορα είδη φασματοσκοπίας όπως : η εκπομπή, η απορρόφηση, ο φθορισμός, ο φωσφορισμός και η σκέδαση.

#### 1.1.1 Απορρόφηση - Εκπομπή:

Θεωρούμε ατομικό σύστημα αποτελούμενο από δύο ενεργειακές στάθμες  $E_0$  και  $E_1$  με  $E_0 < E_1$ , οι οποίες καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια.

Έστω ότι το άτομο βρίσκεται στην κατάσταση  $n=0$ , με ενέργεια  $E_0$ . Τα ηλεκτρόνια του ατόμου αυτού μπορούν να μεταβούν σε μία διεγερμένη κατάσταση  $n=1$  υψηλότερης ενέργειας  $E_1$ , αν αλληλεπιδράσει με αυτό θερμική ακτινοβολία πυκνότητας ενέργειας  $J$  (βλ. N. Planck) και συχνότητας  $\omega$  τέτοιας ώστε το γινόμενο  $h\omega$  να ισούται με τη διαφορά ενέργειας των δύο επιπέδων, δηλαδή  $h\omega=E_1-E_0$ . Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται απορρόφηση (absorption).

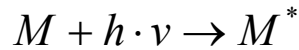


Η μετάπτωση από τη διεγερμένη κατάσταση  $n=1$  στην αρχική κατάσταση  $n=0$ , με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου με συχνότητα  $\omega$ , όπου  $h\omega=E_1-E_0$ , ονομάζεται εκπομπή (emission). Σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ο ρυθμός διέγερσης είναι ίσος με τον ρυθμό αποδιέγερσης.

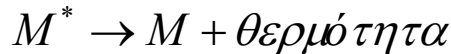
Η αποδιέγερση μπορεί να γίνει αυτόματα μετά από κάποιο χρόνο  $10^{-8}$  sec παραμονής στην διεγερμένη κατάσταση ή κάτω από την επίδραση ενός άλλου φωτονίου. Στην πρώτη περίπτωση η αποδιέγερση ονομάζεται αυθόρμητη (spontaneous), ενώ στην δεύτερη ονομάζεται εξαναγκασμένη (stimulated).

#### 1.1.1.1 Είδη απορρόφησης

Η απορρόφηση της υπεριώδους ή της ορατής ακτινοβολίας από ένα άτομο ή μοριακό είδος  $M$  περιλαμβάνει τη διέγερση όπως παρουσιάζεται από την εξίσωση :



Το προϊόν της αντίδρασης μεταξύ του  $M$  και του φωτονίου  $h\nu$  είναι ένα ηλεκτρονικά διεγερμένο σωματίδιο που συμβολίζεται με  $M^*$ . Η διάρκεια ύπαρξης του διεγερμένου σωματιδίου είναι σύντομη ( $10^{-8}$  έως  $10^{-9}$  sec), η ύπαρξη του οποίου ολοκληρώνεται από οποιαδήποτε από τις διαφορικές διαδικασίες χαλάρωσης. Ο πιο γνωστός τύπος χαλάρωσης περιλαμβάνει την μετατροπή της ενέργειας διέγερσης σε θερμότητα :



Η χαλάρωση μπορεί επίσης να προκύψει από την διάσπαση του  $M^*$  ώστε να σχηματιστούν νέα είδη. Η διαδικασία αυτού του τύπου καλείται φωτοχημική αντίδραση. Εναλλακτικά, η χαλάρωση μπορεί να περιλαμβάνει την επανεκπομπή φθορίζων ή φωσφορίζων ακτινοβολίας.

Η απορρόφηση της υπεριώδους ή της ορατής ακτινοβολίας γενικά προκύπτει από την διέγερση των bonding ηλεκτρονίων. Έτσι συμπεραίνουμε ότι τα μήκη κύματος των αιχμών απορρόφησης μπορούν να συσχετιστούν με τους τύπους των bonds που υπάρχουν στα υπό μελέτη είδη.

Η μοριακή φασματοσκοπία απορρόφησης είναι πολύτιμη για τον προσδιορισμό των λειτουργικών ομάδων σε ένα μόριο. Σημαντικότερες είναι οι εφαρμογές της υπεριώδους και της ορατής φασματοσκοπίας απορρόφησης. Γι' αυτό είναι σκόπιμο να αναγνωρίσουμε τρεις τύπους

ηλεκτρονικών μεταβάσεων και να ταξινομήσουμε τα είδη απορρόφησης με βάση τα παραπάνω στοιχεία :

- $\pi$ ,  $\sigma$  και  $n$  ηλεκτρόνια
- $d$  και  $f$  ηλεκτρόνια
- change-transfer ηλεκτρόνια

#### 1.1.1.2 Είδη απορρόφησης που περιέχουν $\pi$ , $\sigma$ και $n$ ηλεκτρόνια (absorbing species containing $\pi$ , $\sigma$ and $n$ electrons)

Τα είδη απορρόφησης που περιέχουν  $\pi$ ,  $\sigma$  και  $n$  ηλεκτρόνια, περιλαμβάνουν οργανικά μόρια και ιόντα καθώς επίσης και διάφορα ανόργανα ανιόντα. Όλες οι οργανικές ενώσεις είναι δεκτικές σε ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες επειδή όλες περιέχουν ηλεκτρόνια σθένους τα οποία μπορούν να διεγερθούν σε υψηλότερα επίπεδα ενέργειας. Οι περισσότερες φασματοσκοπικές έρευνες για τις οργανικές ενώσεις έχουν λάβει χώρα σε περιοχές μήκους κύματος μεγαλύτερο από 185nm. Η απορρόφηση ορατής και υπεριώδους ακτινοβολίας σε μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι απαγορευμένη από ένα περιορισμένο αριθμό λειτουργικών ομάδων (αποκαλούμενες ως chromophores) που περιέχουν ηλεκτρόνια σθένους με σχετικά χαμηλές ενέργειες διέγερσης. Τα ηλεκτρόνια που συμβάλλουν στην απορρόφηση από ένα οργανικό μόριο είναι:

- εκείνα που συμμετέχουν άμεσα στο σχηματισμό δεσμών μεταξύ των ατόμων και συνδέονται έτσι με περισσότερα από ένα άτομα
- τα nonbonding ή unshared εξωτερικά ηλεκτρόνια που είναι κατά ένα μεγάλο μέρος εντοπισμένα σε άτομα όπως το οξυγόνο, τα αλογόνα, το θείο και το άζωτο.



#### 1.1.1.3 Είδη απορρόφησης που περιέχουν d και f ηλεκτρόνια (absorbing species containing d and f electrons)

Τα περισσότερα transition-metal ιόντα απορροφούν στην υπεριώδη ή την ορατή περιοχή του φάσματος. Για τις σειρές λανθανιδίων (lanthanide) και ακτινιδίων (actinide), η διαδικασία απορρόφησης προκύπτει από τις ηλεκτρονικές μεταβάσεις των 4f και 5f ηλεκτρονίων. Για τα στοιχεία της πρώτης και δεύτερης transition-metal σειράς, τα 3d και 4d ηλεκτρόνια είναι αρμόδια για την απορρόφηση.

#### 1.1.1.4 Απορρόφηση φορτίου (change-transfer absorption)

Για λόγους ανάλυσης, τα είδη που εκθέτουν την απορρόφηση δαπάνης-μεταφοράς είναι ιδιαίτερα σημαντικά επειδή οι μοριακές απορροφητικότητες είναι μεγάλες ( $\epsilon_{\max} > 10000$ ). Κατά συνέπεια, αυτά τα συγκροτήματα περιέχουν ιδιαίτερα ευαίσθητα μέσα για αναζήτηση και προσδιορισμό απορροφητικών ειδών. Πολλά ανόργανα συγκροτήματα εκθέτουν την απορρόφηση δαπάνης-μεταφοράς (change-transfer absorption) και ονομάζονται συγκροτήματα δαπάνης-μεταφοράς (change-transfer complexes). Παραδείγματα τέτοιων συγκροτημάτων περιλαμβάνουν το θειοκυανικό άλας και ο-φαινολικά συγκροτήματα του σιδήρου, ο-phenanthroline σύνθετο του σιδήρου, το iodide σύνθετο του μοριακού ιωδίου και σύνθετο του αρμόδιου σιδηρικού ανιούχου άλατος για το χρώμα του Prussian blue.

### Φασματοσκοπία απορρόφησης (absorption spectroscopy) :

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τους κοινούς όρους και τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στη φασματοσκοπία απορρόφησης. Τα τελευταία χρόνια ,ιδιαιτέρη προσπάθεια έχει καταβληθεί από το American Society for Testing Materials (ASTM) και άλλες υπηρεσίες για να αναπτυχθεί μια τυποποιημένη ονοματολογία . Οι όροι και τα σύμβολα που παρουσιάζονται στις πρώτες δύο στήλες του πίνακα βασίζονται στις συστάσεις από το ASTM και την αναλυτική χημεία (Analytical Chemistry). Η τρίτη στήλη περιέχει τα εναλλακτικά σύμβολα που βλέπουμε στην παλαιότερη βιβλιογραφία [1].

Table 6-1 Important Terms and Symbols Employed in Absorption Measurement		
Term and Symbol <sup>a</sup>	Definition	Alternative Name and Symbol
Radiant power, $P$ , $P_0$	Energy of radiation (in ergs) impinging on a 1-cm <sup>2</sup> area of a detector per second	Radiation intensity, $I$ , $I_0$
Absorbance, $A$	$\log \frac{P_0}{P}$	Optical density, $D$ ; extinction, $E$
Transmittance, $T$	$\frac{P}{P_0}$	Transmission, $T$
Path length of radiation, in cm $b$	—	$l$ , $d$
Absorptivity, <sup>b</sup> $a$	$\frac{A}{bc}$	Extinction coefficient, $k$
Molar absorptivity, <sup>c</sup> $\epsilon$	$\frac{A}{bc}$	Molar extinction coefficient

#### 1.1.2 Φθορισμός – Φωσφορισμός

Όταν ένα εξωτερικό ηλεκτρόνιο διεγείρεται σε ένα υψηλότερο ενεργειακά επίπεδο, με απορρόφηση ακτινοβολίας, τότε αυτό μπορεί να επιστρέψει στην βασική στοιβάδα με ή χωρίς εκπομπή ακτινοβολίας.

Στην περίπτωση της εκπομπής έχουμε δύο διαφορετικές διεργασίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά: τον φθορισμό (fluorescence) και την φωσφορισμό (phosphorescence). Και τα δύο φαινόμενα ονομάζονται συνολικά φωταύγεια (luminescence). Ανάλογα με τον παράγοντα διέγερσης μπορούμε να έχουμε χημειο-φωταύγεια, βιο-φωταύγεια και θερμο-φωταύγεια. Η βασική διαφορά μεταξύ φθορισμού και φωσφορισμού είναι ο χρόνος που διαρκεί η ακτινοβολία μετά την διέγερση. Στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος αυτός είναι της τάξης των  $10^{-8}$  sec ενώ στην δεύτερη από  $10^{-5}$  sec έως 10 sec.

Η ερμηνεία των δυο φαινομένων δίνεται σχηματικά με το γνωστό ως διάγραμμα Jablonski, όπου με παράλληλες γραμμές συμβολίζονται η βασική και οι διάφορες διεγερμένες ενεργειακές στάθμες. Η κάθε στάθμη μπορεί να έχει διάφορες ενεργειακές υποστάθμες ταλάντωσης. Στην βασική στάθμη ( $S_0$ ) (τροχιά) τα ηλεκτρόνια ανά ζεύγος έχουν αντιπαράλληλα τα spin τους (αρχή Pauli). Με απορρόφηση φωτονίου και σε χρόνο  $10^{-15}$  sec ένα ηλεκτρόνιο του ζεύγους διεγερθεί σε μια διεγερμένη στάθμη ( $S_1$ ) τότε το spin του παραμένει αντιπαράλληλο με το spin του εναπομείναντος. Στην περίπτωση αυτή η στάθμη ( $s_1$ ) λέγεται μονήρης (singlet). Από τις διάφορες ταλαντωτικές υποστάθμες της το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταβεί μη ακτινοβολικά στην κατώτερη (2) σε χρόνο  $10^{-13}$  sec και από εκεί να αποδιεγερθεί στην  $S_1$  με εκπομπή ακτινοβολίας σε χρόνο  $10^{-8}$  sec. Η αποδιέγερση μεταξύ των επιπέδων αυτών συνιστά την εκπομπή φθορισμού (3). Είναι πολύ σημαντικό να ξέρουμε ότι τα φωτόνια φθορισμού έχουν

μικρότερη ενέργεια (μεγαλύτερο μήκος κύματος) από τα φωτόνια διέγερσης γιατί μετά τις μη ακτινοβολικές ταλαντωτικές αποδιεγέρσεις στην κατώτερη υποστάθμη της  $S_1$ , η προκύπτουσα ενεργειακή διαφορά αποδιέγερσης είναι μικρότερη αυτής της διέγερσης. Μεταβά-σεις μεταξύ ηλεκτρο-νικών επιπέδων μπο-ρούν να

συμβούν μη ακτινοβολικά και με μετατροπή της ενεργειακής διαφοράς σε θερμότητα (4,7)

(quenching (βήσιμο)).

Μία πιθανή και πολύ ενδιαφέρουσα μετά-

βαση είναι η (5) όπου χωρίς εκπομπή ακτι-

νοβολίας το

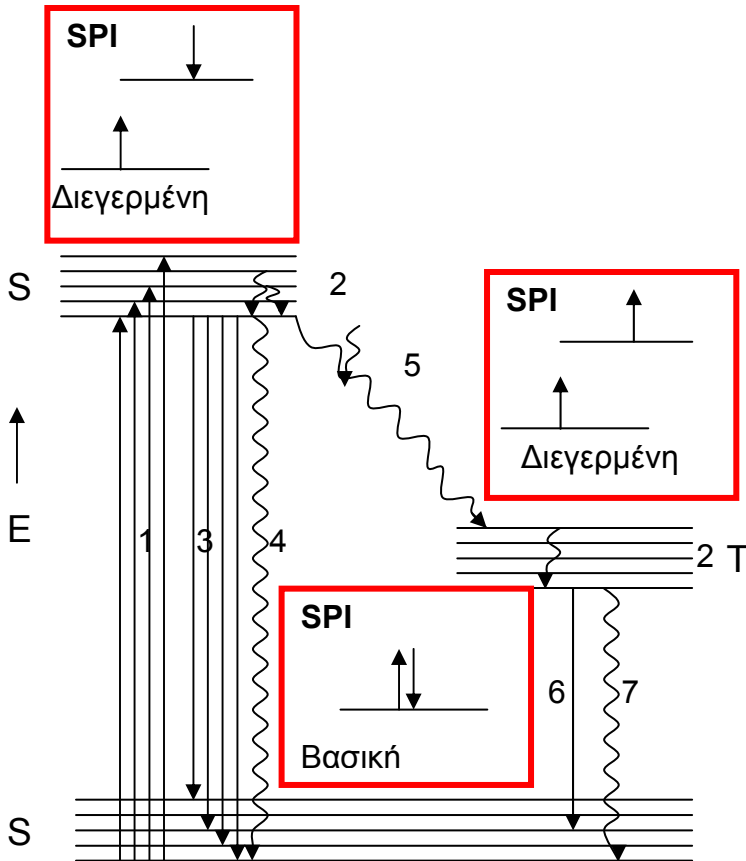
ηλεκτρόνιο

μεταπίπτει σε χρόνο  $10^{-8}$  sec σε μια διεγερμένη στάθμη ( $T_1$ ) αφού πρώτα το spin του αναστραφεί.

Η στάθμη αυτή λέγεται τριπλή (triplet). Επειδή τα spin των ηλεκτρονίων στην  $T_1$  και  $S_1$  είναι παράλληλα, τότε λόγω της αρχής Pauli, η μετάβαση του ηλεκτρονίου από την  $T_1$  στην  $S_1$  έχει πολύ μικρή πιθανότητα και για τον χρόνο αυτό παραμένει για πολύ χρόνο στην  $T_1$ .

Από αυτήν τα ηλεκτρόνια αποδιεγείρονται εντός μεγάλων χρόνων της τάξης των  $10^{-5}$  sec έως 10 sec.

Στην αποδιέγερση αυτή οφείλεται η ακτινοβολία **φωσφορισμού**. Μία μετάβαση από ένα ενεργειακό επίπεδο  $n$  σε ένα άλλο  $m$  είναι επιτρεπτή όταν δεν παραβιάζονται οι αρχές διατήρησης Ενέργειας, Ορμής, Στροφορμής,



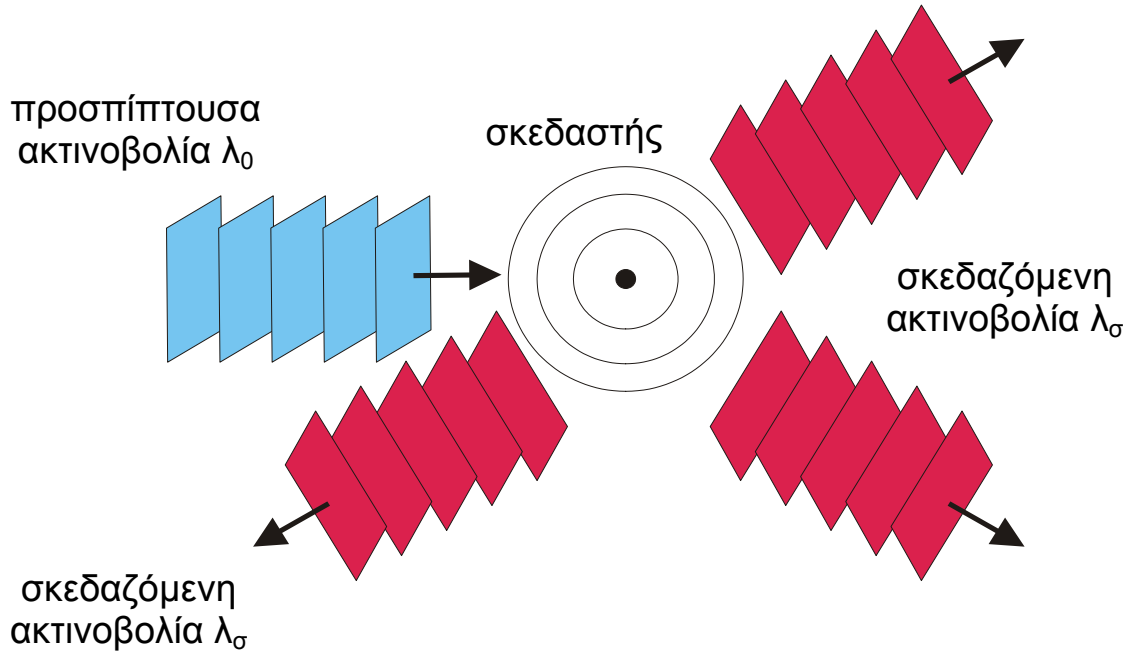
Spin και Ισοτιμίας (parity). Όταν μία μετάβαση είναι απαγορευμένη λόγω παραβίασης μίας από τις παραπάνω ποσότητες, η πιθανότητα μετάβασης τείνει προς το μηδέν, άρα ο χαρακτηριστικός χρόνος μετάβασης τείνει προς το άπειρο.

Οι μεταβάσεις ακτινοβολίας σε απαγορευμένες καταστάσεις, έχουν χαρακτηριστικούς χρόνους εκπομπής μεγάλους ( $\text{msec} < \tau < \text{hours}$ ). Σε τέτοιες μεταβάσεις της ακτινοβολίας οφείλεται το φαινόμενο του **φωσφορισμού (phosphorescence)**.

Μεταβάσεις ακτινοβολίας από τη διεγερμένη κατάσταση σε ενδιάμεσες ενεργειακές καταστάσεις από την αρχική συνδέονται με το φαινόμενο του **φθορισμού (fluorescence)**. Τέτοιες καταστάσεις έχουν συνήθως χαρακτηριστικούς χρόνους  $10^{-7}$  sec και το επανεκπεμπόμενο φωτόνιο έχει μικρότερη ενέργεια συγκριτικά με το φωτόνιο που προκάλεσε την διέγερση.

### 1.1.3 Σκέδαση

Η απορρόφηση ενέργειας από ένα σύστημα (σκεδαστής) από ένα προσπίπτον φωτόνιο και η επανεκπομπή μέρους της ενέργειας του παραπάνω φωτονίου από το ίδιο σύστημα ορίζεται σαν σκέδαση.



Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία μπορεί να έχει διαφορετικό μήκος κύματος  $\lambda_0$ , ένταση, φάση, διεύθυνση διάδοσης και πόλωση από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Το φαινόμενο της σκέδασης εξαρτάται από την φύση του σκεδαστή (υλικό, μέγεθος) και την διάταξη του στο χώρο (τυχαία ή κατανεμημένη).

#### 1.1.3.1 Σκέδαση Rayleigh

Η σκέδαση φωτός Rayleigh παρατηρείται για σκεδαστές με μέγεθος μικρότερο του μήκους κύματος  $\lambda_0$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η σκέδαση Rayleigh έχει ημιελαστική φύση, διότι το εκπεμπόμενο φωτόνιο μπορεί να έχει την ίδια ή μικρότερη ενέργεια σε σχέση με το προσπίπτον φωτόνιο. Η ένταση IR της Rayleigh-σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι

ανάλογη του αντιστρόφου τετραγώνου του μήκους κύματος  $\lambda_0$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.  $I_R \propto \frac{1}{\lambda_0^4}$

Κάποια παραδείγματα φαινομένων σχετιζόμενων με τη σκέδαση Rayleigh είναι:

- Κυανό χρώμα ουρανού, αλλαγή χρωματισμού ουρανού κατά τη δύση και ανατολή του ηλίου.
- Απώλειες ενέργειας κατά τη διάδοση ακτινοβολίας σε διάφανα στερεά (οπτικά στοιχεία, κρυστάλλους, οπτικές ίνες).

#### 1.1.3.2 Σκέδαση Mie

Η σκέδαση φωτός Mie παρατηρείται για σκεδαστές με μέγεθος ίσο ή μεγαλύτερο σε σχέση με το μήκος κύματος  $\lambda_0$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η σκέδαση φωτός Mie προσομοιώνεται με το κλασσικό μοντέλο ανάκλασης από αγωγίμες σφαίρες διαστάσεων συγκρίσιμου του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τα χαρακτηριστικά σκεδάσεως Mie συνοψίζονται στα παρακάτω:

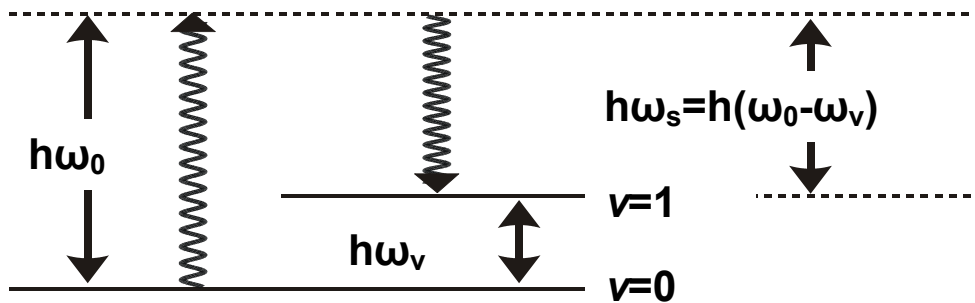
- Ισχυρή σκέδαση από σωματίδια με διαστάσεις μεγαλύτερες του  $\lambda_0$
- Ισχυρή εξάρτηση εντάσεως σκέδασης από τη γωνία παρατήρησης
- Το σκεδαζόμενο φως έχει χαρακτηριστική κατάσταση πόλωσης
- Η ένταση της σκέδασης  $I_M$  ισούται με την σκέδαση που προκύπτει από μοναδιαίο σκεδαστή επί το πλήθος των  $I_M = NI_{σκ}$  σκεδαστών

Τα παρακάτω είναι παραδείγματα φαινομένων σχετιζόμενων με τη σκέδαση Mie:

- Ιριδισμός κολλοειδών διαλυμάτων (απορρυπαντικά, καπνός, αεροζόλ)
- Σκέδαση από μεταλλικές επιφάνειες

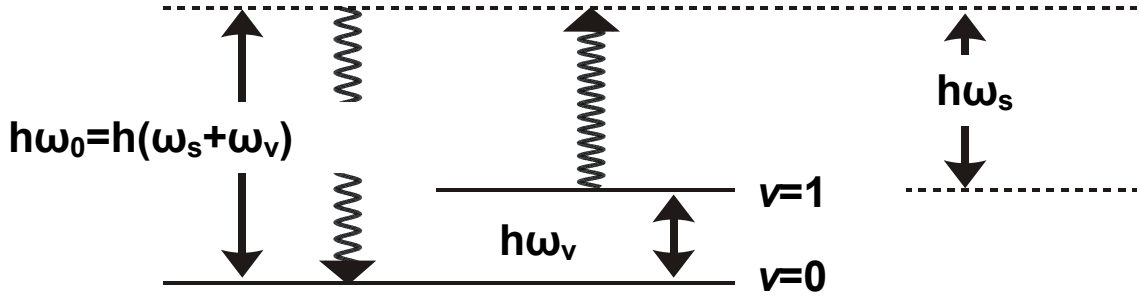
### 1.1.3.3 Σκέδαση Stokes και anti-Stokes

Η σκέδαση Stokes παρατηρείται κατά την απορρόφηση ενός φωτονίου  $\omega_0$  από ένα μόριο, και την ακόλουθη διέγερση του μορίου σε ένα δονητικό επίπεδο  $v=1$ , με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου  $\omega_s$ , όπου  $\omega_s = \omega_0 - \omega_v$



Η σκέδαση anti-Stokes αποτελεί το αντίστροφο φαινόμενο της σκέδασης Stokes όπου η αποδιέγερση ενός δονητικού επιπέδου ενός μορίου από μια κατάσταση  $v=1$ , σε μία άλλη χαμηλότερη  $v=0$ , με την ταυτόχρονη απορρόφηση ενός φωτονίου  $\omega_s$ , οδηγεί στην εκπομπή ενός φωτονίου  $\omega_0 = \omega_s + \omega_v$ .

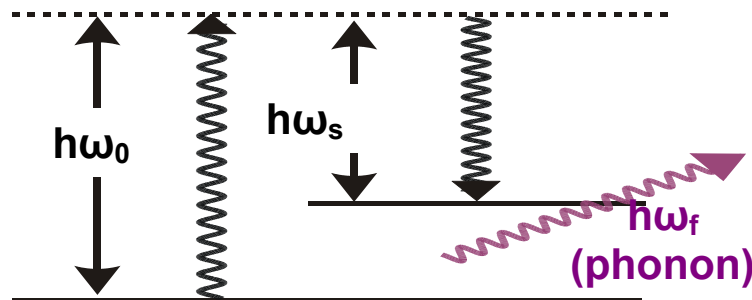




Η ένταση της σκέδασης anti-Stokes υπολείπεται αυτής της Stokes κατά ένα παράγοντα  $e^{-h\omega_v/KT}$

#### 1.1.3.4 Σκέδαση Brillouin

Η σκέδαση Brillouin παρατηρείται κατά την διάδοση ενός φωτονίου  $\omega_0$  σε κρυσταλλικά μέσα, όπου το αρχικό φωτόνιο απορροφάται από το κρυσταλλικό πλέγμα και επανεκπέμπεται σαν συνδυασμός ενός φωτονίου χαμηλότερης συχνότητας  $\omega_s$  και ενός φωνονίου (phonon)  $\omega_f$ , όπου  $\omega_0 = \omega_s + \omega_f$



Η σκέδαση Brillouin λαμβάνει χώρα κατά την χρήση υψηλών εντάσεων ακτινοβολίας ( $\approx 10^7$  W/cm<sup>2</sup>), και μόνον όταν η ένταση της διαδιδόμενης

ακτινοβολίας υπερβεί ορισμένο κατώφλι (threshold), το οποίο είναι χαρακτηριστικό για κάθε κρύσταλλο. Το σκεδαζόμενο φωτόνιο όπως επίσης και το παραγόμενο φωνόνιο, παρατηρούνται σε αυστηρά διακριτές γωνίες μεταξύ τους, όπως αυτές καθορίζονται από την αρχή διατήρησης της ορμής,

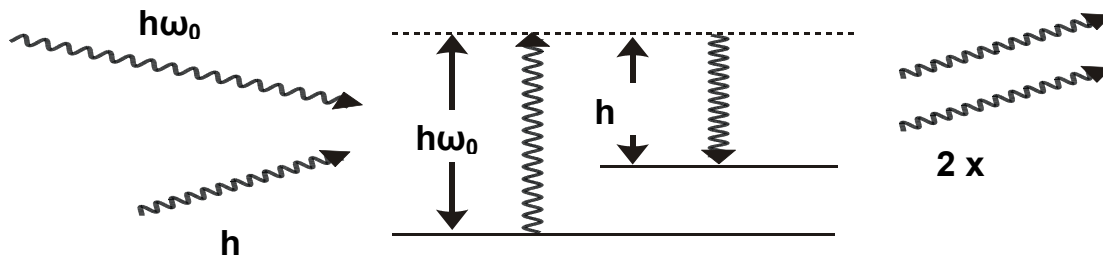
$$\vec{k}_0 = \vec{k}_s + \vec{k}_f$$

όπου

Η κατά διεύθυνση σκέδαση του φωτονίου  $k_s$  οφείλεται στην συμβολή του με το φωνόνιο  $k_f$ .

#### 1.1.3.5 Σκέδαση Raman

Η σκέδαση Raman παρατηρείται κατά την ταυτόχρονη διέλευση δύο φωτονίων συχνοτήτων  $\omega_0$  και  $\omega_s$  ( $\omega_s < \omega_0$ ) από το οπτικό μέσο, όπου το φωτόνιο  $\omega_0$  απορροφάται και ένα μέρος του επανεκπέμπεται με την συχνότητα  $\omega_s$ , του αρχικού συνοδεύοντος φωτονίου. Η ενέργεια  $h(\omega_0 - \omega_s)$  εκπέμπεται ως φωνόνιο. Η σκέδαση Raman ουσιαστικά αποτελεί διεργασία ενίσχυσης (amplification) του πληθυσμού φωτονίων  $\omega_s$ , μέσω των φωτονίων  $\omega_0$ .



Η σκέδαση Raman παρατηρείται σε στερεά, υγρά και αέρια μέσα διάδοσης.

Όπως και στη σκέδαση Brillouin, η σκέδαση Raman λαμβάνει χώρα κατά την χρήση υψηλών εντάσεων ακτινοβολίας ( $\approx 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>). Τα προσπίπτοντα και σκεδαζόμενα φωτόνια βρίσκονται σε συμφωνία φάσης.

## **1.2 Ενδεικτικές εφαρμογές φασματοσκοπίας**

Τα τελευταία χρόνια η φασματοσκοπία έχει προσελκύσει ιδιαίτερα το ενδιαφέρον λόγω των ποικίλων εφαρμογών της σε διάφορους τομείς. Συνοπτικά αναφέρονται παρακάτω οι τομείς των πιο χαρακτηριστικών και χρήσιμων εφαρμογών της:

- Αναλυτική χημεία : η φασματοσκοπία χρησιμοποιείται κατά κόρων στην αναλυτική χημεία και κυρίως στην στοιχειομετρία διαλυμάτων. Για κάθε ουσία υπάρχει μια πρότυπη καμπύλη συγκέντρωσης-απορρόφησης (A) ή συγκέντρωσης-διαπερατότητας (%T), η οποία συγκρίνεται με την αντίστοιχη καμπύλη που εξάγεται από τον στοιχειομετρικό αναλυτή και έτσι καθορίζεται η ποσοτική και ποιοτική ανάλυση του διαλύματος.
- Βιοχημεία : σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η φασματοσκοπία και στην περιοχή της βιοχημείας, όπου αναλύει ποσοτικά και ποιοτικά διαλύματα πρωτεϊνών.
- Διαγνωστικά όργανα : η φασματοσκοπία είναι από τις πιο βασικές μεθόδους στην in vitro ανάλυση, αφού τα περισσότερα διαγνωστικά όργανα την έχουν ως κύρια αρχή λειτουργίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι αναλυτές αίματος, οι οποίοι μέσω μια ειδικής

διάταξης και με την βοήθεια της φασματοσκοπίας έχουν την δυνατότητα να μετρούν ποσοτικά και ποιοτικά τα κύτταρα στα δείγματα αίματος.

- Περιβάλλον : Μια από τις πιο χαρακτηρίστηκες εφαρμογές της φασματοσκοπίας είναι στη μέτρηση ρύπων τόσο στη ατμόσφαιρα όσο και στο υδάτινο περιβάλλον. Με κατάλληλα όργανα μετριοούνται ποσοτικά αλλά και ποιοτικά ουσίες βλαβερές για το περιβάλλον.
- Βιομηχανικές εφαρμογές : η φασματοσκοπία στην βιομηχανία χρησιμοποιείται κυρίως για τη ποιοτική ανάλυση των παραγόμενων προϊόντων, το γνωστό και ως on-line control.
- Ιατρική : μία από τις πιο πρωτοποριακές χρήσεις τις φασματοσκοπίας στην ιατρική είναι κυρίως σε διαγνωστικές αλλά και θεραπευτικές τεχνικές της. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση της οπτικής ακτινοβολίας, σε διαγνωστικές και θεραπευτικές μεθόδους, έναντι άλλων παρεμβατικών μεθόδων. Μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους είναι και η οπτική βιοψία, η οποία σε αντίθεση με την «κλασσική» βιοψία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι τεχνικές οπτικής βιοψίας δεν συνιστούν την αφαίρεση ιστού από το σώμα, αλλά βασίζονται στην βιοϊατρική ανάλυση του δείγματος μέσω των χαρακτηριστικών οπτικών ιδιοτήτων των ιστών. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι μια μη-παρεμβατική μέθοδος που δίνει τη δυνατότητα διάγνωσης σε πραγματικό χρόνο.

### **1.3 Είδη Φασματοσκοπίας — Φασματοσκοπικές διατάξεις**

Τα είδη της φασματοσκοπίας βασίζονται κυρίως στα φαινόμενα εκπομπής (emission), απορρόφησης (absorption), φθορισμού (fluorescence), φωσφορισμού (phosphorescence) και σκέδασης (scattering).

Παρόλο που υπάρχουν ορισμένες διαφορές στις διατάξεις των παραπάνω ειδών φασματοσκοπίας, ορισμένα από τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι ίδια. Έτσι, οι περισσότερες φασματοσκοπικές διατάξεις περιλαμβάνουν τα παρακάτω 5 εργαλεία :

- (1) Ευσταθής πηγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας
- (2) A transparent container για να συγκρατεί το δείγμα
- (3) Μια συσκευή που απομονώνει τις απαγορευμένες περιοχές του φάσματος για μετρήσεις
- (4) Έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας ή μια διάταξη μετατροπής, η οποία μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε χρησιμοποιήσιμο σήμα (συνήθως ηλεκτρικό)
- (5) Έναν επεξεργαστή σήματος και ανάγνωσης, το οποίο παρουσιάζει το μετατρεπόμενο σήμα σε ένα παλμογράφο ή σε ένα διάγραμμα.

Παρακάτω θα αναλύσουμε ορισμένα από τα παραπάνω εργαλεία :

#### **(1) Πηγή ακτινοβολίας:**

Για να είναι κατανοητές οι φασματοσκοπικές διεργασίες, μια πηγή πρέπει να παράγει μια σταθερή δέσμη ακτινοβολίας με επαρκή ισχύ ώστε να πραγματοποιηθεί απευθείας ανίχνευση και καταμέτρηση. Έτσι, διακρίνουμε δυο είδη πηγών ακτινοβολίας, τις συνεχείς και τις γραμμικές.

Οι συνεχείς πηγές (continuous source) έχουν εκτεταμένη χρήση στην φασματοσκοπία απορρόφησης (absorption spectroscopy) και στην φασματοσκοπία φθορισμού (fluorescence spectroscopy). Οι γραμμικές πηγές οι οποίες παράγουν διακεκριμένες γραμμές χρησιμοποιούνται στην φασματοσκοπία εκπομπής ατόμου (atomic absorption spectroscopy). Δυο από τις πιο χαρακτηριστικές γραμμικές πηγές είναι οι familiar mercury lamp και sodium vapour lamp.

## **(2) Επιλογέας μήκους κύματος (wavelength selector):**

Επικρατούν στη σύγχρονη φασματοσκοπία, κυρίως δυο είδη επιλογέων μήκος κύματος :

- Φίλτρα (filters), τα οποία χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, τα φίλτρα συμβολής (interference filters) και τα φίλτρα απορρόφησης
- Μονοχρωμάτορες (monochromators), οι οποίοι χωρίζονται ανάλογα με τη διαδικασία επιλογής σε μονοχρωμάτορες απομόνωσης (grating monochromators) και σε αυτούς που η διαδικασία γίνεται μέσω πρίσματος (prism monochromators).

Ιδανικά, η έξοδος από έναν επιλογέα μήκους κύματος, μονοχρωμάτορας ή φίλτρο, θα πρέπει να είναι ακτινοβολία απλό επιλογέα μήκους κύματος. Όμως, κανένας από τους υπάρχοντες επιλογείς δεν προσεγγίζει την ιδανική κατάσταση.

## **(3) Αναγνώστες και επεξεργαστές σημάτων (signal processors and readout):**

Ο επεξεργαστής σήματος είναι συνήθως μια ηλεκτρονική συσκευή η οποία ενισχύει το ηλεκτρικό σήμα από τον ανιχνευτή (detector). Επίσης, μπορεί να μεταβάλλει το dc σε ac (ή και το αντίθετο), να αλλάξει τη φάση του σήματος και να το φιλτράρει ώστε να απομακρύνει ανεπιθύμητα στοιχεία. Τέλος, ο επεξεργαστής σήματος μπορεί να χρειαστεί να επεξεργαστεί μαθηματικά το σήμα όπως να εφαρμόσει σε αυτό διάκριση (differentiation), ολοκλήρωση (integration) ή ακόμα και μετατροπή (conversion) σε αλγόριθμο.

Απ' τα παραπάνω εύκολα παρατηρούμε ότι η φασματοσκοπία εκπομπής (emission spectroscopy) διαφέρει από τους υπόλοιπους τύπους διότι απαιτούνται εξωγενείς πηγές ακτινοβολίας. Το ίδιο το δείγμα είναι ο εκπομπός. Στις υπόλοιπες μεθόδους, φασματοσκοπία φθορισμού, φασματοσκοπία φωσφορισμού, φασματοσκοπία απορρόφησης και φασματοσκοπία σκέδασης είναι απαραίτητη μια εξωγενής πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

#### **1.4 Σύγχρονη Τεχνολογία Φασματοσκοπικών Διατάξεων**

Υπάρχει πλήθος οργάνων που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο για τη μέτρηση της απορροφητικότητας στις φασματικές περιοχές των ορατών, υπέρυθρων και υπεριωδών κυμάτων. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των οργάνων.

### **1.4.1 Μεταβλητές σχεδιασμού οργάνων**

Δύο είναι οι πιο σημαντικές μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό αυτών των οργάνων : (1) η ρύθμιση στο διάστημα του δείγματος και των κυττάρων αναφοράς όσον αφορά τον επιλογέα μήκους κύματος και (2) ο συγχρονισμός της μέτρησης  $P_0$  και του  $P$  καθώς επίσης και το ρεύμα σκότους (dark current). Η δεύτερη μεταβλητή καθορίζει εάν το όργανο θα είναι μονής ή διπλής ακτίνας.

### **Θέση των δειγμάτων και κελιών αναφοράς**

Το δείγμα και τα κελιά αναφοράς μπορούν να τοποθετηθούν είτε μεταξύ της πηγής και του επιλογέα μήκους κύματος είτε μεταξύ του επιλογέα μήκους κύματος και του ανιχνευτή. Κάθε ρύθμιση έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Στην προηγούμενη διάταξη, όλη η ακτινοβολία περνά μέσω του δείγματος. Η διασπορά της ακτινοβολίας από τα συστατικά του δείγματος κάνει λίγη ζημιά σε αυτή τη διάταξη επειδή η διασπαρμένη ακτινοβολία θα απορριφθεί στη συνέχεια από τον επιλογέα και έτσι δεν θα φθάσει στον ανιχνευτή. Αφ' ετέρου, για οποιαδήποτε είδη φθορισμού στο δείγμα, τα οποία θα προκληθούν για να ακτινοβολήσουν από τα πιο μικρά μήκη κύματος από την πηγή, ο φθορισμός θα παράγει ένα φάσμα εκπομπής που θα παρεμποδίζει τις μετρήσεις απορρόφησης. Επιπλέον, τα πιο μικρά και πιο ενεργητικά μήκη κύματος προκαλούν συχνά τη φωτοδιάσπαση του κατάλοιπου που παρεμποδίζει έτσι τη μέτρηση. Όταν τα δείγματα και κελιά αναφοράς τοποθετηθούν μεταξύ του επιλογέα μήκους κύματος και του ανιχνευτή, η δυνατότητα του τόξου φθορισμού και φωτοδιάσπασης ελαχιστοποιείται επειδή τα πιο μικρά μήκη κύματος έχουν

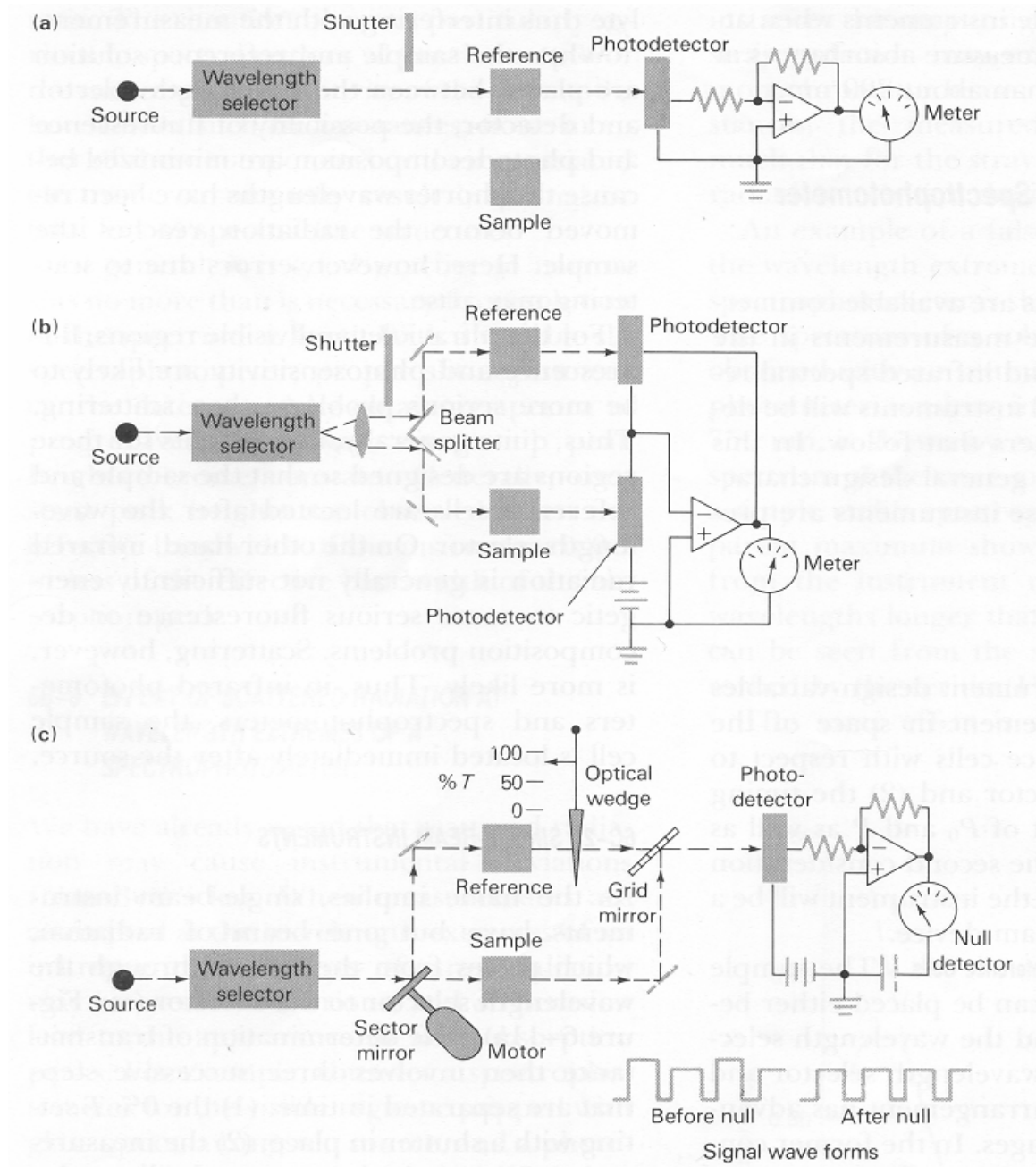


αφαιρεθεί προτού να φθάσει η ακτινοβολία στο δείγμα. Παρ' όλα αυτά, τα σφάλματα λόγω της διασποράς μπορούν να προκύψουν.

Για περιοχές ορατών και υπεριωδών κυμάτων, ο φθορισμός και η φωτοευαισθησία είναι πιθανόν να είναι σοβαρότερα προβλήματα από τη διασπορά. Κατά συνέπεια, σε γενικές γραμμές, τα όργανα για αυτές τις περιοχές σχεδιάζονται έτσι ώστε τα δείγματα και τα κελιά αναφοράς να βρίσκονται μετά από τον επιλογέα μήκους κύματος. Αφ' ετέρου, η υπέρυθη ακτινοβολία δεν είναι γενικά αρκετά ενεργητική για να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα φθορισμού ή αποσύνθεσης. Η διασπορά, εντούτοις, είναι πιθανότερη. Κατά συνέπεια, στα υπέρυθρα φασματομέτρα, το δείγμα βρίσκεται αμέσως μετά από την πηγή.

### 1.4.2 Όργανα μονής ακτίνας

Τα μονής ακτίνας όργανα έχουν μια ακτίνα ακτινοβολίας, η οποία περνά από την πηγή μέσω του επιλογέα μήκους κύματος στον ανιχνευτή



Σχήμα 1.4.1

Ο προσδιορισμός της μετάδοσης περιλαμβάνει τρία διαδοχικά βήματα:

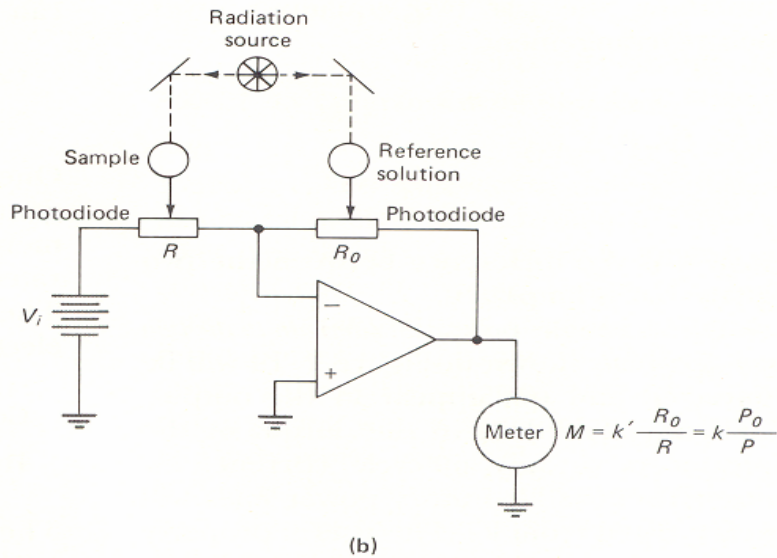
1. το 0% T ρύθμιση με ένα διάφραγμα σε ισχύ
2. η μέτρηση  $P_0$  (ή η οργανική ρύθμιση σε 100%T)
3. η μέτρηση του P.

Η αξιοπιστία των στοιχείων μετάδοσης εξαρτάται από τη σταθερότητα των χαρακτηριστικών του οργάνου κατά τη διάρκεια του χρόνου που απαιτείται για να ολοκληρώσει τα τρία βήματα. Άρα, αυτές οι μετρήσεις ολοκληρώνονται πάντα όσο το δυνατόν πιο γρήγορα

### **1.4.3 Όργανα διπλής ακτίνας**

Τα όργανα διπλής ακτίνας ή τα όργανα απορρόφησης δύο καναλιών έχουν δύο ακτίνες ακτινοβολίας, μια από τις οποίες περνά μέσω του διαλύτη αναφοράς και άλλης μέσω δείγματος. Στον ένα τύπο οργάνου, τα δύο μονοπάτια που διασχίζουν οι ακτίνες είναι χωρικά διαχωρισμένα αλλά συμπίπτουν χρονικά, στον άλλο τύπο εναλλάσσονται χρονικά αλλά συμπίπτουν περισσότερο χωρικά.

Ο πρώτος τύπος των διπλών καναλιών φαίνεται στο σχήμα 1.4.1β. Εδώ, τα δύο κανάλια στο διάστημα διαμορφώνονται από έναν V-μορφής καθρέφτη ο οποίος αποκαλείται διαχωριστής ακτινών (beam splitter). Μια ακτίνα απεικονίζεται μέσω της λύσης αναφοράς (reference solution) σε ένα ανιχνευτή ενώ ταυτόχρονα η δεύτερη περνά μέσω του δείγματος σε ένα δεύτερο ανιχνευτή. Η αναλογία της ισχύς των δύο ακτινών μπορεί έπειτα να καθοριστεί από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα όπως του σχήματος 1.4.2



σχήμα 1.4.2

Σε αυτή την περίπτωση, η μέτρηση γίνεται σε δύο στάδια λειτουργίας, που περιλαμβάνουν πρώτα τη ρύθμιση με ένα διάφραγμα μεταξύ του επιλογέα και του διαχωριστή ακτινών και έπειτα του προσδιορισμού μετάδοσης. Εδώ, η αξιοπιστία εξαρτάται από τη σταθερότητα του ρεύματος σκότους κατά τη διάρκεια των δύο βημάτων και την ομοιότητα στα χαρακτηριστικά απόκρισης των δύο ανιχνευτών.

Το σχήμα 1.4.1c επεξηγεί το δεύτερο τύπο ρύθμισης των δύο καναλιών. Σε αντίθεση με τα άλλα δύο σχέδια, κανένα διάφραγμα υπό αυτή την μορφή δεν χρησιμοποιείται. Εδώ, ένας περιστρεφόμενος καθρέφτης χρησιμεύει να κατευθύνει όλη την ακτινοβολία από τον επιλογέα στο κελί αναφοράς και το κελί δείγματος διαδοχικά. Κατά συνέπεια, τα δύο κανάλια είναι, από μια άποψη, είναι βασισμένα συγχρονισμό. Οι παλμοί της ακτινοβολίας επανασυνδυάζονται με τη βοήθεια του ενός grid καθρέφτη που διαβιβάζει το ένα και απεικονίζει το άλλο στον ανιχνευτή. Ο μηχανοκίνητος καθρέφτης που είναι κυκλικός στο διαγώνιο τμήμα,

αποτελείται από διάφορα στρώματα, εκ των οποίων τα μισά είναι αντανakλόμενα και τα άλλα μισά επιτρέπουν ανεμπόδιστη τη μετάβαση της ακτινοβολίας. Τα αντανakλόμενα τμήματα κρατώνται στη θέση τους από μαυρισμένα πλαίσια μετάλλων που χρησιμεύουν στο να διακόπτουν περιοδικά την ακτίνα και να την αποτρέπουν από το να φτάνει στον ανιχνευτή. Το κύκλωμα ανιχνευτών είναι προγραμματισμένο για να χρησιμοποιήσει αυτές τις περιόδους για να εκτελέσει τη ρύθμιση ρεύματος σκότους (dark current adjustment) με τη βοήθεια ενός συστήματος ανατροφοδότησης πληροφοριών.

Τα όργανα όπως αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.1c είναι συνήθως του μηδενικού τύπου στον οποίο η ακτίνα που περνά μέσω του κελιού αναφοράς μειώνεται μηχανικά έως ότου είναι ακριβώς ίση με την ένταση δειγματικής ακτίνας, διαφορετικά ο μηδενισμός μπορεί να γίνει από ένα σύστημα ανατροφοδότησης πληροφοριών που ενεργεί στον ηλεκτρικό σφυγμό που αντιστοιχεί στον κύκλο αναφοράς. Το όργανο στο σχήμα 1.4.1c είναι εξοπλισμένο με μια οπτική σφήνα (wedge), η transition της οποίας αυξάνεται γραμμικά μαζί με το μήκος της. Κατά συνέπεια, το μηδενικό σημείο επιτυγχάνεται με το να κινηθεί αυτή η σφήνα κάθετα στην ακτίνα έως ότου οι δύο ηλεκτρικοί παλμοί να είναι ίδιοι. Οι κυματομορφές για το ηλεκτρικό σήμα εμφανίζονται πριν και μετά από την ισορροπία. Η έξοδος του ανιχνευτή είναι χρονικά εξαρτώμενη έτσι ώστε τα ελάχιστα των κυματομορφών να χρησιμοποιηθούν για τη ρύθμιση ρεύματος σκότους. Κατά τη διάρκεια του χρόνου που υπολείπεται που η έξοδος είναι ένα σήμα εναλλασσόμενου ρεύματος τετραγωνικών παλμών που επιβάλλεται σε ένα συνεχές σήμα μέχρι να γίνει μηδενικό, κατόπιν η έξοδος εμφανίζεται ως συνεχές σήμα μόνο. Κατά συνέπεια, ένα κύκλωμα όπως αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.1 c, που ανταποκρίνεται μόνο σε ένα σήμα

εναλλασσόμενου ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει το μηδενικό σημείο.

#### **1.4.4 Σύγκριση οργάνων μονής ακτίνας με όργανα διπλής**

Επειδή η μέτρηση του  $P_0$  και του  $P$  γίνεται ταυτόχρονα, ή σχεδόν έτσι, ένα όργανο διπλών ακτινών αντισταθμίζει την κλίση (θόρυβος τρεμουλιασμάτων) στην ισχύ ακτινοβολίας της πηγής. Άρα, καλή απόδοση μπορεί να παρατηρηθεί και με ηλεκτρονικά τμήματα χαμηλότερης ποιότητας. Επιπλέον, το σχέδιο διπλών ακτινών οδηγείται καλά στη συνεχή καταγραφή εκπομπής και των απορροφητικότητας καθώς ένα φάσμα σαρώνεται. Παρ' όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα υπάρχουν και μειονεκτήματα τα οποία πηγάζουν από τον μεγάλο αριθμό και την πολυπλοκότητα των συστατικών που απαιτούνται καθώς και στο ηλεκτρικό και μηχανικό θόρυβο που εισάγεται από το σύστημα μεταβολής ακτινών.

Τα περισσότερα σύγχρονα όργανα που σχεδιάζονται για την απορροφητικότητα ή τη μετάδοση καταγραφής πέρα από μια σειρά, είναι διπλής ακτίνας. Το απλής ακτίνας σχέδιο προσφέρει τα ευδιάκριτα πλεονεκτήματα από την άποψη της απλότητας και του συνακόλουθου χαμηλότερου κόστους. Επιπλέον, οι σήματος προς θόρυβο αναλογίες αυτών των απλούστερων οργάνων είναι εγγενώς μεγαλύτερες για διάφορους λόγους. Αρχικά, η ακτινοβολία ενέργεια που φθάνει στον ανιχνευτή των απλής-ακτίνας οργάνων είναι γενικά σημαντικά μεγαλύτερη από ότι για τα αντίστοιχα διπλών-ακτινών, οδηγώντας κατά συνέπεια στις ενισχυμένες αναλογίες  $S/N$ . Σε όλα τα φασματόμετρα οι ελαφριές απώλειες εμφανίζονται όπου η ακτινοβολία διασυνδέεται με τα τμήματα οργάνων όπως οι καθρέφτες, στοιχεία διασκόρπισης και window. Για παράδειγμα,

μια ακτίνα μπορεί να μειωθεί από 10 έως 30% αντανακλόμενη από έναν ενιαίο καθρέφτη. Τα όργανα διπλών-ακτινών έχουν συχνά 10 έως 15 τέτοια στοιχεία, το οποίο οδηγεί σε μεγάλες απώλειες. Αντίθετα, ένα χαρακτηριστικό όργανο απλής-ακτίνας θα έχει 3-6 επιφάνειες στις οποίες μπορεί να εμφανιστεί μείωση ακτίνας. Ένα όργανο διπλών-ακτινών υφίσταται επίσης την απώλεια στο throughput επειδή φωτόνια χάνονται στη μέτρηση του ρεύματος σκότους και τα υπόλοιπα χωρίζουν σε δύο προκειμένου να μετρηθούν το  $P$  και το  $P_0$  ταυτόχρονα ή διαδοχικά. Εκτός από το να έχουν πιο αδύνατα σήματα, τα όργανα διπλών-ακτινών, τείνουν να διέπονται και από μεγαλύτερο θόρυβο. Για τον ανιχνευτή διπλού τύπου, ο θόρυβος ανιχνευτών διπλασιάζεται. Οι ανιχνευτές μονού τύπου, αφετέρου, απαιτούν μια μηχανοκίνητη συσκευή που εισάγει τον παλμικό θόρυβο καθώς επίσης και τον θόρυβο ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Κατά συνέπεια, έχει αποδειχθεί ότι εάν η κλίση στην πηγή και στο ρεύμα σκότους των ανιχνευτών μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, οι καλύτερες αναλογίες  $S/N$  μπορούν να πραγματοποιηθούν με ένα απλής-ακτίνας όργανο.

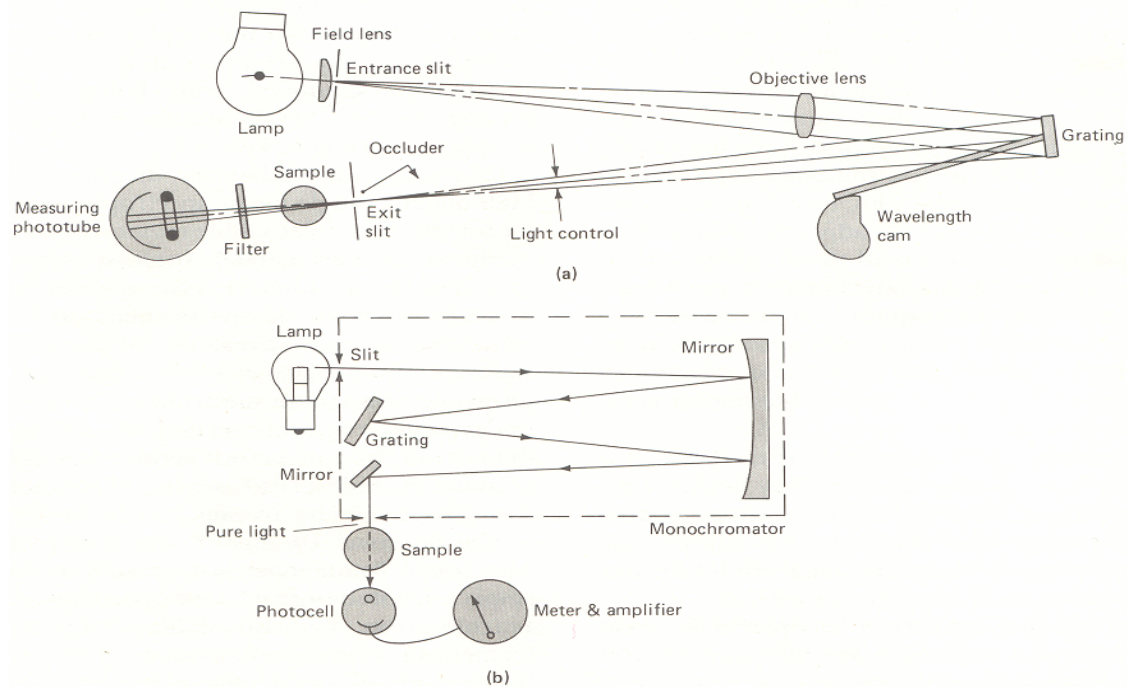
Τα απλής ακτίνας όργανα είναι ιδιαίτερα καλά για τις ποσοτικές αναλύσεις όπου μετρήσεις γίνονται σε ένα ενιαίο μήκος κύματος. Εδώ, το πλεονέκτημα καταγραφής του οργάνου διπλών-ακτινών δεν είναι συχνά σημαντικό, η απλότητα και ο μεγάλος λόγος σήματος προς θόρυβο ( $S/N$ ) της συσκευής απλής ακτίνας αποτελεί ένα πραγματικό πλεονέκτημα.

### 1.4.5 Φασματομέτρα

Υπάρχει μεγάλος αριθμός φασματομέτρων διαθέσιμο στο εμπόριο, μερικά έχουν σχεδιαστεί για την ορατή περιοχή μόνο, ενώ άλλα για την υπεριώδη και ορατή περιοχή.

#### 1.4.5.1 Όργανα για την περιοχή του ορατού

Υπάρχουν διάφορα φασματομέτρα που λειτουργούν στην περιοχή 380-800nm διαθέσιμα στο εμπόριο. Στη πλειοψηφία τους είναι όργανα μονής ακτίνας που είναι σχετικά ανέξοδα (λιγότερο από \$1000) και φορητά, τα οποία λειτουργούν με μπαταρίες και είναι αρκετά ελαφριά και μικρά. Η πιο κοινή εφαρμογή αυτών των οργάνων είναι για την ποσοτική ανάλυση, αν και αρκετά παράγουν αρκετά καλά φάσματα. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα.



εικόνα 1.4.1



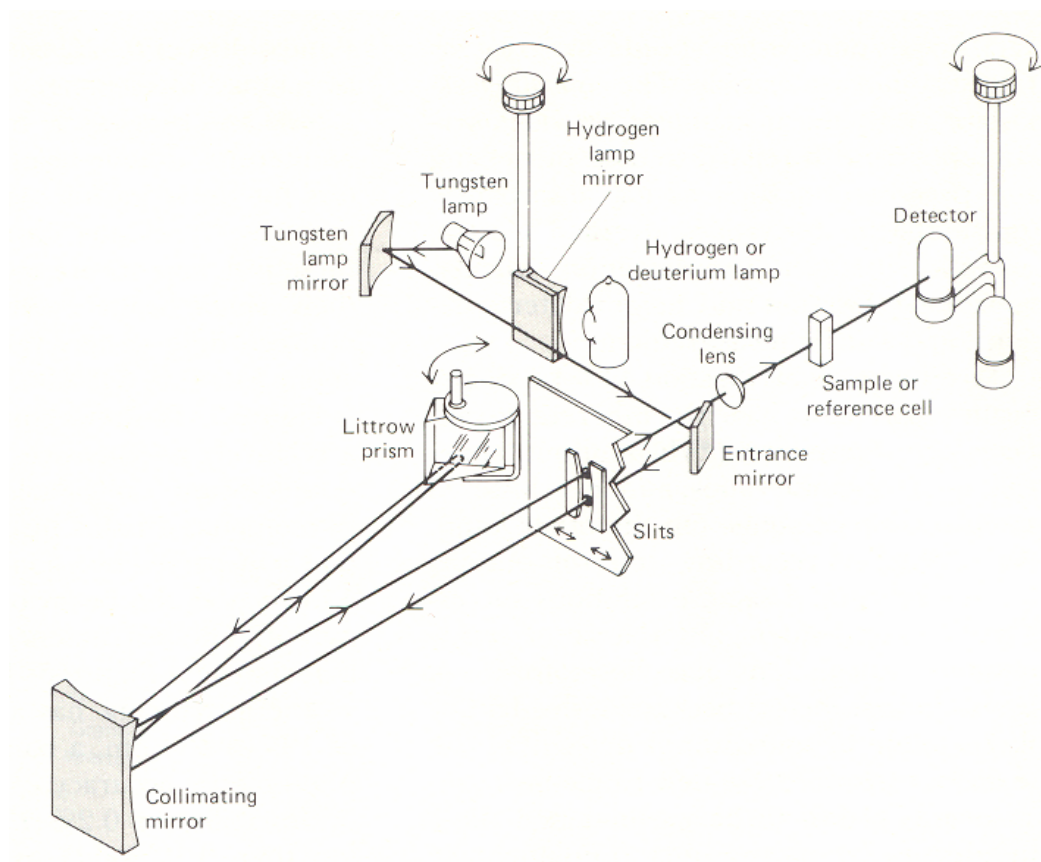
Η πρώτη συσκευή υιοθετεί μια πηγή φωτός ινών βολφραμίου, η οποία προέρχεται από μια σταθεροποιημένη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος που παρέχει ακτινοβολία σταθερής έντασης. Μετά από τη διάθλαση από μια απλή αντανάκλαση, η ακτινοβολία περνά μέσω των δοκιμαστικών σωλήνων δειγμάτων ή αναφοράς σε μια φωτολυχνία. Το ενισχυμένο ηλεκτρικά σήμα από τις δυνάμεις ανιχνευτών ενισχύεται κατά  $5 \frac{1}{2}$  in. κλίμακα που βαθμολογείται στη μετάδοση και την απορροφητικότητα. Το όργανο είναι εξοπλισμένο με occluder που πέφτει αυτόματα μεταξύ της ακτίνας και του ανιχνευτή οπότε ο δοκιμαστικός σωλήνας αφαιρείται και μπορεί έπειτα να γίνει η προσαρμογή 0%T. Η ελαφριά συσκευή ελέγχου που παρουσιάζεται στο σχήμα αποτελείται από μια V- μορφής slot που μπορεί να κινηθεί μέσα ή έξω από την ακτίνα προκειμένου να μπορεί να τεθεί ο μετρητής σε 100%T. Τα όρια του οργάνου που παρουσιάζεται στο σχήμα είναι από 340-625nm, ενώ μια βοηθητική φωτολυχνία επεκτείνει αυτά τα όρια στα 950nm. Άλλες προδιαγραφές για το όργανο περιλαμβάνουν ένα εύρος ζώνης 20nm και μια ακρίβεια μήκους κύματος  $\pm 2,5$  nm.

Το δεύτερο όργανο που παρουσιάζεται στην εικόνα 1.4.1 χρησιμοποιεί μια λάμπα βολφραμίου ως πηγή, ένα απλής ανάκλασης φράγμα διάθλασης σε Ebert mounting για διάθλαση και ένα ανιχνευτή φωτολυχνιών που είναι ευαίσθητο στη περιοχή 210-710nm. Η συσκευή εξόδου ανάγνωσης είναι ένας μετρητής βαθμονομημένος και για την μετάδοση και για την απορροφητικότητα. Η προσαρμογή 0%T επιτυγχάνεται με την μεταβολή της εξόδου των ενισχυτών, ενώ η προσαρμογή 100%T πραγματοποιείται με την μεταβολή της εξόδου συνεχόμενης παροχής ηλεκτρικού ρεύματος της λάμπας. Οι προδιαγραφές

των οργάνων περιλαμβάνουν ένα εύρος ζώνης 8nm, μια ακρίβεια μήκους κύματος  $\pm 2\text{nm}$  και μια φωτομετρική ακρίβεια 0,5%A.

#### **1.4.5.2 Μονής ακτίνας όργανα για την περιοχή υπεριώδους-ορατού**

Διάφοροι κατασκευαστές οργάνων προσφέρουν όργανα απλής-ακτίνας χωρίς εγγραφή που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την υπεριώδη περιοχή και για την ορατή. Τα χαμηλότερα όρια μήκους κύματος για αυτά τα όργανα ποικίλλουν από 190-210nm και τα ανώτερα από 800-1000nm και όλα είναι εξοπλισμένα με εναλλάξιμους λαμπτήρες βολφραμίου και υδρογόνου ή δεφτεριού. Μερικά είναι εξοπλισμένα με ψηφιακές συσκευές ανάγνωσης. Το εύρος ζώνης κυμαίνεται από 2-8nm και η ακρίβεια του μήκους κύματος  $\pm 0,5 - \pm 2\text{nm}$ . Στην εικόνα 1.4.2 απεικονίζεται ένα σχηματικό διάγραμμα ενός υψηλής ποιότητας, μονής-ακτίνας φασματόμετρου για την υπεριώδες και ορατή περιοχή. Αυτό το όργανο, το Beckman DU spectrophotometer, είναι ιστορικού ενδιαφέροντος επειδή ήταν το πρώτο φασματόμετρο υπεριώδους-ορατής περιοχής το οποίο παρουσιάστηκε στην αγορά.



εικόνα 1.4.2

#### **1.4.5.3 Μονής ακτίνας αυτοματοποιημένα φασματόμετρα**

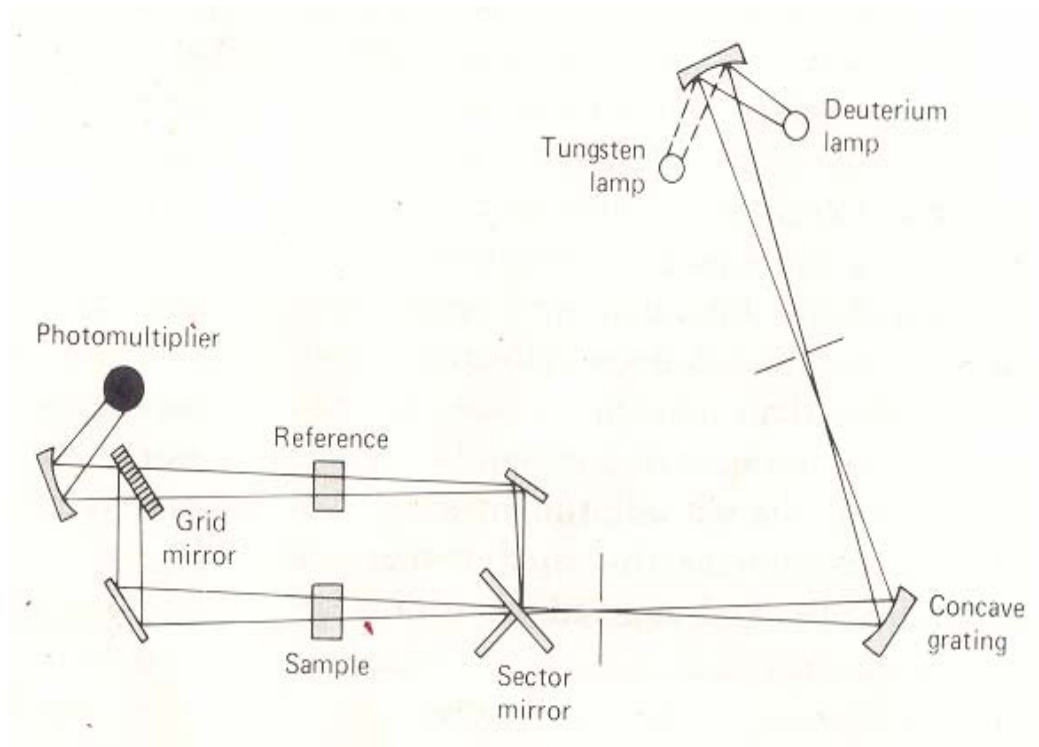
Υπάρχουν στην αγορά αυτοματοποιημένα, απλής-ακτίνας φασματόμετρα τα οποία λειτουργούν στα όρια 190-800nm. Με αυτά τα όργανα, εκτελείται μια ανίχνευση μήκους κύματος αρχικά με την λύση αναφοράς στον άξονα της δέσμης και η έξοδος που προκύπτει από τον ανιχνευτή γίνεται ψηφιακή και καταχωρείται στην μνήμη του υπολογιστή. Στη συνέχεια, δείγματα σαρώνονται και οι απορροφητικότητας υπολογίζονται με την βοήθεια των ήδη καταχωρημένων πληροφοριών. Το πλήρες φάσμα παρουσιάζεται σε ένα σωλήνα καθοδικών ακτινών (cathode-ray tube) μέσα σε 2sec από την στιγμή που αποκτήθηκαν τα δεδομένα. Οι

ταχύτητες σάρωσης μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα 1200nm/min. Ο υπολογιστής που συνδέεται με το όργανο παρέχει διάφορες προαιρετικές δυνατότητες όσον αφορά την επεξεργασία δεδομένων και την παρουσίαση όπως καταχωρημένη απορροφητικότητα, μετάδοση, παράγωγα, επικαλυπτόμενα φάσματα, επαναλαμβανόμενες ανιχνεύσεις, μέγιστοι προσδιορισμοί θέσης και ύψους και μετρήσεις κινητικότητας.

Είναι γνωστό ότι τα όργανα μονής ακτίνας πλεονεκτούν επειδή έχουν μεγαλύτερη ενέργεια στο throughput, καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο και λιγότερες διαταραχές στα τμήματα του δείγματος. Αντίθετα, η διαδικασία της καταγραφής της εξόδου του ανιχνευτή μέχρι τώρα δεν ήταν αρκετά ικανοποιητική λόγω του θορύβου που παρουσιάζουν οι πηγές και οι ανιχνευτές. Τώρα οι νέοι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι έχουν εξαλείψει αυτές τις αστάθειες με νέα πρωτοποριακά σχέδια πηγών καθώς και με ένα νέο ηλεκτρονικό σχέδιο που εξαλείφει την καθυστέρηση ή τις συνέπειες της μνήμης στη φωτοδίοδο.

#### **1.4.5.4 Διπλής ακτίνας όργανα για την περιοχή του υπεριώδους-ορατού**

Σε αυτό το όργανο, η ακτινοβολία διασκορπίζεται από ένα κοίλο grating το οποίο επίσης εστιάζει την ακτίνα σε ένα περιστρεφόμενο sector mirror. Το όργανο έχει μήκος κύματος 195-850 nm, εύρος ζώνης 4nm, φωτομετρική ακρίβεια 0,5%T και μια δυνατότητα αναπαραγωγής 0,2%T, η περιπλανώμενη ακτινοβολία είναι λιγότερο από 0,1%  $P_0$  σε 240-340nm. Τέτοια όργανα είναι κατάλληλα για ποσοτική εργασία όπου η παραγωγή ενός ολόκληρου φάσματος δεν είναι απαραίτητη.

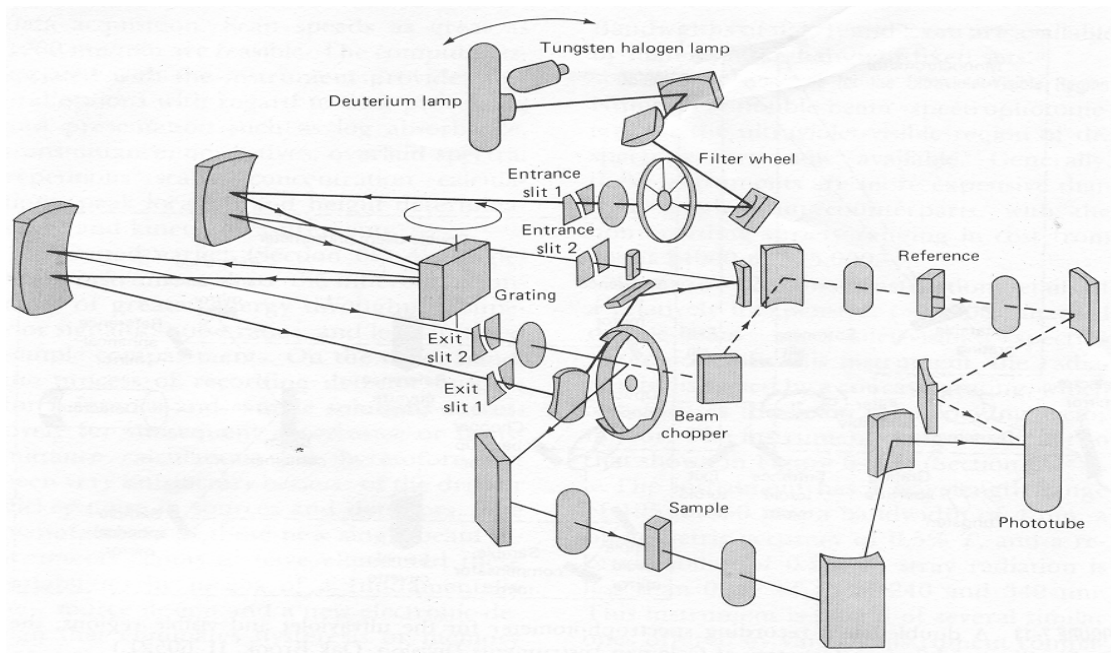


εικόνα 1.4.3

#### **1.4.5.5 Όργανα διπλής διασκόρπισης**

Προκειμένου να ενισχυθεί η φασματική ανάλυση και να επιτευχθεί μια σημαντική μείωση της διασπαρμένης ακτινοβολίας, δημιουργήθηκαν μια σειρά από όργανα τα οποία έχουν σχεδιαστεί με δύο grating ή πρίσματα τοποθετημένα σε σειρά με μια σχισμή ενδιάμεσα, δηλαδή αυτά τα όργανα αποτελούνται από δύο monochromators σε σειριακή διάταξη.

Παρακάτω, φαίνεται ένα όργανο το οποίο επιτυγχάνει τα ίδια χαρακτηριστικά απόδοσης με ένα grating.



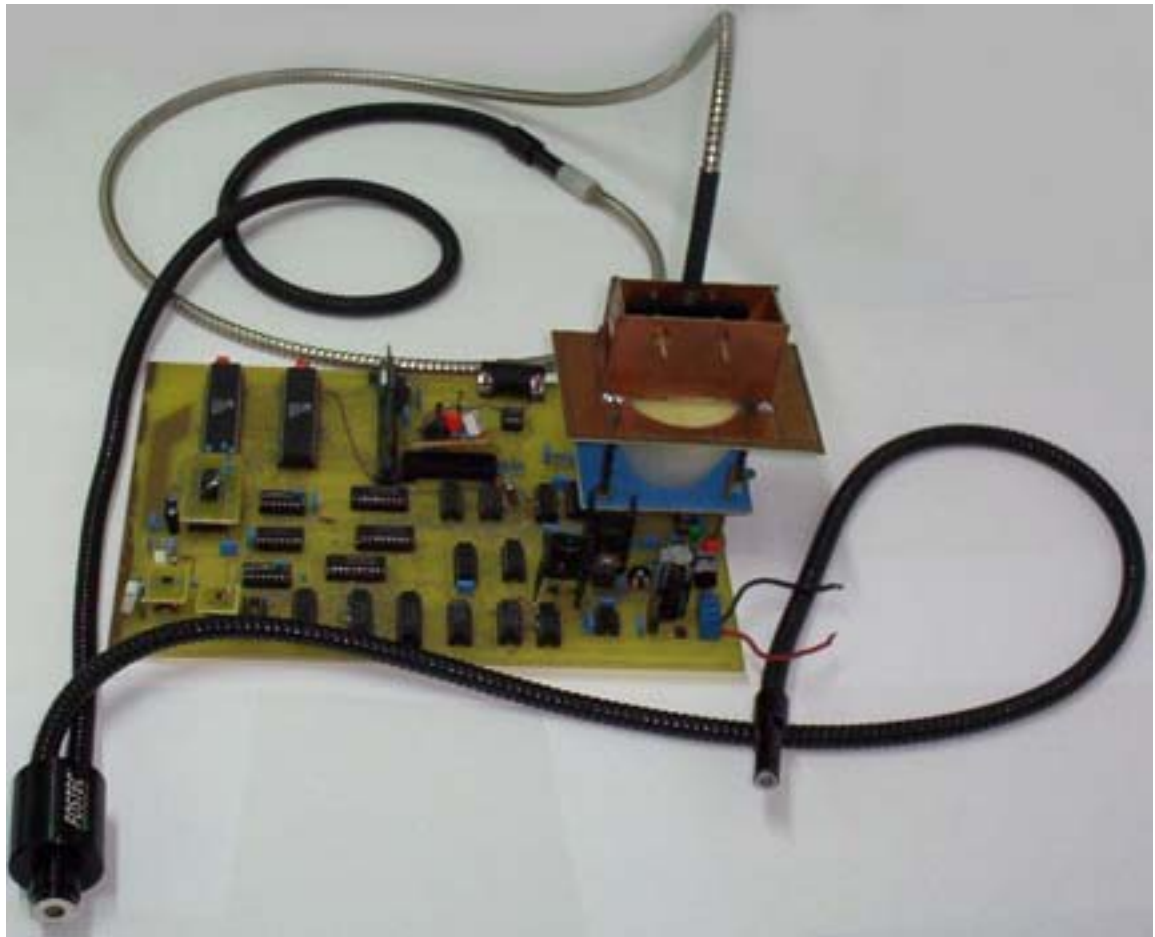
εικόνα 1.4.4

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ακτινοβολία που περνά μέσα από την σχισμή εισόδου 1 (entrance slit 1) διασκορπίζεται από το grating και κατευθύνεται μέσω της σχισμής εξόδου 1 (exit slit 1) στη σχισμή εισόδου 2 (entrance slit 2). Ύστερα, από μια δεύτερη διασπορά από το grating, η ακτίνα εμφανίζεται στη σχισμή εξόδου 2 (exit slit 2) όπου χωρίζεται σε μια ακτίνα-δείγμα (sample beam) και μια ακτίνα αναφοράς (reference beam). Η ανάλυση του οργάνου είναι  $0,07\text{nm}$  και η περιπλανώμενη ακτινοβολία  $0,0008\%$  από  $220\text{-}800\text{nm}$ . Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από  $800\text{nm}$ , ένας φωτοαγώγιμος ανιχνευτής μολύβδου-σουλφιδίου χρησιμοποιείται με μια πηγή βολφραμίου.

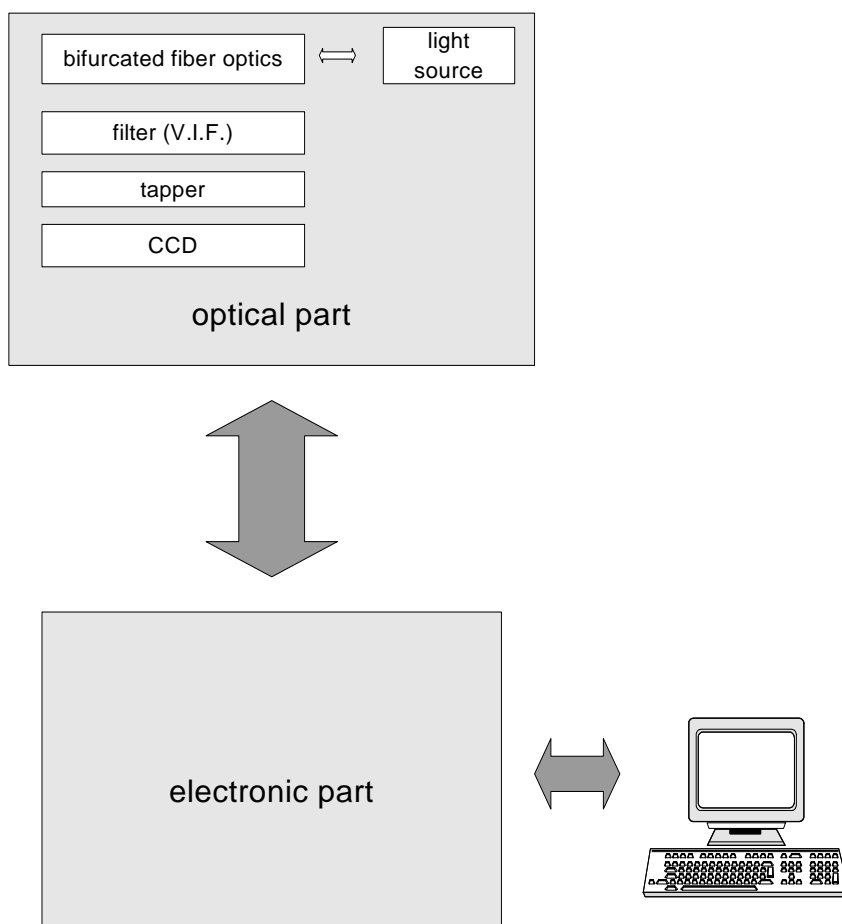
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>:**

### **2.1 Σχεδίαση νέου φασματόμετρου με ευαισθησία στην περιοχή 400-1000 nm**

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε ένα οπτικό φασματόμετρο βασισμένο σε γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής ευαίσθητο στην φασματική περιοχή 400-1000 nm.



Παρακάτω φαίνεται το σύστημα που υλοποιήθηκε σε ένα αρκετά περιληπτικό block-diagram.

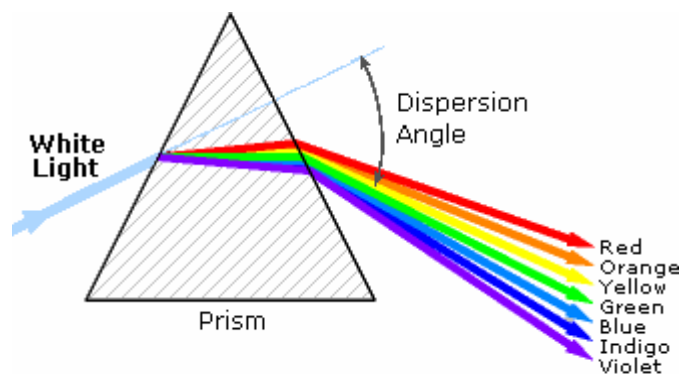


εικόνα 2.1

Αρχικά, το σύστημα διαχωρίστηκε σε δυο μέρη : στο οπτικό και το ηλεκτρονικό. Το οπτικό μέρος σχεδιάστηκε με βασικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση της απώλειας φωτός που θα καταλήξει στον ανιχνευτή (detector-CCD). Ύστερα από διεξοδική μελέτη των μεθόδων υλοποίησης φασματομετρικών διατάξεων καταλήξαμε σε δυο πιο επικρατέστερες : στη μέθοδο του πρίσματος και στη μέθοδο του “sandwich”.

Στη μέθοδο του πρίσματος το φως που έρχεται από την πηγή φωτός μέσω της διακλαδούμενης οπτικής ίνας (bifurcated fiber optic) διαπερνά ένα πρίσμα όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 2.1, όπου αναλύει το φως στα διάφορα μήκη κύματος.





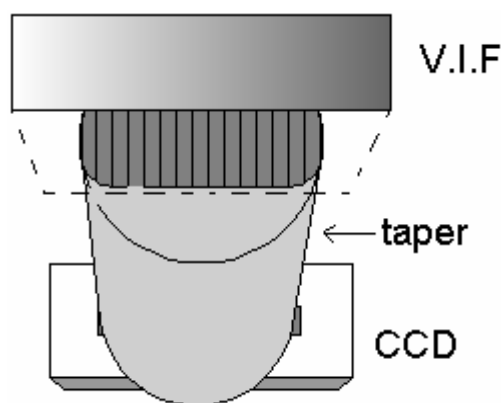
εικόνα 2.2

Στη συνέχεια το φως που εξέρχεται από το πρίσμα προβάλλεται πάνω στον ανιχνευτή φωτός (CCD) όπου η ένταση του φωτός μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Αυτή η μέθοδος παρόλο που έχει σχετικά εύκολη εφαρμογή έχει μικρό throughput με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η πειραματική λειτουργία του μοντέλου. Σ' αυτή τη μέθοδο η απώλεια στην ένταση του φωτός έγκειται στο γεγονός ότι το φως που περνά μέσα από το πρίσμα στην έξοδό του διαχέεται με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ανιχνευτή από το CCD χωρίς σημαντικές απώλειες. Γι' αυτό και θεωρήθηκε αυτή η μέθοδος για πειραματικούς σκοπούς άστοχη.

Η δεύτερη μέθοδος, “sandwich”, αποτελείται από τα εξής μέρη :

- Πηγή ακτινοβολίας (light source)
- Διακλαδούμενη οπτική ίνα (bifurcated fiber optics)
- Γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής (Variable Interference Filter)
- Fiber Bundle (Taper)
- Γραμμικός φωτοηλεκτρικός ανιχνευτής (Charge Coupled Device linear array)

Η μέθοδος αυτή υλοποιείται με το να εφαρμοστεί το φίλτρο ακριβώς πάνω στο taper και όλα αυτό πάνω ακριβώς στο linear CCD σε μορφή “sandwich”. Η αρχική ιδέα ήταν να εφαρμοστεί το φίλτρο ακριβώς πάνω στο CCD χωρίς ενδιάμεσα το taper, αλλά το φίλτρο που διαθέταμε ήταν πολύ μεγάλο σε σχέση με το φωτοευαίσθητο μέρος του ανιχνευτή που έπρεπε να εφαρμοστεί, με αποτέλεσμα να χρειαστούμε το taper, ένα σύνολο από οπτικές ίνες, που έχουν την δυνατότητα να προβάλουν το φίλτρο στον ανιχνευτή χωρίς πολύ σημαντικές απώλειες στην ένταση του φωτός. Παρακάτω, υπάρχει ένα στοιχειώδες σχεδιάγραμμα του οπτικού συστήματος που εφαρμόστηκε, εικόνα 2.3.



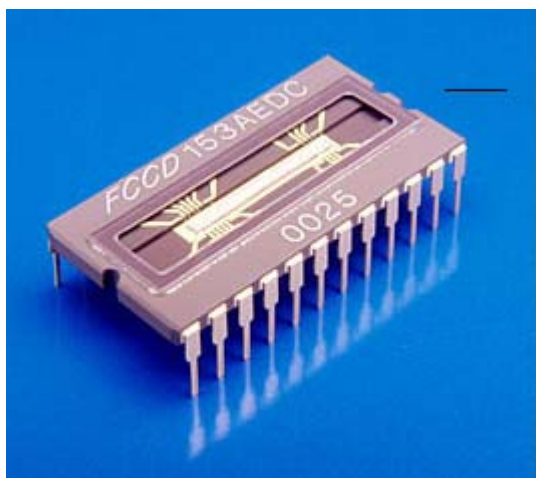
εικόνα 2.3

Το ηλεκτρονικό μέρος του φασματόμετρου βασίστηκε κυρίως στις προδιαγραφές λειτουργίας του γραμμικού ανιχνευτή (linear CCD) που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή του. Στο φασματόμετρο που κατασκευάσαμε χρησιμοποιήσαμε το CCD 153 της Fairchild το οποίο στην έξοδο του παράγει δυο video σήματα, εκ των οποίων το ένα αναλογεί στα μονά κελιά της φωτοευαίσθητης περιοχής και το άλλο στα ζυγά, διεξοδική αναφορά στο τρόπο λειτουργίας του θα ακολουθήσει παρακάτω. Εκτός από το CCD, σημαντικό ρόλο στο ηλεκτρονικό μέρος της εργασίας διαδραματίζει και ο μικροεπεξεργαστής DS2250 ο οποίος βοηθά στην επεξεργασία των δεδομένων που μας δίνει το CDD καθώς και την απεικόνιση τους στον υπολογιστή.

## **2.2 Ανάλυση των χαρακτηριστικών υπομονάδων του συστήματος**

### **2.2.1 CCD (Charge Couple Devices) arrays**

Τα CCD είναι ανιχνευτές φωτονίων, οι οποίοι μετατρέπουν το φωτεινό σήμα σε ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό σήμα. Τα περισσότερα CCD είναι φτιαγμένα από πυρίτιο (Si). Στο κρυσταλλικό πλέγμα του Si κάθε



άτομο είναι στενά συνδεδεμένο με τα γειτονικά του. Σε κάθε άτομο οι ενεργειακές στάθμες είναι διακεκριμένες. Στην περίπτωση του πλέγματος λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των ατόμων και των δυνάμεων που ασκούνται η κίνηση των ηλεκτρονίων γίνεται σε

σύνθετες τροχιές που ανήκουν σε περισσότερα από ένα άτομα. Έτσι η κάθε στάθμη διασπάται σε περισσότερες και λόγω του μεγάλου αριθμού των ατόμων του πλέγματος δημιουργούνται ζώνες (μέσα στις ζώνες οι στάθμες είναι διακεκριμένες όμως λόγω του μεγάλου τους αριθμού δημιουργούν την έννοια της ζώνης). Έτσι σε κάθε κρύσταλλο διακρίνουμε την ζώνη σθένους (εξωτερικά ηλεκτρόνια), την απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη (στην οποία δεν υπάρχουν ενεργειακές στάθμες και έτσι δεν φιλοξενεί κανένα ηλεκτρόνιο) και την ζώνη αγωγιμότητας στην οποία εισέρχονται τα ηλεκτρόνια όταν αποκτήσουν ικανή ενέργεια ώστε να διασπάσουν τους ομοιοπολικούς δεσμούς (η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη ή ίση με το εύρος της απαγορευμένης ζώνης  $E_g$  bandgap). Για τους ημιαγωγούς πυριτίου το πλάτος της απαγορευμένης ζώνης είναι  $E_{go} = 1.2 \text{ eV}$  (στους  $0^\circ \text{ K}$ ). Η  $E_g$  ελαττώνεται

με την αύξηση της θερμοκρασίας  $T$  στον κρύσταλλο σύμφωνα με την σχέση

$$E_g = E_{go}*(1-CT) \quad (1)$$

όπου  $C$  σταθερά που εξαρτάται από το υλικό. Όταν στους ενδογενείς (χωρίς προσμίξεις) κρυστάλλους  $Si$  τα ηλεκτρόνια σθένους αποκτήσουν ικανή ενέργεια  $E_g$  (λόγω απορρόφησης των φωτονίων στο CCD ή λόγω αύξησης της θερμοκρασίας) ανέρχονται στην ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι σχηματίζονται ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και των οπών  $n_i=p_i$  δίνεται από την σχέση

$$n_i=p_i=AT^{3/2}e^{-E_{go}/2KT} \quad (2)$$

όπου η σταθερά  $A$  εξαρτάται από το υλικό. Έτσι τα ηλεκτρόνια κινούνται στην ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές στην ζώνη σθένους και κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου στον κρύσταλλο γεννιέται ηλεκτρικό ρεύμα.

Στην περίπτωση των CCD η ενέργεια στα ηλεκτρόνια παρέχεται ως ενέργεια φωτονίων. Έτσι είναι ανιχνεύσιμα εκείνα τα φωτόνια για τα οποία ισχύει η σχέση  $h\nu > E_g$  ή  $\lambda < h\nu/E_g$  και έτσι καθορίζεται και η  $\lambda_{max}$  τιμή ανίχνευσης (το  $E_g$  γενικά εξαρτάται από την απόσταση των ατόμων στον κρύσταλλο όσο μεγαλύτερη η απόσταση τόσο μικρότερο το  $E_g$ ).

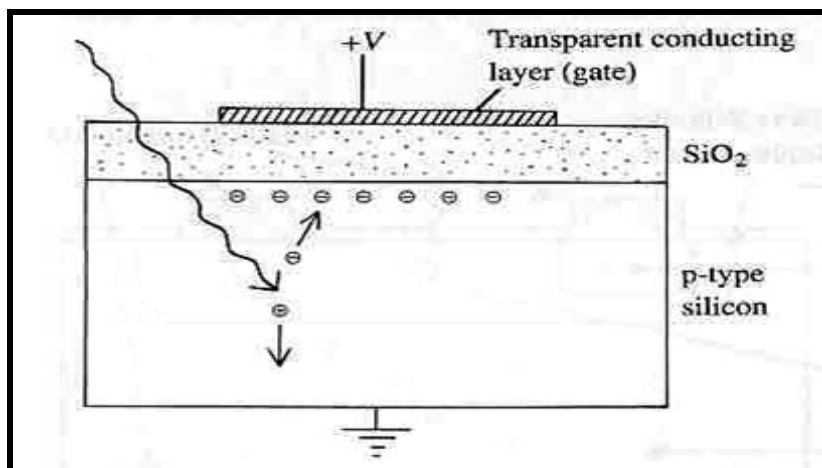
Για να επιτευχθεί αύξηση στο  $\lambda_{max}$  των ανιχνεύσιμων φωτονίων χρησιμοποιούνται εξωγενείς κρύσταλλοι (μη αμιγείς κρύσταλλοι με προσμίξεις), στους οποίους τα άτομα των προσμίξεων λειτουργούν είτε ως δότες ηλεκτρονίων (ημιαγωγοί τύπου  $n$ ), είτε ως αποδέκτες ηλεκτρονίων (ημιαγωγοί τύπου  $p$ ). Η αγωγιμότητα στους εξωγενείς ημιαγωγούς οφείλεται στους φορείς πλειονότητας (ηλεκτρόνια ή οπές

λόγω των προσμίξεων) και όχι στα ηλεκτρόνια του ενδογενούς κρυστάλλου.

Το πυρίτιο έχει τέτοιο  $E_g$  ώστε με το CCD μπορούμε να ανιχνεύσουμε φωτόνια με  $\lambda > 400nm$ . Η αρχή λειτουργίας του CCD για την παραγωγή μίας εικόνας συνοψίζεται στις εξής τέσσερις διαδικασίες :

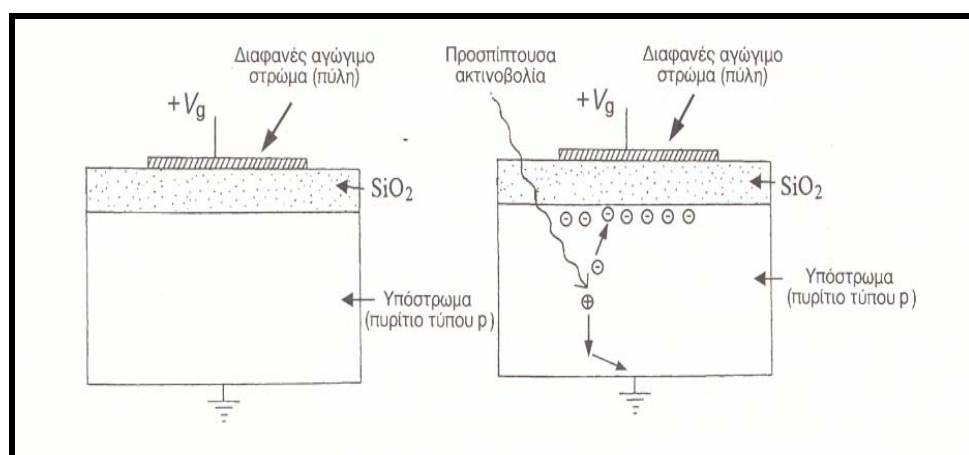
- Στην διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού φορτίου βάση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου
- Στην διαδικασία συλλογής των ηλεκτρονίων
- Στην διαδικασία μεταφοράς του φορτίου
- Στην διαδικασία μετατροπής του φορτίου σε τάση

Το CCD αποτελείται από στοιχειώδης οπτικούς ανιχνευτές (εικόνα 2.4). Το φως διέρχεται μέσω της διάταξης των πυλών και ενός οξειδωμένου ημιαγωγίμου στρώματος σε ένα στρώμα  $Si$ . Έτσι βάσει της προαναφερθείσας διαδικασίας (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) δημιουργούνται τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας των οποίων ο ρυθμός παραγωγής ανά μονάδα όγκου ισούται με το γινόμενο της πιθανότητας διέγερσης ενός ηλεκτρονίου από φωτόνιο, επί του οπτικού συντελεστή απορρόφησης επί τον αριθμό των φωτονίων που προσπίπτουν στον κρύσταλλο ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας.



εικόνα 2.4 : Στοιχειώδης Οπτικός Ανιχνευτής

Ας θεωρήσουμε τον ανιχνευτή (εικόνα 2.5) που αποτελεί μια ολοκληρωμένη MOS δομή (METAL OXIDE SEMICONDUCTOR ) και έχει ημιαγωγό τύπου p.



εικόνα 2.5: Λειτουργία MOS ολοκληρωμένης δομής

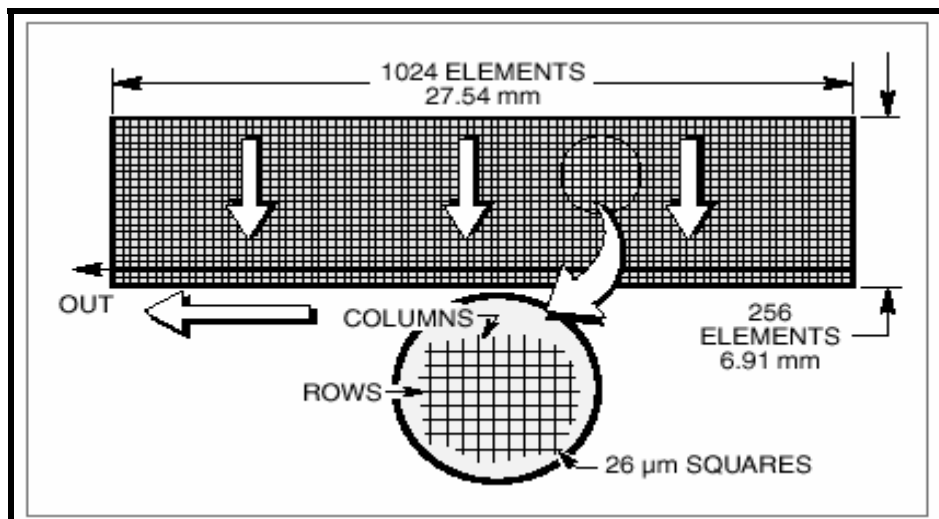
Αν εφαρμοστεί στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο θετική διαφορά δυναμικού τότε οι οπές, που αποτελούν τους φορείς πλειονότητας του ημιαγωγού απωθούνται από τον οξειδωμένο ημιαγωγίμο στρώμα με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μια περιοχή συσσώρευσης των ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας). Η περιοχή αυτή με τα παραγόμενα ‘εγκλωβισμένα’ ηλεκτρόνια ορίζουν το πηγάδι δυναμικού (Potential well). Το δυναμικό αυτής της περιοχής συσσώρευσης ονομάζεται δυναμικό κυψελίδας. Η τιμή του δυναμικού αυτού κυμαίνεται θεωρητικά από μηδέν (πρακτικά δεν είναι ποτέ μηδέν λόγω θερμοιονικής εκπομπής και ακτινοβολίας περιβάλλοντος) μέχρι μια μέγιστη τιμή, την τιμή κορεσμού. Όταν το σύστημα φτάσει σε κατάσταση σταθεροποίησης η τιμή του επιφανειακού δυναμικού γίνεται  $\Phi_{sf}$  ενώ η τιμή  $\Phi_{so}$  αντιστοιχεί στην αρχική κατάσταση

όταν η κυψελίδα ήταν άδεια. Για να φτάσει το σύστημα από την αρχική τιμή στην τελική μεσολαβεί χρόνος  $T_i$  (χρόνος κορεσμού) που δίνεται από την σχέση

$$T_i = (Vg * Cox) / J_i \quad (3)$$

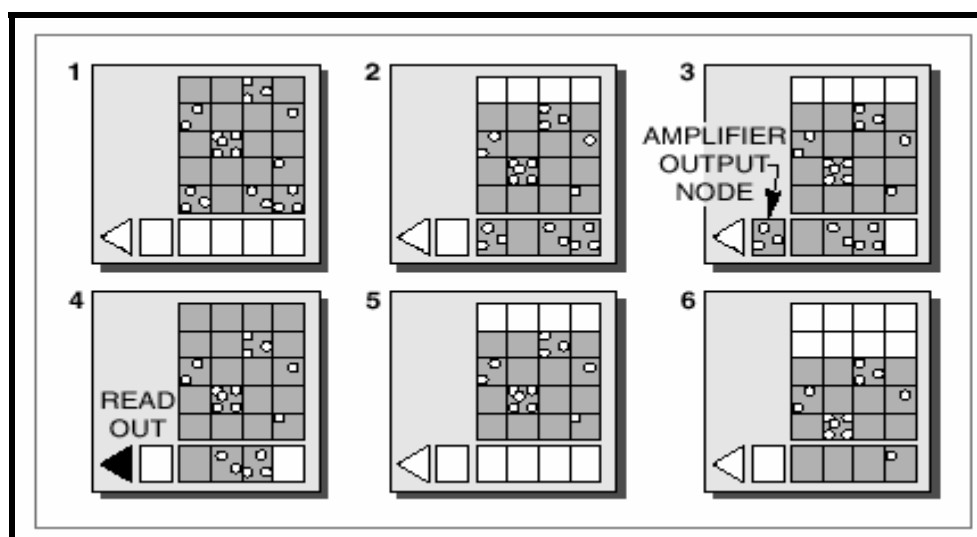
όπου  $Vg$  το δυναμικό πύλης,  $Cox$  η χωρητικότητα του οξειδίου ανά μονάδα επιφάνειας και  $J_i$  το συνολικό ρεύμα διαμέσου της κυψελίδας. Ο χρόνος κορεσμού αποτελεί σημαντική παράμετρο για το CCD επειδή εκφράζει την χρονική διάρκεια στην οποία μπορεί να αποθηκεύσει η συσκευή πριν έλθει σε κορεσμό και καθορίζει το minimum στην συχνότητα λειτουργίας. Επίσης ο χρόνος  $T_i$  μας δίνει και το μέγιστο χρόνο έκθεσης των ανιχνευτικών κυψελίδων στα φωτόνια, επειδή για μεγαλύτερους χρόνους δημιουργεί ασάφεια στην λαμβανόμενη εικόνα.

Μέχρις στιγμής παρακολουθήσαμε την διαδικασία της μετατροπής του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό φορτίο και την συλλογή του. Θα ακολουθήσει η διαδικασία της ανάγνωσης των φορτίων που γίνεται μέσω δυο καταχωρητών ολίσθησης ενός παράλληλου και ενός σειριακού (εικόνα 2.6).



εικόνα 2.6: Δομή του CCD

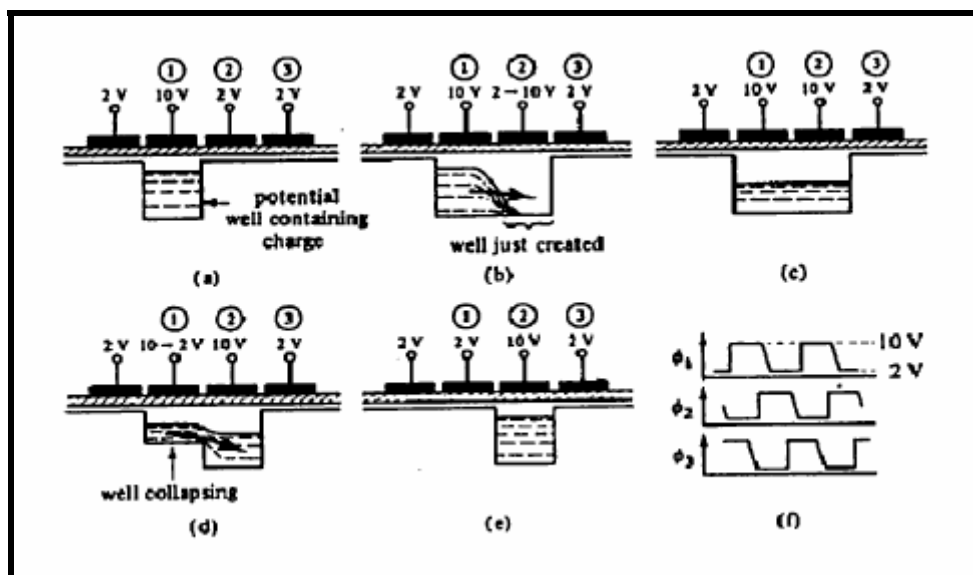
Ο παράλληλος καταχωρητής είναι μια δισδιάστατη διάταξη από pixels καθένα ικανό να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο που παράχθηκε από φωτόνια. Τα pixel είναι τετράγωνα, συνήθως 6-30μm και η προτιμητέα γι αυτά γεωμετρία είναι η τετραγωνική για να υπάρχει συμμετρική χωρικά δειγματοληψία. Ο σειριακός καταχωρητής, είναι ένα μονοδιάστατο CCD και οδηγεί στον ενισχυτή εξόδου (εικόνα 2.7).



εικόνα 2.7 : Διαδικασία Ανάγνωσης με Καταχωρητές Ολίσθησης 1

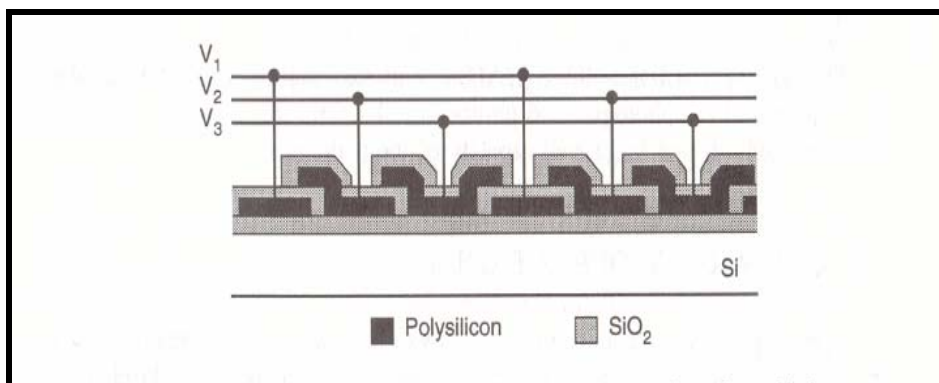
Μια απλοποιημένη διάταξη μεταφοράς του ηλεκτρικού φορτίου από κυψελίδα σε κυψελίδα φαίνεται στο (εικόνα 2.8).





εικόνα 2.8: Μεταφορά φορτίου μέσω τριφασικής διάταξης

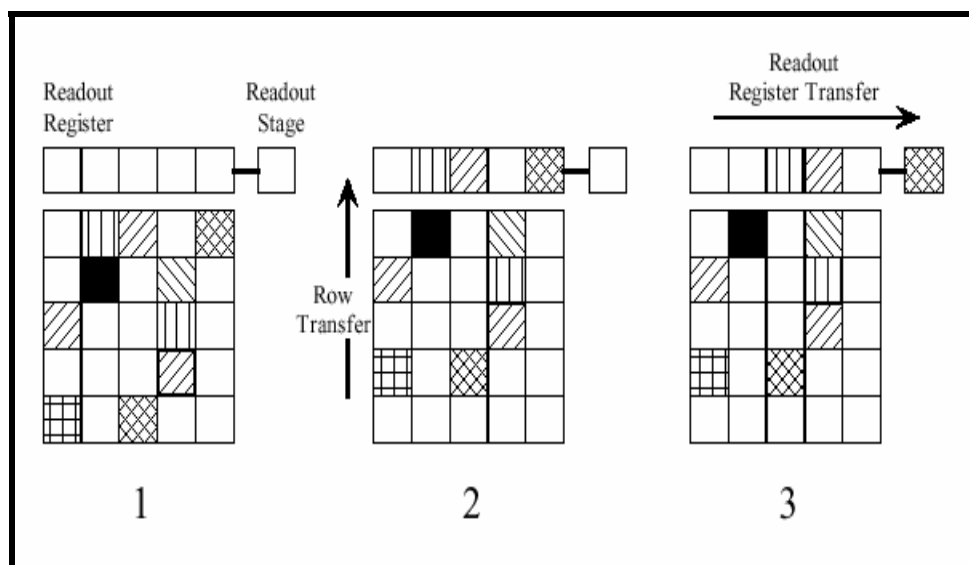
Όπως φαίνεται παραπάνω η μεταφορά γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά. Σε κάθε κυψελίδα εφαρμόζεται δυναμικό, μέσω μιας τριφασικής διάταξης πυλών που στην πραγματικότητα αλληλοεπικαλύπτονται (εικόνα 2.9).



εικόνα 2.9 : CCD τριών φάσεων με αλληλοεπικάλυψη των πυλών

Με κατάλληλη επιλογή των παλμών κάθε φορτίο μεταφέρεται. Η μεταφορά δεν γίνεται κατά μήκος της μεσοεπιφάνειας  $Si$  και  $SiO_2$  αλλά κατά μήκος ενός αγωγίμου καναλιού κάτω από την επιφάνεια αυτή, το οποίο είναι απαλλαγμένο από παγίδες φορτίου (που προκύπτουν από την ασυνέχεια του πλέγματος) και έτσι εξασφαλίζεται η μεταφορά.

Παρακάτω (εικόνα 2.10) παρουσιάζεται η διαδοχική μεταφορά σειρών από pixel σειριακό καταχωρητή. Κάθε στήλη του παράλληλου καταχωρητή ισοδυναμεί με την διάταξη της (εικόνα 2.9). Έτσι τα pixel της πρώτης γραμμής μεταφέρονται στον σειριακό και αδειάζει η κατώτερη γραμμή αφού όλα έχουν μεταφερθεί προς τα πάνω.



εικόνα 2.10: Διαδικασία Ανάγνωσης με Καταχωρητές Ολίσθησης 2

Στον σειριακό καταχωρητή τα φορτία μεταφέρονται σειριακά στο output note για γίνει η επεξεργασία του σήματος αφού αυτό έχει ενισχυθεί. Το κανάλι μεταφοράς που περιγράφηκε προηγούμενος οριοθετεί κάθε στήλη pixels στον παράλληλο καταχωρητή, έτσι εμποδίζονται οι μεταναστεύσεις φορτίων από τα pixels των γειτονικών στηλών. Όταν αδειάσει ο παράλληλος καταχωρητής τότε μπορεί να γίνει νέα έκθεση του CCD και να επαναληφθεί η διαδικασία. Η παράμετρος CTE (Charge Transfer Efficiency-Ικανότητα μεταφοράς φορτίου) αποτελεί μέτρο της μεταφοράς των φορτίων στον σειριακό καταχωρητή (οι απώλειες είναι τόσο μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερο το μήκος

μεταφοράς των φορτίων). Η σημασία της τιμής της CTE είναι μεγάλη κυρίως σε περιπτώσεις χαμηλών επιπέδων φορτίου όπου μικρή απώλεια φορτίου θα οδηγήσει σε σημαντική απώλεια εικόνας. Επιστημονικών επιπέδου CCD παρουσιάζουν CTE περίπου 0.9999998 ενώ 1 είναι η τέλεια τιμή.

### **2.2.1.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ CCD**

#### **1. ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΘΟΡΥΒΟ (SIGNAL TO NOISE – SNR)**

Τα κυριότερα είδη θορύβου που εμφανίζονται κατά την χρήση του CCD είναι τα ακόλουθα:

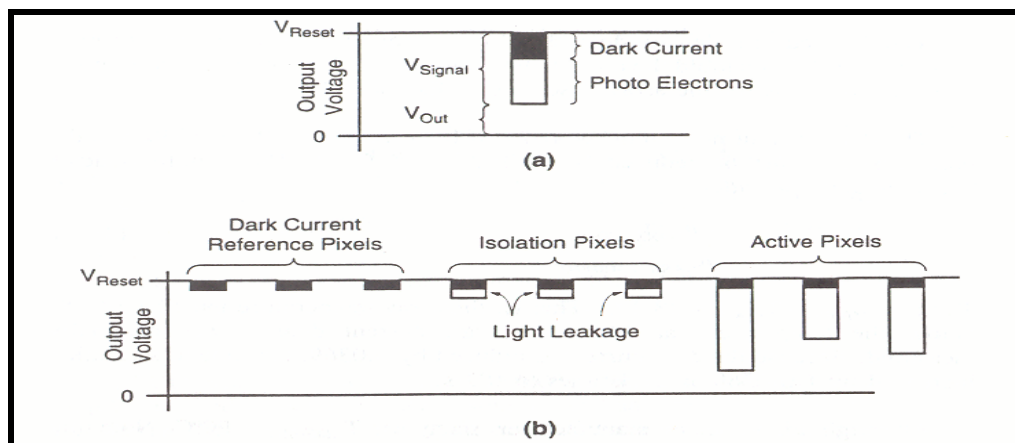
**A. Readout Noise ( $N_R$ ):** Εμφανίζεται κατά την διαδικασία ανάγνωσης του σήματος. Εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως:

- Από τον συμφυή με το CCD προενισχυτή, ο οποίος από μοντέλο σε μοντέλο CCD.
- Από το SCAN RATE : δηλαδή τη ταχύτητα με την οποία τα φορτία μεταφέρονται και διαβιβάζονται από τον προενισχυτή. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα μεταφοράς και ανάγνωσης, τόσο μεγαλύτερος ο θόρυβος (με σταθερές τις άλλες παραμέτρους).
- Από την θερμοκρασία. Για  $\theta \approx -60^\circ C$  ο θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά

**B. Dark Current Noise ( $N_D$ ):** Είναι αποτέλεσμα θερμικών φαινομένων στην μεσοεπιφάνεια  $Si-SiO_2$  στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Μέτρο του αποτελεί ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά pixel και δευτερόλεπτο σε συνθήκες σκότους. Ο θόρυβος  $N_D$  μπορεί να

ελαττωθεί σημαντικά με ψύξη του CCD στους  $-60^{\circ}\text{C}$  (θερμοηλεκτρική ψύξη) ή όταν έχουμε μεγάλους χρόνους έκθεσης στους  $-120^{\circ}\text{C}$  με χρήση υγρού αζώτου. Ο  $N_D$  μπορεί να ελαττωθεί σημαντικά με χρήση της μεθόδου MPP (Multi Pinned Phase), η οποία δεν απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες ψύξης για μεγάλους χρόνους έκθεσης. Στηρίζεται στην εφαρμογή σε όλες τις πύλες, του ίδιου δυναμικού. Έτσι εξαφανίζονται τα potential wells του CCD που είναι απαραίτητα για την λειτουργία του CCD. Αυτό εξισορροπείται από ένα ‘built in’ βήμα δυναμικού δημιουργεί πηγάδια ακόμα και όταν οι πύλες είναι στην ίδια τάση.

Ο σκοτεινός θόρυβος είναι προσμετρήσιμος χρησιμοποιώντας κάποια επιπλέον pixel στο τέλος του CCD. Τα pixel αυτά οριοθετούν ένα επίπεδο αναφοράς σκοτεινού ρεύματος (dark current reference signal). Το επίπεδο αυτό πρέπει να αφαιρεθεί από τα ενεργά pixels ώστε να προκύψει το καθαρό σήμα από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο(εικόνα2.11).



εικόνα 2.11:Ενεργά και σκοτεινά pixel για την μέτρηση του dark current noise

**Γ. Photon Noise or Photon Shot Noise** ( $N_{ph}$ ): Οφείλεται στην κβαντική φύση του φωτός και για τον λόγο αυτό δεν μπορεί να αποφευχθεί. Ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται από μια σταθερή πηγή

παρουσιάζει μια κατανομή Poisson και ομοίως και τα φωτοηλεκτρόνια που ανιχνεύονται από το CCD. Ο θόρυβος σε ηλεκτρόνια είναι ίσος με την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής του αριθμού των εκπεμπόμενων φωτονίων.

Για συνθήκες χαμηλού φωτισμού ο readout noise είναι σημαντικός ενώ για υψηλό φωτισμό μπορεί και να παραληφθεί.

Θα πρέπει να αναφερθεί και ο κοσμικός θόρυβος, λόγω των υψηλής ενέργειας κοσμικών σωματιδίων που χτυπώντας το Si δημιουργούν ηλεκτρόνια που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες και που μπορούν να χαλάσουν την σωστή ανίχνευση του σήματος. Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι για να υπερπηδηθεί το εμπόδιο (π.χ. χρήση temporal digital filters). Ακόμα υπάρχει ο θόρυβος Johnson λόγω κίνησης ηλεκτρονίων στα υλικά εξαιτίας μεταβολών στην θερμοκρασία. Οι δύο παραπάνω θόρυβοι δεν λαμβάνονται υπόψη στον καθορισμό του τελικού συνολικού θορύβου του CCD που δίνεται από την σχέση:

$$N_T = [N_R^2 + N_D^2 + N_{ph}^2]^{1/2}$$

Ο SNR εκφράζει τον λόγο του ωφέλιμου σήματος (image) προς τον θόρυβο που σχετίζεται με αυτή την μέτρηση. Έτσι  $SNR = \frac{NE}{NT}$  όπου NE ο αριθμός των ηλεκτρονίων του σήματος.

Ο SNR μπορεί να δοθεί ακόμα από την σχέση:

$$SNR = \frac{IxQExT}{\sqrt{NP^2 + T^2 x[IxQExND]^2}}$$

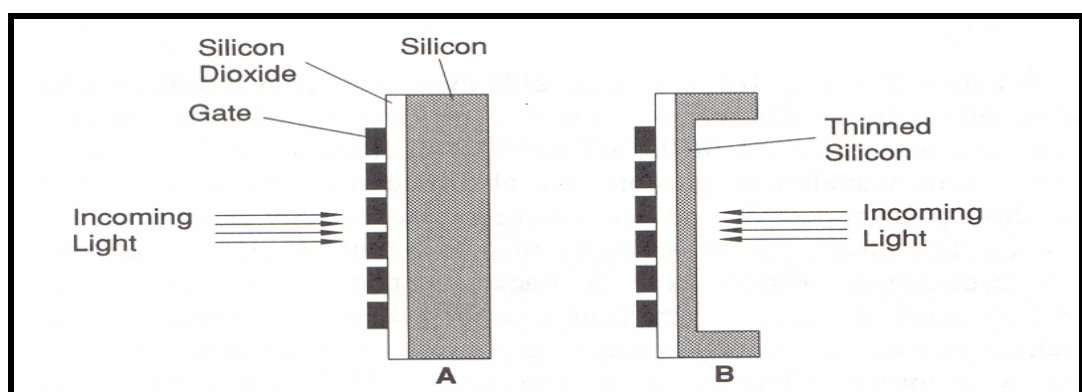
όπου I το επίπεδο φωτισμού, QE η κβαντική ικανότητα του CCD και T ο χρόνος ολοκλήρωσης

## 2. QUANTUM EFFICIENCY- ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικού φορτίου από προσπίπτοντα φωτόνια. Στο οπτικό παράθυρο 400-700nm, η QE του Si είναι μικρότερη από μονάδα και ποικίλει με το μήκος κύματος. Ορίζεται σαν τον λόγο του αριθμού των ηλεκτρονίων που παράγονται ανά απορροφούμενο φωτόνιο και παρουσιάζεται επί τοις εκατό. Εξαρτάται από:

- Τα χαρακτηριστικά του ημιαγωγικού υλικού (συντελεστή απορρόφησης φωτονίων, ενδογενή αποδοτικότητα, πάχος ημιαγωγού)
- Ενέργεια των φωτονίων πρόσπτωσης
- Τρόπο φωτισμού του CCD
- Χρήση ή όχι αντανakλαστικού στρώματος στην επιφάνεια του CCD

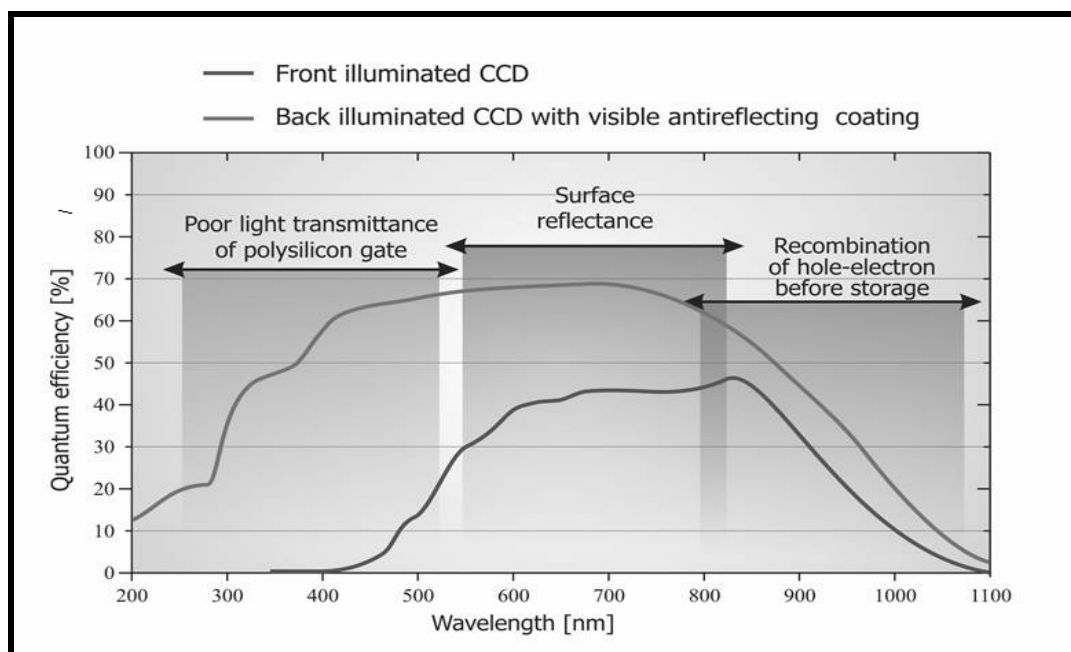
Όσο μεγαλύτερη η ενέργεια των φωτονίων πρόσπτωσης και με χρήση αντανakλαστικού η QE αυξάνεται. Η εξάρτηση της QE από τον τρόπο φωτισμού οφείλεται στην απορρόφηση που παρουσιάζουν οι διατάξεις των πυλών στο CCD (εικόνα 2.12).



εικόνα 2.12 : Front and back illuminated CCDs

Όταν το φως διέλθει στον ημιαγωγό χωρίς να περάσει από τις πύλες, τότε η ακτινοβολία θα φτάσει χωρίς εξασθένηση και έτσι το

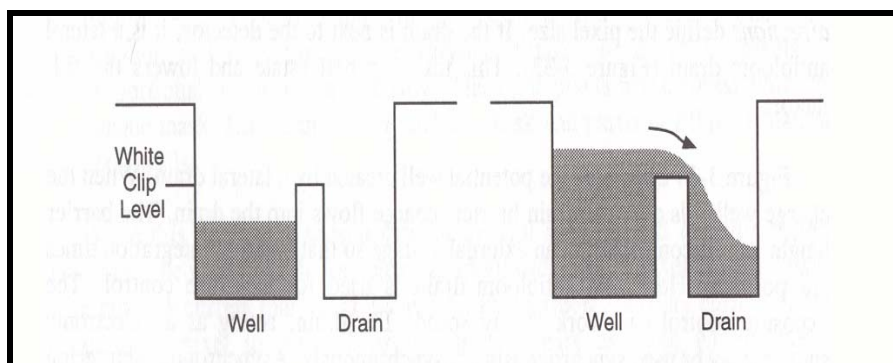
σύστημα θα παρουσιάζει μεγαλύτερη QE. Επίσης παρουσιάζεται το διάγραμμα QE-Wavelength για διάφορες περιπτώσεις (εικόνα 2.13).



εικόνα 2.13 : Απόδοση QE για CCD με διαφορετική φορά φωτισμού

### 3. DYNAMIC RANGE-ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Αποτελεί ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό ενός CCD. Εκφράζεται ως λόγος μεταξύ του φορτίου κορεσμού της κυψελίδας (full well saturation charge) προς τον θόρυβο που είναι συνδεδεμένος με το φορτίο αυτό. Το φορτίο κορεσμού καθορίζει και την χωρητικότητα της κυψελίδας (well capacity), που αποτελεί τον μέγιστο αριθμό των ηλεκτρονίων που μπορούν να περιληφθούν σε ένα πηγάδι δυναμικού (κυψελίδα), χωρίς να προκληθεί υπερχειλίση σε γειτονικές περιοχές (blooming). Για την αποφυγή της υπερχειλίσης η οποία οδηγεί σε αλλοίωση της εικόνας χρησιμοποιείται η τεχνική της δημιουργίας υποδοχής υπερχειλίσης (antibloom drain). Η υποδοχή τοποθετείται δίπλα στο πηγάδι δυναμικού κάθε pixel. Όσα φωτοηλεκτρόνια υπερχειλίζουν το πηγάδι δυναμικού πέφτουν στην υποδοχή και στιγμιαία μετακινούνται (εικόνα 2.14).



εικόνα 2.14 : Αποφυγή υπερχείλισης με χρήση υποδοχής

Μπορούμε να διακρίνουμε τριών ειδών χωρητικότητες: την χωρητικότητα που σχετίζεται με τα pixel στον παράλληλο καταχωρητή, (για pixel  $20 \times 20 \mu\text{m}$  μια τυπική w.c είναι 400.000 με 750.000 electrons), αυτήν που σχετίζεται με τον σειριακό καταχωρητή (w.c =250.000-900.000 electrons) και που στην ουσία καθορίζει την δυναμική κλίμακα και αυτήν που σχετίζεται με τον προενισχυτή. Επειδή η δυναμική κλίμακα ορίστηκε ως λόγος του w.c προς τον read out noise του συστήματος, εάν για παράδειγμα w.c=900.000 electrons και  $N_r=5\text{el RMS}$  τότε το  $\text{max D.R}=900.000/5=180.000\text{el}$ , δηλαδή περίπου 17.5bits. Το φορτίο κορεσμού είναι ανεξάρτητο του θορύβου του συστήματος και εμπειρική σχέση το δίνει 800 φορές μεγαλύτερο από την επιφάνεια ενός pixel όταν αυτή είναι εκφρασμένη σε  $\mu\text{m}^2$ . Εκτός από την ηλεκτρονική δυναμική κλίμακα ορίζεται και η intrascenic dynamic range ως λόγος του μεγαλύτερου προς το μικρότερο οπτικό σήμα που μπορεί να διαφοροποιηθεί στο ίδιο πλαίσιο (frame) και εξαρτάται όχι μόνο από τα ηλεκτρόνια της συσκευής αλλά και από τις οπτικές παραμέτρους λειτουργίας.

Η μεγαλύτερη κλίμακα είναι σημαντική για το CCD όταν για παράδειγμα γνωρίζουμε την ποσότητα του φωτός που θα ανιχνευτεί και θέλουμε χρήσιμη πληροφορία με την πρώτη προσπάθεια (λόγου βαθμού δυσκολίας ή κόστους επανάληψης).



Η D.R μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάγνωσης που θα δούμε στην συνέχεια.

#### 4. RESOLUTION-ANALYSIS

Στοιχειώδη μονάδα χωρικής ανάλυσης αποτελεί το pixel. Εκφράζει την μικρότερη διαχωρίσιμη από το CCD τιμή της μετρήσιμης ποσότητας (φορτίο). Εκφράζεται μέσω της MTF (Modulation Transfer Function-Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης), η οποία δίνει την ικανότητα του συστήματος να παρουσιάζει ευκρινώς μια εικόνα. Από την MTF μπορούμε να εκτιμήσουμε την συχνότητα (χωρική) (αριθμός απεικονιζόμενων δομών ανά χιλιοστόμετρο πάνω από την οποία η εικόνα αποσαφοποιείται (cut off frequency)).

Η MTF ορίζεται ως μεταβολή του λόγου μεταφοράς διαμόρφωσης, δηλαδή της διαμόρφωσης (διακύμανση έντασης) του σήματος εισόδου προς την διαμόρφωση του σήματος εξόδου. Για τον προσδιορισμό της MTF χρησιμοποιούμε πρότυπα patterns που περιέχουν πίνακες με την κλίμακα του γκρι και περιοχές με διαφορετική χωρική συχνότητα, με σκοπό τον προσδιορισμό της συχνότητας αναφοράς και τον έλεγχο της ομοιομορφίας της φωτεινότητας (μέσω περιοχών όμοιας πυκνότητας). Με την κλίμακα του γκρι καθορίζουμε τα όρια της οπτικής πυκνότητας, εντός των οποίων η μεταβολή της οπτικής πυκνότητας εξόδου είναι γραμμική συνάρτηση της οπτικής πυκνότητας εισόδου. Μέσα στα όρια αυτά θα πρέπει να κυμαίνονται οι μεταβολές του διαμορφωμένου σήματος εξόδου για όλες τις χωρικές συχνότητες. Η καμπύλη της MTF δίνεται σε σχέση με την χωρική συχνότητα.

Για να έχουμε μία επιθυμητή χωρική συχνότητα, πρέπει η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι ίση η μεγαλύτερη αυτής, για να μην

υπάρχει ασάφεια στο σήμα (φαινόμενο aliasing). Η συχνότητα αυτή είναι ως γνωστόν η συχνότητα Nyquist.

Αύξηση της χωρικής ανάλυσης σε ένα σύστημα (δηλαδή πολλά μικρά pixel) οδηγεί σε αυξημένο read out noise (μεγάλη συχνότητα ανάγνωσης) και έτσι σε ελάττωση του SNR. Ακόμα οδηγεί και σε ελάττωση του Dynamic Range.

Γίνεται σαφές ότι οι συνθήκες λειτουργίας ενός CCD καθορίζονται από τις ιδιαιτερότητες κάθε συγκεκριμένου προβλήματος.

Έτσι για παράδειγμα για απεικόνιση από transmission microscopy όπου το σήμα εισόδου και το διαπερνών είναι του ίδιου μεγέθους, για να γίνει ο διαχωρισμός τους απαιτείται κάμερα με μεγάλο dynamic range. Έτσι προτιμούνται CCD με μεγάλα pixel και κατά συνέπεια μεγάλη full well capacity, υστερώντας σε ανάλυση.

## 5. LINEARITY-ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ

Στην ιδανική περίπτωση η σχέση μεταξύ του επιπέδου του φωτός σε κάθε pixel και του ψηφιακού αριθμού που εκφράζει αυτό το επίπεδο (μετά από την διαδικασία ανίχνευσης, μεταφοράς και ενίσχυσης του), θα πρέπει να είναι γραμμική. Συνήθως η γραμμικότητα χάνεται σε περιπτώσεις υψηλής ταχύτητας ανάγνωσης (video cameras) λόγω περιορισμών τόσο στην έξοδο του CCD όσο και στο επίπεδο φωτισμού των pixel. Έτσι μικρές μεταβολές στην έξοδο και λόγω των ψηφιακών ηλεκτρονικών τμημάτων, χάνουν την γραμμικότητα τους σε σχέση με το επίπεδο φωτός στα pixel. Η γραμμικότητα θεωρείται δεδομένο όταν λαμβάνονται αριθμητικές αναλογίες μεταξύ απεικονίσεων, παρουσιάζονται διορθώσεις σκιασμού ή εφαρμόζονται γραμμικοί μετασχηματισμοί για την ανάλυση της απεικόνισης.

## 6. SENSITIVITY-ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ

Εκφράζει την ευαισθησία του CCD στην ανάδειξη μικρών μεταβολών φωτός. Είναι δηλαδή το σήμα εκείνο για το οποίο  $SNR=1$ . Για μικρότερα από αυτό σήματα ο θόρυβος του CCD υπερτερεί και αυτά δεν είναι διαχωρίσιμα. Η ευαισθησία εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

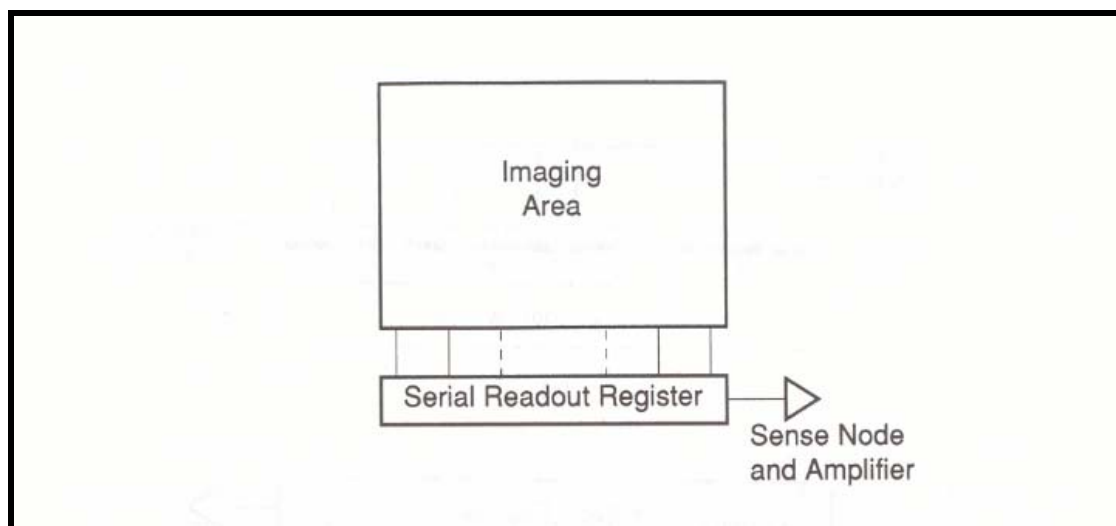
- Κβαντική ικανότητα συστήματος
- Συνολικό θόρυβο του συστήματος (σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού ο συνολικός θόρυβος καθορίζεται κυρίως από τον shot noise, ενώ σε υψηλά από τον read out noise).
- Μέγεθος των pixel (Resolution)

Οι δύο τελευταίοι παράγοντες είναι αλληλοεξαρτώμενοι δηλαδή αύξηση του μεγέθους του pixel οδηγεί σε αύξηση θορύβου, άρα για τον καθορισμό της ευαισθησίας θα πρέπει να γίνει συγκριτική θεώρηση των παραμέτρων και καθορισμός των συνθηκών του προβλήματος. Η ευαισθησία αποτελεί σημαντική παράμετρο

### **2.2.1.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ CCD**

Υπάρχουν τρεις βασικές αρχιτεκτονικές απεικόνισης:

#### **1 Full Frame-Ολικού πλαισίου (εικόνα 2.15)**

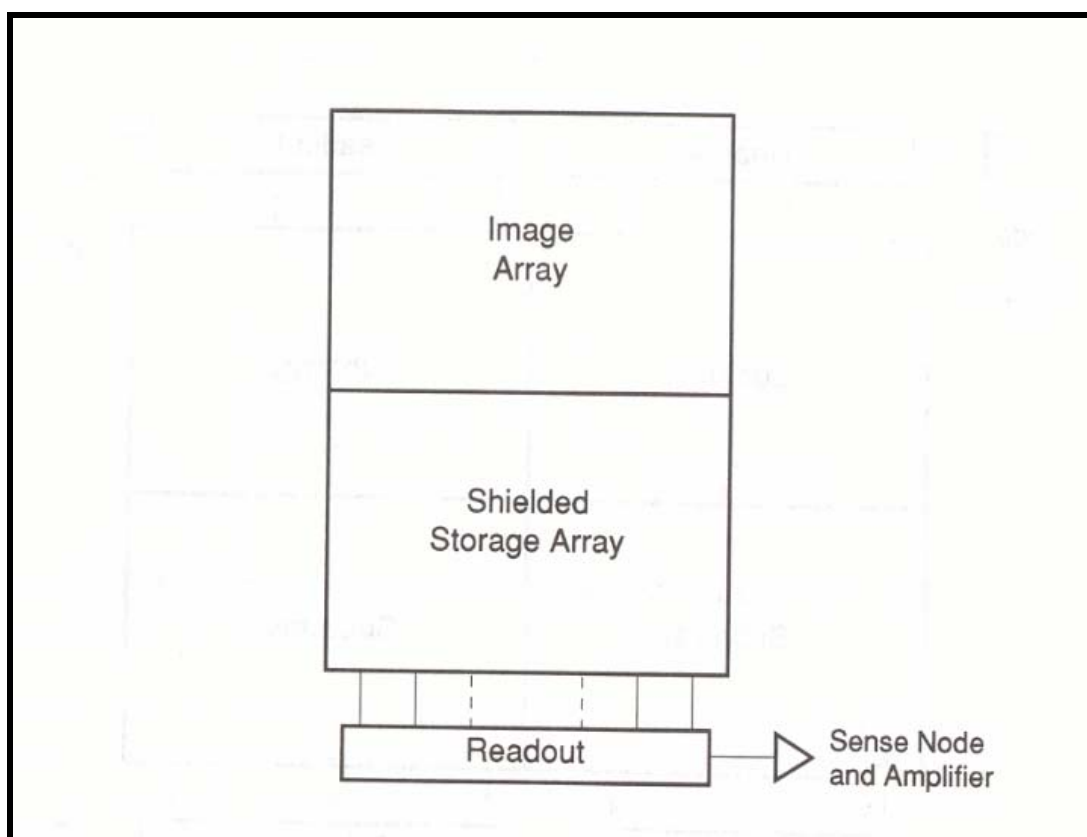


εικόνα 2.15 : Αρχιτεκτονική Full Frame

Αποτελεί την απλούστερη δομή. Περιλαμβάνει έναν απλό παράλληλο καταχωρητή στον οποίο προσπίπτουν τα φωτόνια. Σ' αυτόν μέσω της γνωστής διαδικασίας γίνεται η αποθήκευση των φορτίων και η μεταφορά τους προς το σειριακό καταχωρητή. Κατά την διάρκεια της ανάγνωσης χρησιμοποιείται μηχανικό διάφραγμα το οποίο διακόπτει την διαδικασία φωτισμού, όταν αυτή έχει ολοκληρωθεί. Όταν τελειώσει η διαδικασία ανάγνωσης των φορτίων, το διάφραγμα ανοίγει και αρχίζει νέα συσσώρευση φορτίων στον καταχωρητή. Λόγω του χρόνου που απαιτείται για το άνοιγμα και το κλείσιμο του διαφράγματος, καθώς και του χρόνου ανάγνωσης των πληροφοριών το ποσοστό του χρόνου έκθεσης του CCD περιορίζεται σημαντικά. Για δεδομένο επίπεδο ανάγνωσης pixel ο μόνος τρόπος να επιτευχθεί γρηγορότερο επίπεδο ανάγνωσης του πλαισίου είναι ελαττωθούν οι χρόνοι έκθεσης. Έτσι όμως το CCD δέχεται μικρότερο σήμα και η κάμερα χάνει σε ευαισθησία.

Επιπροσθέτως χάνονται οι πληροφορίες οι οποίες εμφανίζονται κατά την διάρκεια ανάγνωσης. Λόγω των ανωτέρω προβλημάτων έχουν προταθεί άλλες αρχιτεκτονικές λειτουργίας οι οποίες αναφέρονται στην συνέχεια.

## 2 Frame Transfer-Μεταφοράς πλαισίου



εικόνα 2.16 : Αρχιτεκτονική Μεταφοράς Πλαισίου

Σ' αυτή την διαρρύθμιση ο παράλληλος καταχωρητής χωρίζεται σε δύο επιμέρους καταχωρητές. Αυτός που βρίσκεται κοντά στον σειριακό αποτελεί καταχωρητή αποθήκευσης ενώ ο άλλος καταχωρητή λήψης εικόνας. Έτσι μόνο το μισό πλαίσιο εκτίθεται στο φως ενώ το άλλο μισό είναι καλυμμένο με μάσκα και χρησιμοποιείται για περιοδική αποθήκευση εικόνων πριν αυτές ανέβουν (σειριακά ) στον σειριακό καταχωρητή. Έτσι μια εικόνα που εστιάζεται στο image area του

πλαισίου μεταφέρεται σε μερικά msec στην storage area. Όταν η εικόνα ( με μορφή φορτίων) μεταφερθεί στον καταχωρητή αποθήκευσης τότε ο καταχωρητής απεικόνισης συλλέγει την επόμενη εικόνα, ενώ ο καταχωρητής αποθήκευσης διαβάζει την προηγούμενη και στην συνέχεια την ψηφειοποιεί (μέσω του σειριακού καταχωρητή). Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του frame transfer είναι τα εξής:

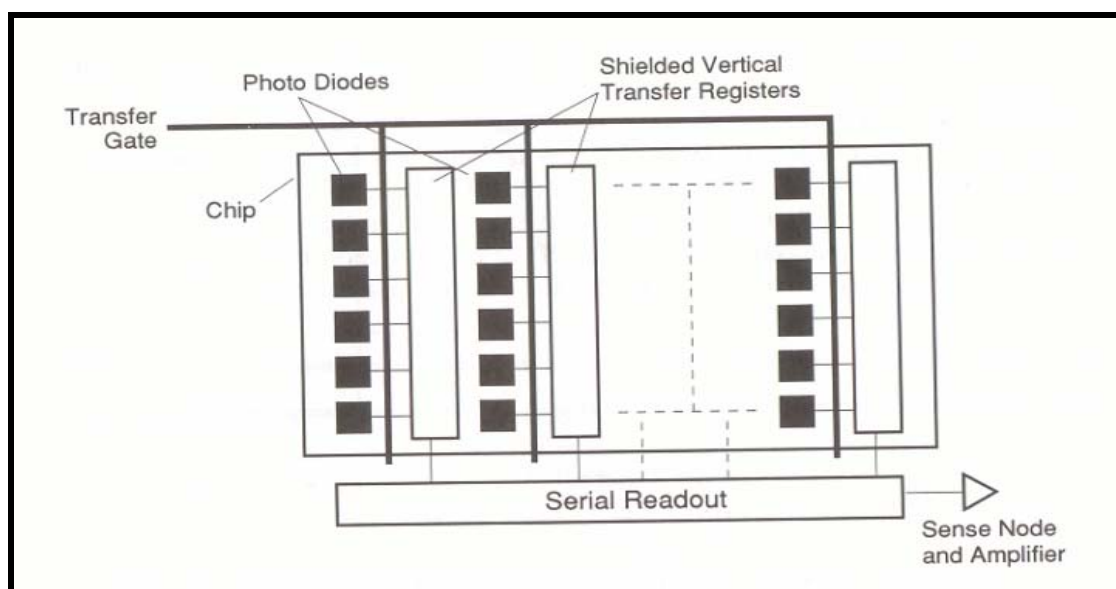
- Η συλλογή του φωτός γίνεται συνεχώς και έτσι δεν χάνονται πληροφορίες όπως στο full frame.
- Η ανάγνωση και συλλογή του σήματος γίνονται ταυτόχρονα. Έτσι για δεδομένη resolution και pixel rate το frame rate είναι μεγαλύτερο (pixel rate, frame rate, ρυθμοί ανάγνωσης pixel και πλαισίου αντίστοιχα)
- Δεν χρησιμοποιείται μηχανικό διάφραγμα. Έτσι το σύστημα έχει μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Τα βασικά μειονεκτήματα είναι:

- Η επιφάνεια συλλογής της πληροφορίας (image area) είναι η μισή σε σχέση με το full frame.
- Υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης smearing (φαινόμενο κατά το οποίο εμφανίζεται παραμόρφωση όταν πέσει φως στο CCD όταν γίνεται η μεταφορά στην περιοχή αποθήκευσης). Το κλάσμα του smearing δίνεται από το λόγο του χρόνου μεταφοράς στον καταχωρητή αποθήκευσης προς τον χρόνο έκθεσης μεταξύ των frame. Έτσι γρηγορότερη μεταφορά και μεγαλύτεροι χρόνοι έκθεσης ελαχιστοποιούν το φαινόμενο.

### 3 Interline Transfer

Ο παράλληλος καταχωρητής έχει υποδιαιρεθεί σε λωρίδες οι οποίες αποτελούν εναλλάξ λωρίδες από pixel όπου γίνεται η απεικόνιση του σήματος και καλυμμένες λωρίδες οι οποίες δεν λαμβάνουν φωτόνια αλλά λειτουργούν ως αποθηκευτές των φορτίων των pixel των γειτονικών λωρίδων. Στις στήλες των pixel τα φωτόνια με την γνωστή διαδικασία παράγουν φορτία. Κατά την διαδικασία του διαβιβασμού η εικόνα μεταφέρεται κάτω από τις masked λωρίδες σε κρυμμένους καταχωρητές αποθήκευσης. Στην συνέχεια τα φορτία μεταφέρονται κανονικά στον σειριακό καταχωρητή για να γίνει η τελική επεξεργασία του. Οι αρχιτεκτονικές μεταφερόμενων γραμμών (interline transfer) έχουν μικρή ευαισθησία, εφόσον ένα μεγάλο τμήμα κάθε pixel είναι καλυμμένο από τις γειτονικές επιπρόσθετες μάσκες. Βέβαια αποτελεί πλεονέκτημα η ταχύτητα ανάγνωσης του frame η οποία για συγκεκριμένο pixel rate είναι μεγάλη.



εικόνα 2.17 : Αρχιτεκτονική Interline μεταφοράς

### **2.2.1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ ΤΟΥ CCD**

Ανάλογα με το συγκεκριμένο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί σε σχέση με την απεικόνιση ενός φωτεινού σήματος χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι ανάγνωσης του CCD.

#### **1. Subarray Readout-Ανάγνωση υποπινάκων**

Όταν η περιοχή ενδιαφέροντος είναι μικρότερη από το μέγεθος του CCD τότε χρησιμοποιείται η ανάγνωση με υποπίνακες του σήματος. Όταν διαβάζεται ολόκληρος ο παράλληλος καταχωρητής τότε η απεικόνιση έχει τις διαστάσεις του frame και λέγεται full image(πλήρης απεικόνιση). Βάσει της ιδέας των υποπινάκων μπορούν να διαχωριστούν οι περιοχές του ενδιαφέροντος και να διαβαστούν σαν υποαπεικονίσεις. Έτσι μειώνεται ο αριθμός των pixel που μεταφέρονται και ψηφιοποιούνται, το οποίο οδηγεί σε μείωση του χρόνου ανάγνωσης του frame. Παρ' όλα αυτά οποιοσδήποτε αριθμός, αυθαίρετου μεγέθους υποπινάκων, μπορεί να διαβαστεί μετά από μια έκθεση.

#### **2. Binning-Πρόσθετη ανάγνωση**

Το binning αποτελεί διαδικασία συνδυασμού φορτίων από γειτονικά pixel σε υπέρ pixels κατά την διαδικασία ανάγνωσης. Το binning ελαττώνει την χωρική ανάλυση της απεικόνισης όμως αυξάνει την dynamic range λόγω αύξησης του μεγέθους του pixel άρα και την full well capacity. Επίσης αυξάνει και τον SNR λόγω ελάττωσης του read out noise εξαιτίας του μικρότερου αριθμού των χρησιμοποιούμενων pixel. Το binning χρησιμοποιείται αποτελεσματικά όταν δεν μας ενδιαφέρει η υψηλή ανάλυση σε έναν ή δύο άξονες.

#### **3. Time Delay Integration-Ανάγνωση με ολοκλήρωση του χρόνου καθυστέρησης**



Η τεχνική χρησιμοποιείται για απεικόνιση όταν η εικόνα κινείται με σταθερή (ή όχι) ταχύτητα, μονοδιάστατα. Έτσι η ταχύτητα κίνησης των σειρών των pixels στον παράλληλο καταγραφέα εξισώνεται με αυτή της κίνησης του αντικειμένου ώστε οι δύο κινήσεις να είναι συγχρονισμένες. Καθώς οι σειρές μεταφέρονται προς τον σειριακό καταχωρητή το φορτίο σε κάθε pixel αυξάνεται (αφού συνεχώς επιπροστίθενται σ' αυτό φωτόνια λόγω συγχρονισμού της κίνησης pixel-αντικειμένου). Όταν φτάσει στον σειριακό καταχωρητή τότε η διαδικασία εξελίσσεται με τον γνωστό τρόπο. Η όλη διαδικασία συνεχίζεται εφόσον υπάρχει κινούμενο αντικείμενο. Ο χρόνος έκθεσης του κάθε pixel καθορίζεται από την θέση του στον παράλληλο καταχωρητή καθώς και από την ταχύτητα της κίνησης του.

Η ανάγνωση με TDI παρέχει αύξηση στην ευαισθησία του CCD. Πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε με την σταδιακή αύξηση του φορτίου σε κάθε pixel να μην υπερβεί την τιμή κορεσμού. Η TDI βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην αστρονομία.

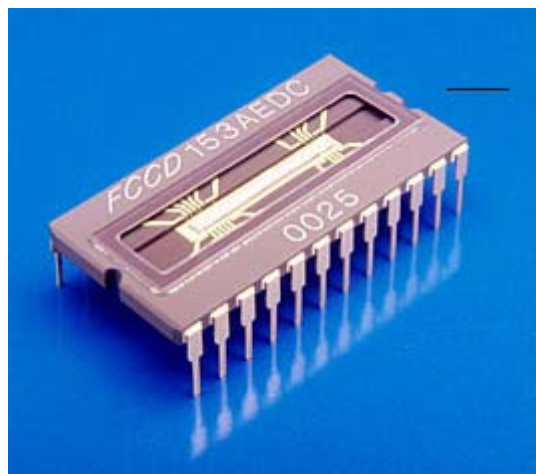
#### **4. High Speed Framing- Ανάγνωση με υψηλή ταχύτητα**

Πρόκειται για επέκταση της τεχνικής του frame transfer. Στην μέθοδο αυτή γίνεται κάλυψη ενός μεγάλου μέρους του frame και απεικόνιση μόνο σε μια μικρή περιοχή. Ο χρόνος έκθεσης καθορίζεται από ένα διάφραγμα μεγάλης ταχύτητας ή από ένα στροβοσκοπικό φως. Μετά την έκθεση το σώμα μεταφέρεται στην masked περιοχή αφήνοντας ελεύθερη την περιοχή για νέα έκθεση. Όταν γεμίσει ο παράλληλος καταγραφέας αρχίζει η διαδικασία ανάγνωσης. Η μέθοδος δίνει την δυνατότητα υψηλού ρυθμού λήψης εικόνων και το high speed framing rate μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις απαιτήσεις των μετρήσεων. Για παράδειγμα για λήψη φάσματος αποδιέγερσης φωσφόρου μπορούμε

να κανονίσουμε έτσι την χρονική ανάλυση , ώστε να έχουμε χρονική συμφωνία με τους χρόνους αποδιέγερσής του.

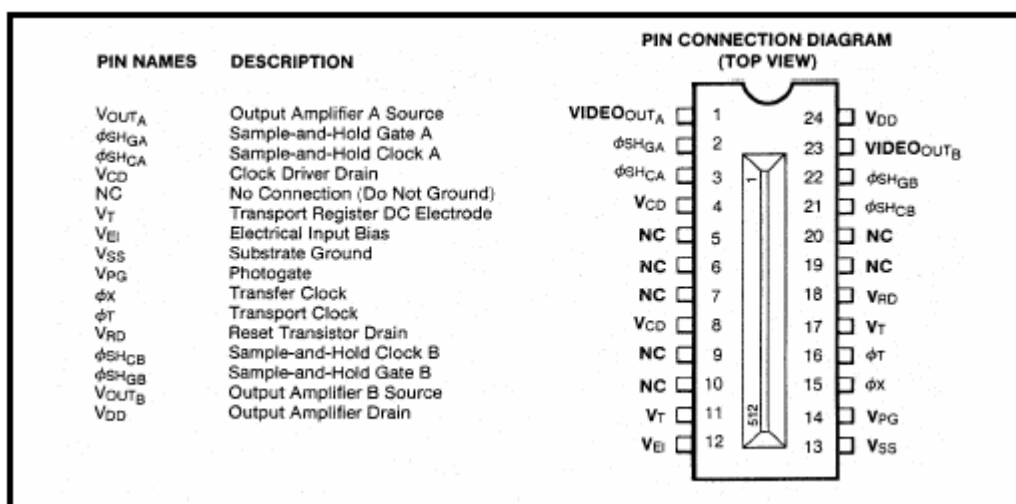
#### **2.2.1.4 CCD 153A – 152-Element High Speed Linear Image**

##### **Sensor (Fairchild Imaging)**



Σ' αυτή τη διπλωματική εργασία για την υλοποίηση του οπτικού φασματόμετρου χρησιμοποιήθηκε ως ανιχνευτής το CCD 153A της εταιρίας Fairchild imaging. Το CCD153A είναι ένας γραμμικός αισθητήρας εικόνας

αποτελούμενος από 512 φωτοστοιχεία, τα οποία έχουν μέγεθος  $13\mu\text{m}(0,51\text{mils}) \times 13\mu\text{m}(0,51\text{mils})$  και χρησιμοποιεί την τεχνική σύζευξης φορτίου (CCD). Έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές στο φάσμα του ορατού και στο κοντινό υπέρυθρο.



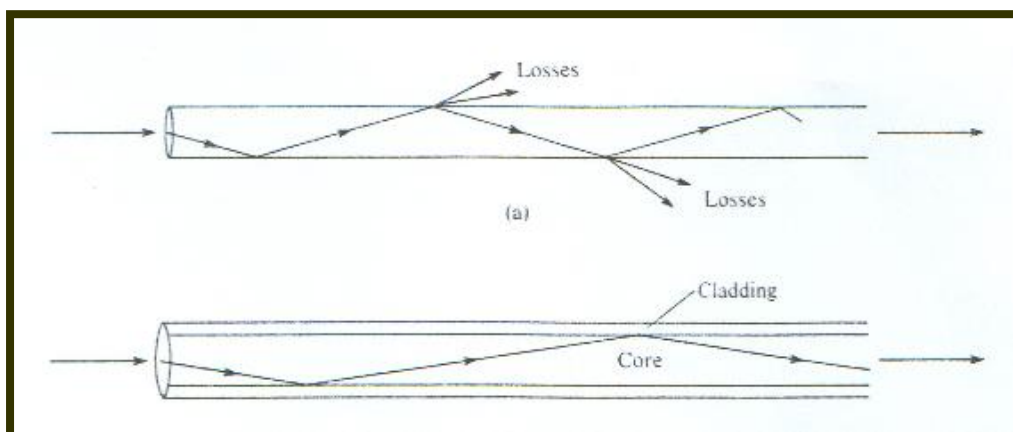
Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην συλλογή των ηλεκτρονίων μέσα στα φωτοστοιχεία (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο), μεταφορά αυτών και μετατροπή τους σε τάση. Τα φορτία πακέτου



### **2.2.2 Οπτικές Ίνες (Fiber Optics)**

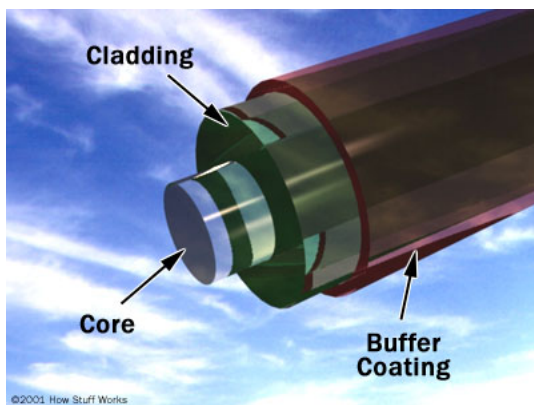
Μία οπτική ίνα είναι μία διαφανή ράβδος η οποία συνήθως φτιάχνεται από γυαλί ή καθαρό πλαστικό μέσα από το οποίο μπορεί το φως να διαδοθεί. Το φως ταξιδεύει μέσα στην ράβδο από τον εκπομπό μέχρι τον δέκτη και μπορεί εύκολα να ανιχνευτεί στην έξοδο της ράβδου. Οι απώλειες στις ίνες δεν είναι μεγάλες. Οι μοντέρνες οπτικές ίνες εκτός από την ράβδο γυαλιού (core) έχουν μία εξωτερική επένδυση (cladding) σαν επίστρωση της κύριας η οποία λειτουργεί σαν ανακλαστήρας. Οι δύο αυτές περιοχές της οπτικής ίνας έχουν διαφορετικά οπτικά χαρακτηριστικά.

Παρακάτω ακολουθεί διάγραμμα το οποίο δείχνει την διαφορά στην μετάδοση με ή χωρίς clad (ανακλαστήρα). Παρατηρούμε πως στην



χωρίς ανακλαστήρα οπτική ίνα οι απώλειες της ενέργειας του φωτός που ταξιδεύει είναι μεγάλες σε σχέση με την άλλη. Στην οπτική ίνα με ανακλαστήρα συμβαίνει το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης.

Η δομή μιας οπτικής ίνας και τα μέρη από τα οποία αποτελείται φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Core:** Γυάλινη συνήθως ράβδος που τοποθετείται στο κέντρο μέσα στην οποία ταξιδεύει το φως.

**Cladding:** Ανακλαστήρας που περιβάλλει τον πυρήνα.

**Buffer Coating:** Προστατευτικό υλικό το οποίο προστατεύει την ίνα από καταστροφή και την υγρασία.

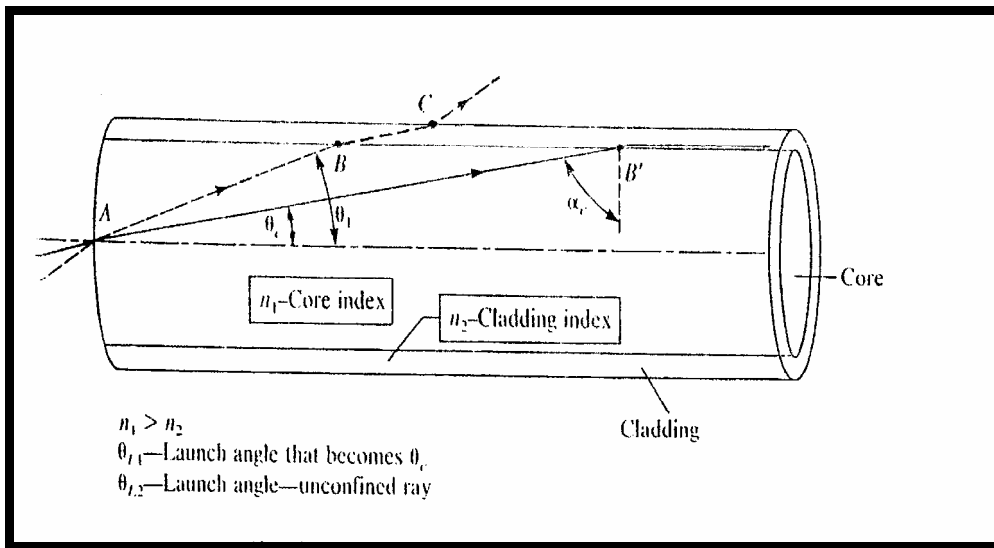
#### 2.2.2.1 Φαινόμενο ολικής ανάκλασης στην οπτική ίνα :

Η βασική δομή της οπτικής ίνας αποτελείται από τον πυρήνα (core) και την επένδυση (cladding). Τα δύο αυτά τμήματα έχουν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης, ο πυρήνας μεγαλύτερος από την επένδυση.

Για την ανάλυση της διάδοσης του φωτός στην οπτική ίνα θα θεωρήσουμε το φως ως ακτίνες (ray – tracing). Θα θεωρήσουμε επίσης ότι οι ακτίνες περνάνε από το κέντρο της οπτικής ίνας (meridional rays). Εκτός από αυτά υπάρχουν και τα skew waves τα οποία δεν περνούν από το κέντρο της οπτικής ίνας και αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι του φωτός που διαδίδεται σε μία οπτική ίνα. Επειδή η ανάλυση των meridional rays δίνει μία καλή προσέγγιση του τι πραγματικά συμβαίνει και επειδή η ανάλυση των skew waves είναι αρκετά πολύπλοκη, δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω.

Όπως φαίνεται παρακάτω, όταν οι ακτίνες εισέρχονται από τον αέρα στον πυρήνα (core) λόγω του διαφορετικού δείκτη διάθλασης οι ακτίνες διαθλώνται προσεγγίζοντας τον κεντρικό άξονα της οπτικής ίνας. Στην συνέχεια οι ακτίνες προσπίπτουν στην διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ πυρήνα και επένδυσης. Ανάλογα με την γωνία που εισέρχεται η ακτίνα στην οπτική ίνα μπορεί είτε να διαθλαστεί (διακεκομμένη

γραμμή) είτε να ανακλαστεί (συνεχής γραμμή) – φαινόμενο που ονομάζεται ολική ανάκλαση.



Για να συμβεί ολική ανάκλαση πρέπει η γωνία με την οποία εισέρχεται η ακτίνα στην οπτική ίνα να είναι ίση ή μικρότερη της κρίσιμης γωνίας η οποία ονομάζεται και κρίσιμη γωνία διάδοσης. Απαραίτητη επίσης προϋπόθεση είναι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα (core) να είναι μεγαλύτερος από αυτόν της επένδυσης (cladding). Για την κρίσιμη γωνία  $\theta_c$  ισχύει :

$$\sin \alpha_c = \cos \theta_c = n_2 / n_1$$

#### 2.2.2.2 Διάδοση των διαφορετικών modes(τρόπων) :

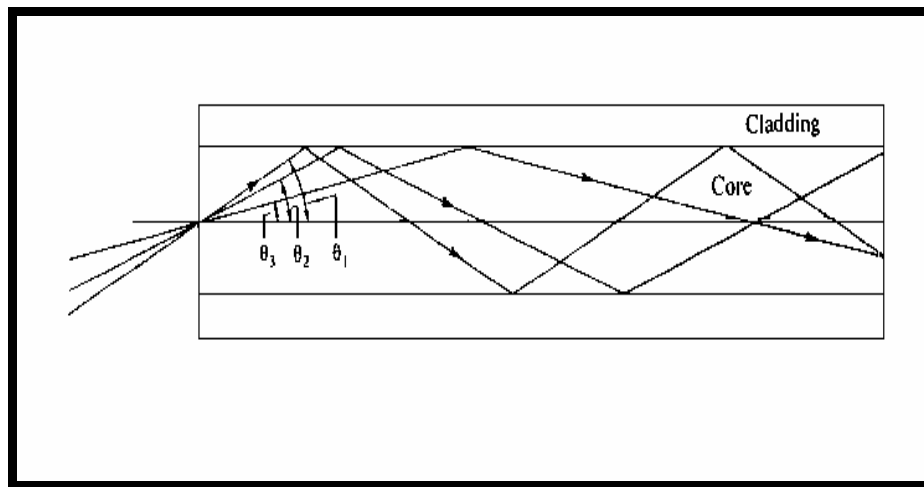
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για να διαδοθεί μια ακτίνα στην οπτική ίνα πρέπει να έχει γωνία μικρότερη από την κρίσιμη  $\theta_c$ . Έτσι για μία δεδομένη κρίσιμη γωνία μπορούν να υπάρξουν πολλές ακτίνες που μπορούν να διαδοθούν (σχήμα 2.18). Όλες αυτές οι ακτίνες καλούνται ως τρόποι διάδοσης (modes of propagation). Ο ολικός αριθμός τους αυξάνεται όσο αυξάνεται η κρίσιμη γωνία, η οποία εξαρτάται το πηλίκο των δεικτών διάθλασης του πυρήνα (core) και της επένδυσης (cladding)

έστω  $n_2 / n_1$ . Προκύπτει τελικά ότι ο αριθμός των modes μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το πηλίκο :

$(n_2 - n_1) / n_1 \equiv$  relative refractive index difference (σχετική διαφορά δεικτών διάθλασης)

όπου  $n_2$  : δείκτης διάθλασης επένδυσης (cladding)

$n_1$  : δείκτης διάθλασης πυρήνα (core)

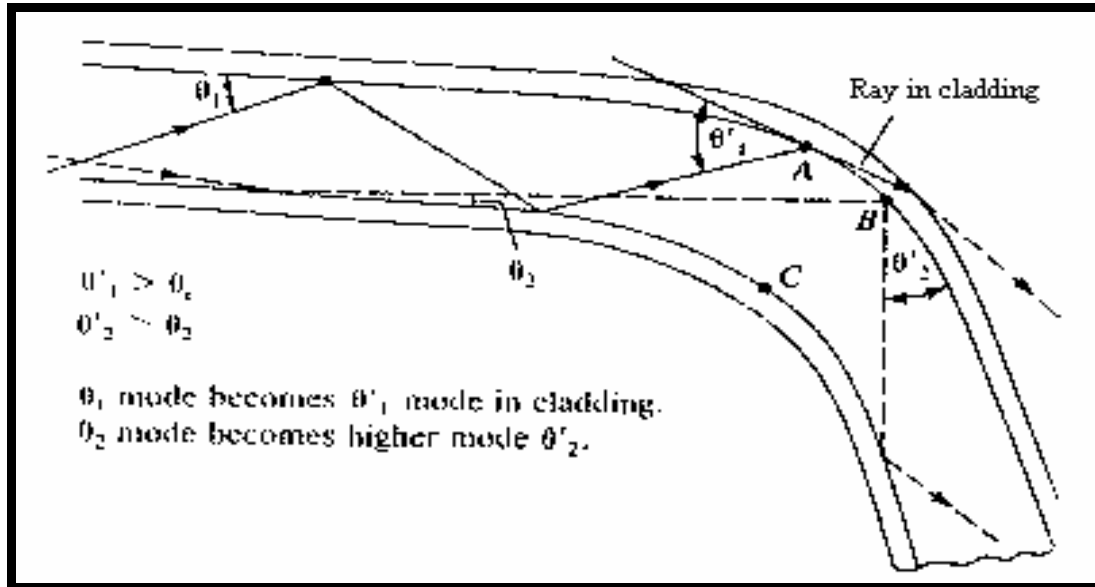


Σχήμα 2.18

Ανάλογα με την γωνία των modes τα διαχωρίζουμε σε high-order modes (με γωνίες κοντά στην κρίσιμη) και low-order modes (με γωνίες αρκετά μικρότερες της κρίσιμης). Στα high-order modes υπάρχουν αρκετές απώλειες, ειδικά όταν υπάρχουν κάμψεις (bends) στην οπτική ίνα, κάτι που θα αναλυθεί παρακάτω.

Τα modes με τα οποία διαδίδεται η ενέργεια του φωτός μέσα από την οπτική ίνα εξαρτώνται από τις γωνίες με τις οποίες εισέρχονται οι ακτίνες στην ίνα καθώς και από το φαινόμενο mode-coupling (μετατροπή ενός mode σε ένα άλλο) το οποίο οφείλεται κυρίως στις κάμψεις των οπτικών ινών. Η σχετική ενέργεια που μεταφέρει κάθε mode (mode distribution) θεωρούμε ότι εισέρχεται σε σταθερή κατάσταση (steady-state mode distribution) 1 με 2km μετά την αρχή της ίνας.

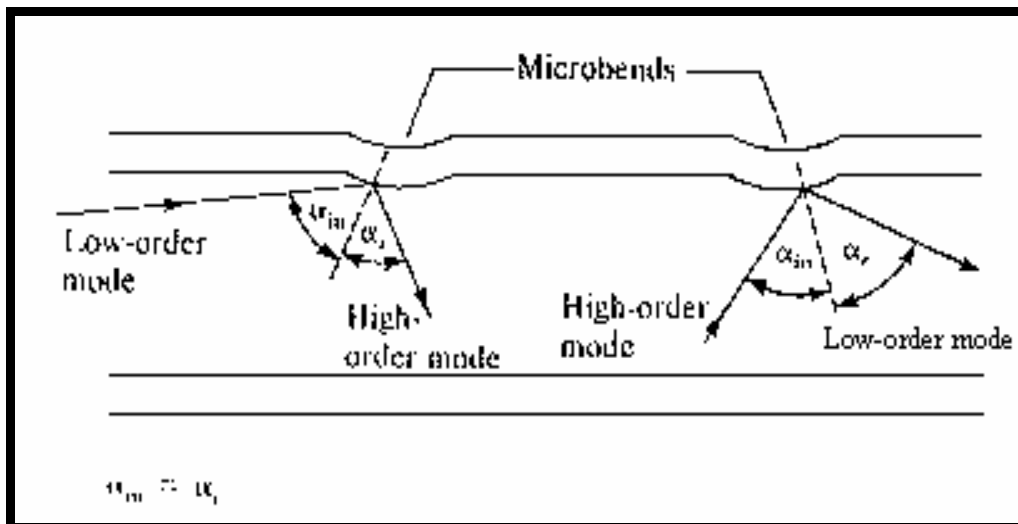
Το φαινόμενο του mode-coupling συμβαίνει τόσο από macrobends όσο και από microbends. Ακολουθούν δύο σχήματα στα οποία φαίνεται η μετατροπή ενός mode σε άλλο.



Σχήμα 2.19

Στο σχήμα 2.19 φαίνεται τι συμβαίνει σε δύο ακτίνες περνάνε από ένα σημείο καμπής (macrobend) μιας οπτικής ίνας. Η ακτίνα με τη συνεχή γραμμή διαδίδεται με μία γωνία  $\theta_1$ . Όταν προσεγγίζει το σημείο A η γωνία διάδοσής της γίνεται  $\theta'_1 > \theta_c > \theta_1$  και για αυτό και το συγκεκριμένο mode μετατρέπεται σε πολύ υψηλής τάξης (very high order mode) και τελικά χάνεται μέσω διάθλασης. Η ακτίνα με τη διακεκομμένη γραμμή διαδίδεται με μια γωνία  $\theta_2$ . Όταν προσεγγίζει το σημείο B η γωνία διάδοσής της γίνεται  $\theta_c > \theta'_2 > \theta_2$ . Και σε αυτή την περίπτωση πηγαίνουμε σε ένα mode υψηλότερης τάξης χωρίς όμως να έχουμε απώλειες.





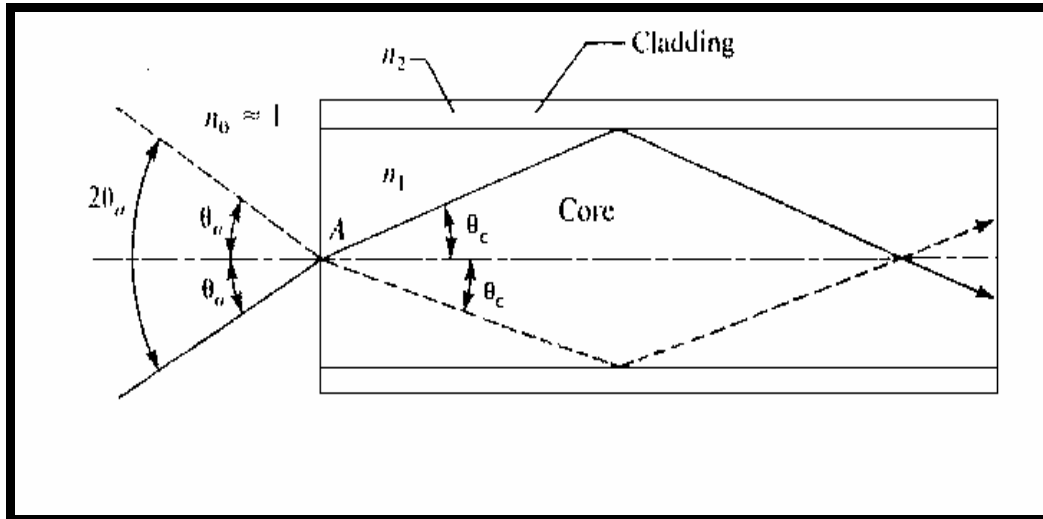
Σχήμα 2.20

Αντίστοιχα στο σχήμα 2.20 φαίνεται τι συμβαίνει σε μία ακτίνα που περνάει από ένα σημείο καμπής (microbend) μιας οπτικής ίνας. Η ακτίνα διαδίδεται με μία γωνία  $\alpha_1$  (συμπληρωματική της  $\theta$ ). Όταν προσεγγίζει το πρώτο σημείο καμπής η γωνία λόγω της ολικής ανάκλασης παραμένει σταθερή σε σχέση με την κάθετο πάνω στην καμπή, οπότε  $\alpha_{in} = \alpha_r$ . Σε σχέση όμως με την κάθετο στην οπτική ίνα η γωνία έχει μειωθεί (η γωνία  $\theta$  έχει αυξηθεί) οπότε και έχουμε πάει από ένα Low-order mode σε ένα High-order mode. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει στο δεύτερο σημείο καμπής οπότε και μεταβαίνουμε από ένα High-order mode σε ένα Low-order mode.

### 2.2.2.3 Γωνία υποδοχής (Acceptance Angle) και αριθμητικό άνοιγμα (Numerical Aperture):

Όπως αναφέραμε παραπάνω για να διαδοθεί μία ακτίνα μέσα στην οπτική ίνα πρέπει η γωνία με την οποία θα εισέλθει να είναι ίση ή μικρότερη της κρίσιμης γωνίας  $\theta_c$ . Λόγω του διαφορετικού δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα (core) και του αέρα από τον οποίο έρχεται

η ακτίνα, η γωνία  $\theta_a$  μειώνεται καθώς εισέρχεται στον πυρήνα επειδή ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι  $n_{air} \approx 1$  ενώ του πυρήνα  $n_{core} > 1$ .



Σχήμα 2.21

Έτσι από τον νόμο του Snell προκύπτει:

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_{core}} = \frac{n_{core}}{n_{air}} \Rightarrow$$

$$\sin \theta_a > \sin \theta_{core} \Rightarrow \theta_a > \theta_{core}$$

Έστω  $n_1 = \frac{n_{core}}{n_{air}}$  τότε προκύπτει:  $\sin \theta_a = n_1 \times \sin \theta_{core} \equiv \text{N.A.}$

(numerical aperture)

Το N.A. δίνεται επίσης από τον τύπο :  $\text{N.A.} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$

#### **2.2.2.4 Γενικά Χαρακτηριστικά και Απώλειες**

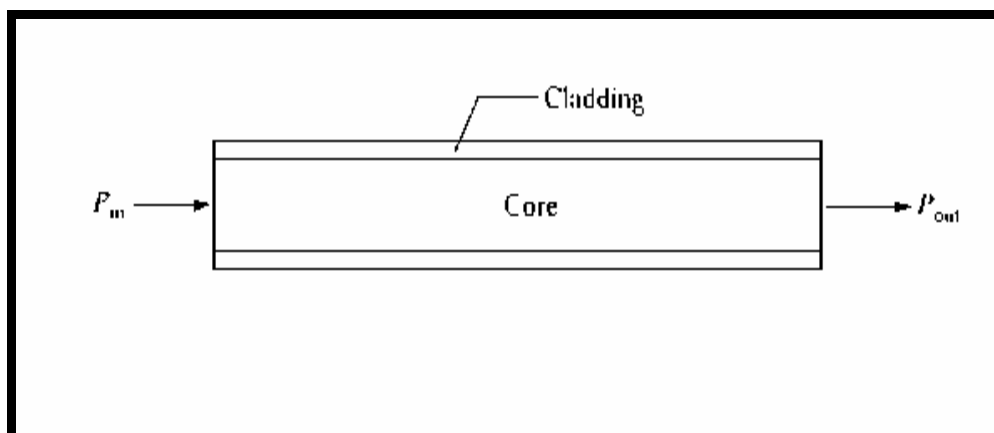
Γενικά, τα χαρακτηριστικά των οπτικών ινών εξαρτώνται τόσο από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των υλικών τους όσο και από το σχήμα και το μέγεθός τους. Μελετώντας τα χαρακτηριστικά αυτά θα αναφερθούμε κυρίως στις απώλειες των οπτικών ινών και στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτές.

Κύριοι λόγοι απωλειών στις οπτικές ίνες :

Οι κυριότεροι λόγοι για απώλειες στις οπτικές ίνες είναι:

- Απώλειες λόγω απορρόφησης από τα υλικά : Πρόκειται ουσιαστικά για τις απώλειες που συμβαίνουν λόγω απορρόφησης από το υλικό. Μπορούν να χωριστούν σε αυτές που οφείλονται στην αντίδραση (interacting) του φωτός με την μοριακή δομή του υλικού και σε αυτές που οφείλονται σε ανομοιογένειες του υλικού.
- Απώλειες λόγω της σκέδασης του φωτός : Το φως μπορεί να διαθλαστεί λόγω ανομοιογενειών του υλικού, λόγω ατελειών στην κατασκευή της ίνας και τέλος λόγω των μορίων του υλικού. Το διαθλόμενο φως δεν διαδίδεται στην οπτική ίνα αλλά χάνεται
- Απώλειες λόγω ακτινοβόλησης του φωτός σε σημεία καμπής (macrobends - microbends) : Η απώλεια αυτές οφείλονται στο γενικότερο σχήμα της οπτικής ίνας και σε τυχόν σημεία καμπής σε αυτήν.

Εκτός από τους παραπάνω λόγους στις απώλειες συμβάλουν οι συνδέσεις μεταξύ δύο οπτικών ινών καθώς και μιας οπτικής ίνας με άλλη συσκευή. Οι απώλειες στις οπτικές ίνες προσδιορίζονται από τον λόγο της ισχύος του φωτός στην έξοδο προς την ισχύ του φωτός στην είσοδο ( σχήμα 2.22)



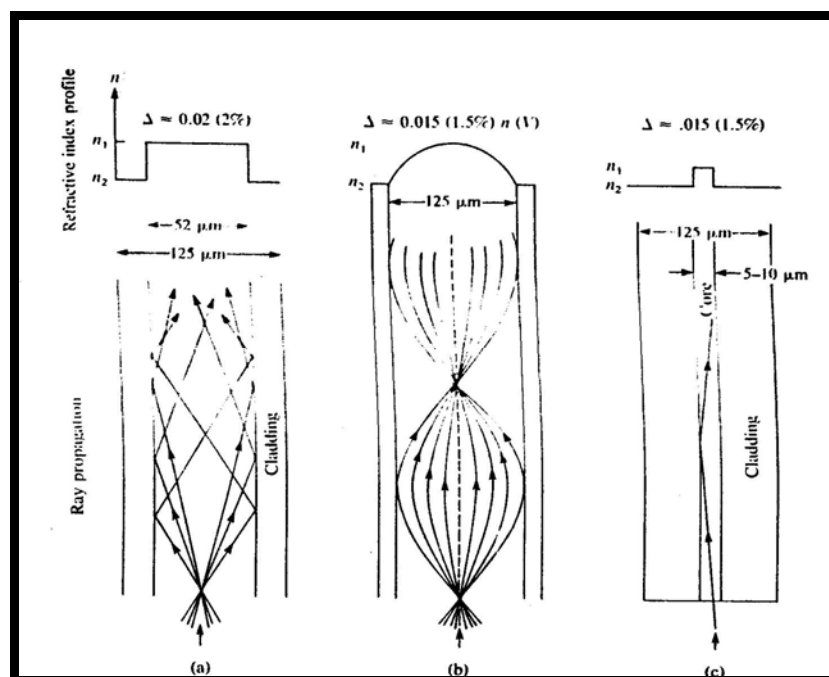
Σχήμα 2.22

Επομένως :  $Loss = P_{out}/P_{in}$  ή σε dBs :  $Loss_{dB} = 10 \times \log(P_{out}/P_{in})$

Γενικά οι απώλειες αυξάνονται με την απόσταση για αυτό και αναφερόμαστε σε αυτές σαν dBs/km.

### 2.2.2.5 Είδη Οπτικών Ινών

Σε αυτό το μέρος θα ασχοληθούμε με τις διάφορες οπτικές ίνες και κάποια από τα χαρακτηριστικά τους. Θα αναφερθούμε στις step-index οπτικές ίνες, στις graded-index, single-mode και άλλες. Η απλούστερη και μία από τις πιο πρόσφατες δομές των ινών είναι η multimode step-index. Δύο άλλες είναι οι graded-index και η single-mode step-index. Αυτές οι τρεις υλοποιούνται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.23

Οι single-mode ίνες έχουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά (υψηλότερο βαθμό διάδοσης δεδομένων και λιγότερες απώλειες), ενώ οι multimode έχουν τις χειρότερες. Αυτό δεν σημαίνει ότι χρησιμοποιούμε πάντα τις single-mode. Είναι πιο ακριβές και πιο δύσκολες στην

χρησιμοποίηση τους λόγω του μεγέθους τους (ο πυρήνας έχει διάμετρο μόνο 5-10μm).

▪ Step-index fibers

Οι step-index είναι οπτικές ίνες στις οποίες ο δείκτης διάθλασης αλλάζει σύμφωνα με μία βηματική συνάρτηση από τον πυρήνα μέχρι το εξωτερικό περίβλημα. Είναι πιο μεγάλος στον πυρήνα και πιο μικρός στο εξωτερικό. Από τα σχήματα 2.23(α) και 2.23(β) παρατηρούμε πως δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο step-index οπτικών ινών παρά μόνο στο μέγεθος. Οι συνέπειες λόγω της διαφοράς μεγέθους είναι ουσιαστικές.

Στις multimode step-index οπτικές ίνες (σχήμα 5-1α) το φως διαδίδεται με πολλούς τρόπους. Ο αριθμός των τρόπων διάδοσης (modes),  $M_N$  αυξάνεται με την αύξηση του αριθμητικού ανοίγματος N.A. Για μεγάλο αριθμό τρόπων διάδοσης το  $M_N$  μπορεί να γραφτεί ως :

$$M_N = V^2 / 2$$

όπου  $V$  είναι η κανονικοποιημένη συχνότητα ή απλά ο αριθμός  $V$  και δίνεται από την σχέση  $V = [(2 \times \pi \times a) / \lambda] \times \text{N.A.}$

$$V = [(2 \times \pi \times a) / \lambda] \times n_1 \times (2 \times \Delta)^{1/2}$$

όπου  $a$  είναι η ακτίνα του πυρήνα της ίνας,  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $n_1$  ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα και  $\Delta$  η σχετική διαφορά μεταξύ των δεικτών διάθλασης.

Άρα όπως βλέπουμε η κανονικοποιημένη συχνότητα είναι μία σχέση ανάμεσα στο μέγεθος της οπτικής ίνας, τον δείκτη διάθλασης και το μήκος κύματος. Από την σχέση μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα. Μεγάλο N.A. σημαίνει πολλούς τρόπους διάδοσης και περισσότεροι τρόποι διάδοσης σημαίνει μεγαλύτερη διασπορά.

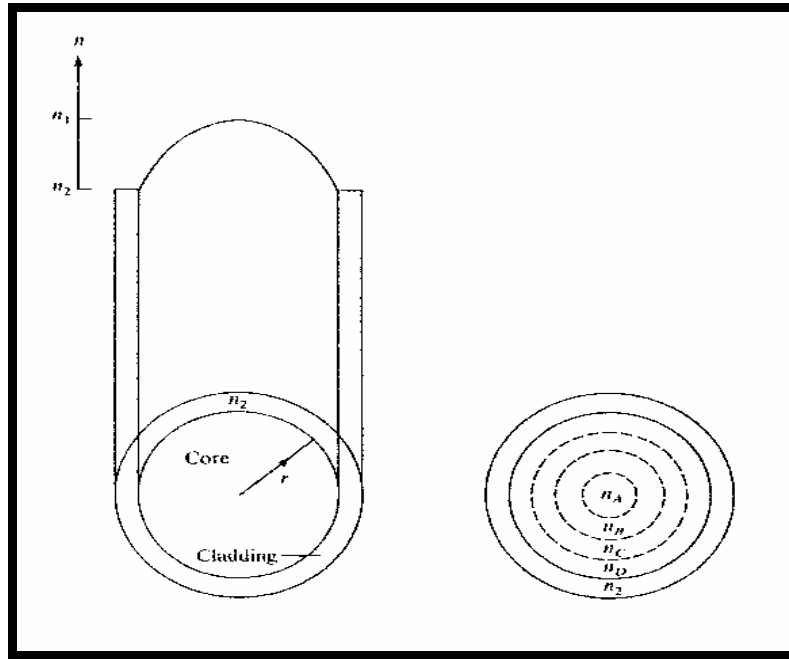
Σημειώνεται επίσης πώς μεγαλύτερη διάμετρος οδηγεί σε πολλούς τρόπους διάδοσης και μεγάλη διασπορά. Μεγαλύτερη διασπορά σημαίνει ότι έχουμε μικρότερο βαθμό μεταφοράς δεδομένων, το οποίο οδηγεί σε λιγότερο αποδοτική διάδοση. Το να μειώσουμε το N.A. για να μειώσουμε την διασπορά δεν είναι το πιο αποδεχτό και αυτό γιατί το να εμβάλεις φως στην οπτική ίνα με χαμηλό N.A. είναι δύσκολο. Θα πρέπει να έχουμε μικρότερη γωνία αποδοχής. Το οποίο σημαίνει ότι το φως που μπαίνει έχει πολύ ρηχή(μικρή) γωνία. Επιπλέον υπάρχει διαρροή ενέργειας και οι απώλειες αυξάνονται.

Σε ότι αφορά τις single-mode οπτικές ίνες το φως διαδίδεται με έναν μόνο τρόπο. Αυτό επιτυγχάνεται με την ελάττωση του  $\Delta$  και/ή την ελάττωση της διαμέτρου του πυρήνα σε ένα σημείο όπου το V είναι λιγότερο από 2,4. Με άλλα λόγια η ίνα κατασκευάζεται ώστε να έχει V από 0-2,4. Αυτές οι μικρές τιμές σημαίνουν ότι η ακτίνα της ίνας το  $\Delta$  και η διαφορά των δεικτών διάθλασης πρέπει να είναι μικρά.

Το χαμηλό N.A. σημαίνει πώς η γωνία υποδοχής θα είναι μικρή. Στις single-mode ίνες δεν υπάρχει ενδομοριακή διασπορά επειδή υπάρχει μόνο ένας τρόπος διάδοσης. Με την προσεχτική επιλογή των υλικών, των διαστάσεων και του μήκους κύματος η διασπορά μπορεί να γίνει πολύ μικρή, λιγότερο από 0.1 ps/km/nm, κάνοντας την ίνα ικανή για χρήση με μεγάλο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων. Επιπλέον στις single-mode ίνες μέρος του φωτός διαδίδεται στο cladding (ανακλαστήρα). Έτσι ο ανακλαστήρας πρέπει να έχει μικρές απώλειες και να είναι σχετικά παχύς. Τυπικά για πυρήνα διαμέτρου 10  $\mu\text{m}$ , ο ανακλαστήρας έχει διάμετρο 120 $\mu\text{m}$ . Αν και οι single-mode έχουν χαμηλές απώλειες και υψηλό βαθμό μεταφοράς δεδομένων είναι πιο ακριβές.

- Graded-index fibers

Μία graded-index ίνα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.24



Σχήμα 2.24

Εδώ ο δείκτης διάθλασης  $n$  στον πυρήνα μεταβάλλετε καθώς μετακινούμαστε προς το εξωτερικό. Στο κέντρο ο δείκτης είναι  $n_1$ , στον ανακλαστήρα  $n_2$  και μεταξύ αυτών  $n(r)$  όπου  $n$  είναι μια συνάρτηση της ακτίνας. Μία ακτίνα περνώντας τα σύνορα ανάμεσα στους διαφορετικούς δείκτες διάθλασης διαθλάται. Τελικά στο  $n_2$  η ακτίνα γυρίζει πίσω και ανακλάται ολικώς. Η μαθηματική διατύπωση του  $n(r)$  είναι :

$$n(r) = n_1 \times \{1 - [2 \times \Delta \times (r/a)^2]^{1/2}\}$$

όπου  $a$  είναι η ακτίνα του πυρήνα και το  $\Delta$  εξαρτάται μόνο από τους δείκτες διάθλασης  $n_1$ ,  $n_2$ .

Ο αριθμός των τρόπων διάδοσης στις graded-index ίνες είναι ο μισός από τις αντίστοιχες step-index:  $M_N = V^2/4$

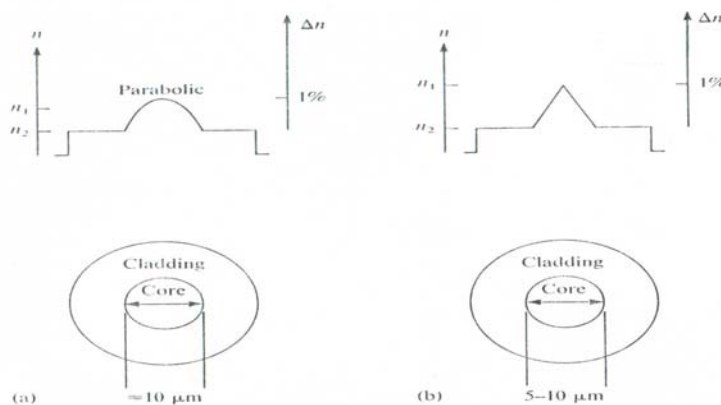
Ο μικρότερος αριθμός των τρόπων διάδοσης οδηγεί σε μικρότερη διασπορά από αυτή στις step-index. Ο τύπος που δίνει την διασπορά είναι:  $\Delta t = (L \times n_1 \times \Delta^2)/(8 \times c)$ . Το μέγεθος των graded-index ινών είναι περίπου το ίδιο με των step-index. Η κατασκευή τους είναι όμως

πιο πολύπλοκη. Είναι πιο δύσκολο να ελέγξεις τον δείκτη διάθλασης ώστε να πάρεις ακριβώς την μεταβλητότητα στην ίνα που επιθυμείς.

- Single-mode με παραβολική και τριγωνική κατανομή

Δύο παραλλαγές των single-mode ινών είναι οι graded-index ίνες με παραβολική δείκτη διάθλασης κατανομή και οι ίνες με τριγωνική δείκτη διάθλασης κατανομή. Αυτές φαίνονται στο σχήμα 2.24. Τα βασικά χαρακτηριστικά των single-mode ισχύουν και εδώ. Ο αριθμός  $V$  για αυτές τις ίνες μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 2,4. Έτσι και οι διαμέτροι των ινών μπορεί να είναι μεγαλύτερες. Για την παραβολική κατανομή η διάμετρος του πυρήνα μπορεί να αυξηθεί κατά 1,4 και για την τριγωνική κατανομή κατά 1,7. Ο μεγαλύτερος πυρήνας κάνει την χρήση και την ένωση των ινών ευκολότερη και το αποτέλεσμα είναι λιγότερες απώλειες.

Chapter 5



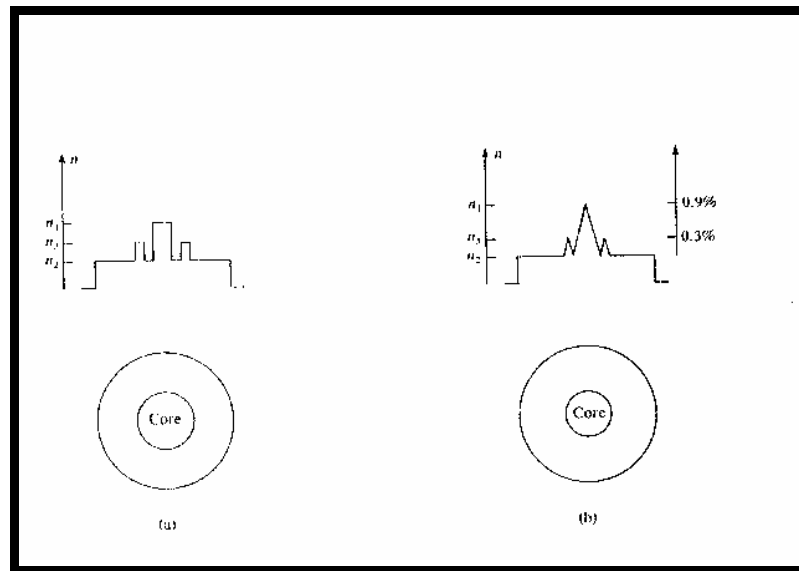
Σχήμα 2.24

- Οι W οπτικές ίνες

Μία άλλη παραλλαγή των single-mode ινών είναι οι W κατανομής όπως φαίνονται στο σχήμα 2.25. Ο ανακλαστήρας αποτελείται από δύο τμήματα, με το εξωτερικό να έχει δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από το εσωτερικό. Αυτές οι ίνες έχουν τρία πλεονεκτήματα:



- Η διάμετρος τους μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τις ισοδύναμες step-index ίνες.
- Οι απώλειες που οφείλονται στα σημεία καμπής (bending loss) είναι μικρότερες.
- Είναι δυνατό να επιλέξουμε το ελάχιστο μήκος κύματος στο οποίο έχουμε διασπορά και να κατασκευάσουμε μία ίνα όπου η ελάχιστη διασπορά σημαίνει μικρές απώλειες.









Σχήμα 2.25

- Πλαστικές οπτικές ίνες

Όταν μιλάμε για πλαστικές ίνες πρέπει να τις διαχωρίσουμε σε αυτές που έχουν πλαστικό ανακλαστήρα και σε αυτές που είναι όλες πλαστικές. Στο παρελθόν μόνο ο ανακλαστήρας ήταν πλαστικός ενώ τελευταία και ο πυρήνας έγινε πλαστικός.

Σε ότι αφορά τις πρώτες έχουν χαρακτηριστικά όμοια με αυτά των ινών που είναι αποκλειστικά από γυαλί. Όμως είναι πιο ευαίσθητες σε ζημιά που έχει να κάνει με την λείανση. Οι ίνες που είναι αποκλειστικά

από πλαστικό είναι μηχανικά δυνατότερες αλλά έχουν χειρότερα χαρακτηριστικά διάδοσης. Οι απώλειες είναι μεγαλύτερες και το εύρος ζώνης (BW) είναι μικρότερο από τις γυάλινες ίνες. Χρησιμοποιούνται σπάνια σε συστήματα επικοινωνιών. Επειδή είναι εύκολο να τις χειριστεί κανείς και δεν σπάνε εύκολα χρησιμοποιούνται συχνά για μικρών αποστάσεων χαμηλού εύρους ζώνης εφαρμογές. Για παράδειγμα σε κλειστά κυκλώματα τηλεόρασης. Το σχήμα 2.25 περιέχει κάποιες προδιαγραφές για ίνες που περιγράφηκαν παραπάνω.

Typical Fiber Specifications										
Fiber Type	Manufacturer	Model	Refractive Profile	Core Diameter (μm)	Cladding Diameter (μm)	$n_{core}$	$n_{clad}$	N.A. <sup>1</sup>	Loss <sup>2</sup> (dB/km)	BW <sup>3</sup> (MHz-km)
All-silicon step-index	Quartz Products Corp.	QSF 133/200 ASW		133	200			0.2	5	20
Silica core, plastic-clad step-index	DuPont	Pifax S-120 Type 30		200	600	1.46	1.409	0.38	30	0.85
All-silicon graded-index	Valtec/Phillips Corp.	MG05		50	125			0.2	5	400
All-plastic step-index	Dupont	Pifax PIR140 Type B		368	400	1.48	1.419	0.42	270 @ 790 nm	0.58
All-silicon, single-mode step-index	Corning Glass Inc.	SMF-28		8.3	125	1.471 @ 1300 nm	$\Delta = 0.36\%$	0.12	1.8 @ 850 nm 0.19 @ 1550 nm	>2000 @ 1300 nm (565 Mb/s-40 km)
Silicon, single-mode, W profile dispersion-shifted	Corning Glass Inc.	SMF-D5		~16	125	1.476	$\Delta_{max} = 0.9\%$ $\Delta_{ring} = 0.3\%$	—	2.06 @ 850 nm 0.22 @ 1550 nm	>4000 @ 1550 nm (565 Mb/s-80 km)

<sup>1</sup>N.A. = numerical aperture.

<sup>2</sup>Loss at 820 + 0850 nm unless otherwise specified.

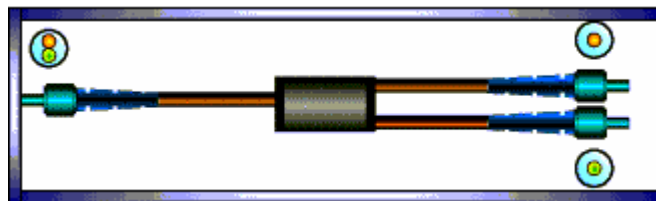
<sup>3</sup>BW = bandwidth.

Σχήμα 2.25

#### 2.2.2.6 Διακλαδούμενη Οπτική Ίνα (Bifurcated Fiber Optics)

Μια διακλαδούμενη οπτική ίνα αποτελείται από οπτικές ίνες που σχηματίζουν σχήμα Υ και στα άκρα καταλήγουν σε τρεις οπτικές ίνες οι οποίες μπορούν να συνδεθούν μια με μια πηγή ακτινοβολίας, μια με τον ανιχνευτή φωτός και μια με το δείγμα υπό εξέταση. Οι ίνες αυτές μπορούν να είναι είτε μόνο UV-VIS ή μόνο VIS-NIR ή μια από την μια περιοχή και μια από την άλλη, στην τελευταία περίπτωση αυτό ονομάζεται mixed bifurcated fiber optics. Οι ίνες αυτές λόγω της δομής

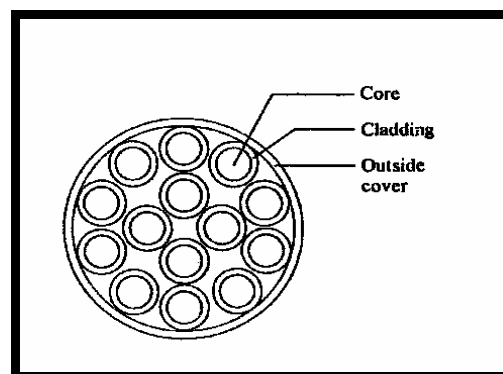
τους παρουσιάζουν απώλειες γύρω στο 10% σε κάθε ίνα αλλά μας δίνουν την δυνατότητα να οδηγήσουμε το φως από δυο διαφορετικές κατευθύνσεις σε μια περιοχή.



### **2.2.3 Fiber Bundle (Taper)**



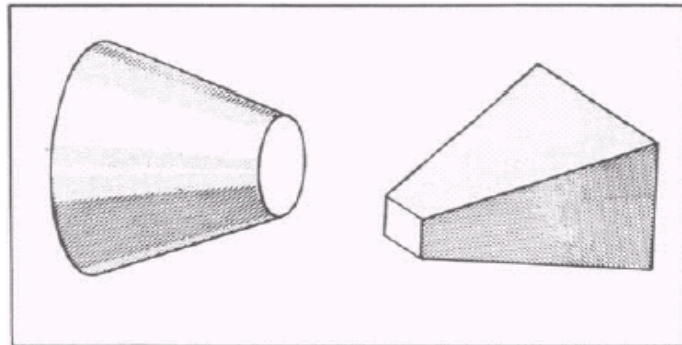
Ένα από τα προγενέστερα είδη οπτικών ινών είναι τα fiber bundles όπου πολλές οπτικές ίνες πακετάρονται μαζί όπως φαίνεται στο εικόνα 2.26.



εικόνα 2.26 : Fiber Bundle

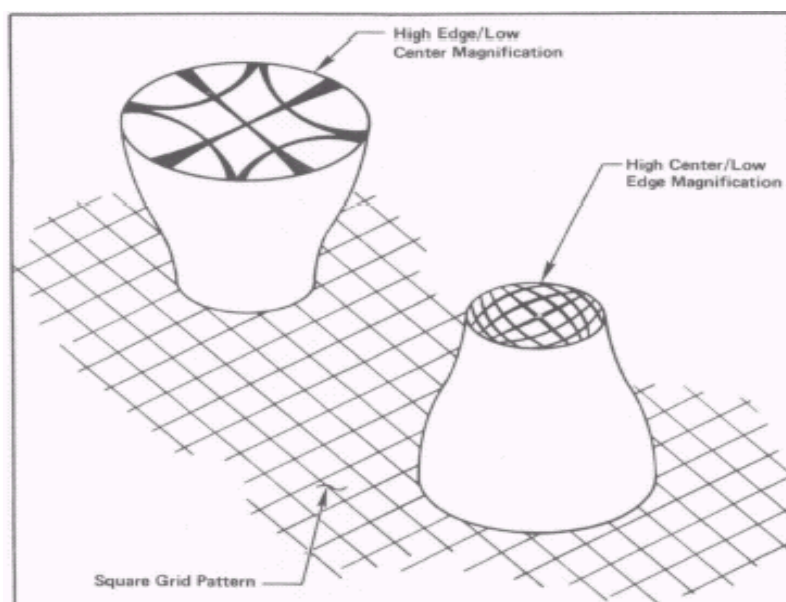
Fiber bundles είναι διαθέσιμα σε στρογγυλά, τετράγωνα, και εξαγωνικά σχήματα (σχήμα 27) και μπορούν να κατασκευαστούν σε σχεδόν οποιωνδήποτε μορφής πολύγωνα. Το μεγαλύτερο άκρο μπορεί να έχει σταυρό διαγώνίων ίση με 1 ίντσα επί 1 ίντσα με μια αναλογία μεταξύ των δύο ακρών πάνω από 40:1. Πιο πρακτικά, λόγω των τεχνικών

κατασκευής, είναι tapers που έχουν μισής ίντσας διαμέτρους και αναλογίες που κυμαίνονται από 2: 1 έως 10: 1.



εικόνα 2.27

Tapers μπορούν να χρησιμοποιηθεί και για την μεγένθυση και για τη σμίκρυνση των αντικειμένων. Μπορούν να κατασκευαστούν με πραγματικά μοναδικές ιδιότητες , όπως να μεγεθύνουν μια εικόνα με μεγάλη αλλά ελεγχόμενη μη-γραμμικότητα, δηλαδή στο κέντρο να υπάρχει μεγάλη μεγένθυση αλλά πολύ μικρότερη μεγένθυση στη περιφέρεια όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



εικόνα 2.28

### **2.2.4 Κατευθυνόμενο ή ολογραφικό πλέγμα περίθλασης (Gratings)**

Πλέγμα περίθλασης κατασκευάζεται είτε κλασικά με τη χρήση μιας κατευθυνόμενης μηχανής, η οποία έχει μια διαμαντένια γραφίδα και δημιουργεί γυαλιστερά αυλάκια, είτε ολογραφικά με τη χρήση κροσσών συμβολής που δημιουργούνται από την διασταύρωση δύο ακτινών laser.

Τα κλασικά κατευθυνόμενα gratings μπορούν να είναι επίπεδα ή κοίλα και να έχουν αυλάκια παράλληλα μεταξύ τους. Τα αυλάκια των ολογραφικών gratings μπορούν να είναι είτε παράλληλα είτε της άνισης διάταξης έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος. Τα ολογραφικά gratings παράγονται επίπεδα, σφαιρικά, σπειροειδής, και σε πολλές άλλες μορφές.

Η παρακάτω ανάλυση αφορά όλα τα gratings ανεξάρτητα από την μορφή τους.

#### **2.2.4.1 Βασικές εξισώσεις**

Πριν εισαχθούν οι βασικές εξισώσεις, πρέπει πρώτα να γίνει μια συνοπτική ανάλυση του μονοχρωματικού φωτός και του συνεχούς φάσματος.

Το μονοχρωματικό φως έχει το απείρως στενό φασματικό πλάτος. Οι καλές πηγές που προσεγγίζουν τέτοιο φως περιλαμβάνουν single mode λέιζερ, πολύ χαμηλή πίεση και ψυχωμένους βαθμονομημένους φασματικούς λαμπτήρες. Αυτοί είναι επίσης γνωστοί ως πηγές "γραμμών" ή "διακριτών γραμμών".

Ένα συνεχές φάσμα έχει το πεπερασμένο φασματικό πλάτος, π.χ. "άσπρο φως". Σε γενικές γραμμές όλα τα μήκη κύματος συμμετέχουν, αλλά στην πράξη μια "συνέχεια" είναι σχεδόν πάντα ένα τμήμα ενός

φάσματος. Μερικές φορές ένα συνεχές φασματικό τμήμα μπορεί να έχει εύρος μόνο μερικά νανόμετρα και να μοιάζει με ένα φάσμα γραμμής.

Οι εξισώσεις που ακολουθούν είναι για τα συστήματα στον αέρα όπου  $\mu_0 = 1$ . Επομένως,  $l = l_0 =$  μήκος κύματος στον αέρα.

### **Μονάδες ορισμών**

alpha - βαθμοί γωνίας της πρόσπτωσης

beta - γωνία των βαθμών διάθλασης

K - ακέραιος αριθμός διάθλασης

n - πυκνότητα αυλακιών grooves / mm.

$D_V$  - γωνία απόκλισης

$m_0$  - διαθλαστικός δείκτης

l - μήκος κύματος στο κενό nanometers (nary)

$l_0$  - μήκος κύματος στο μέσο διαθλαστικού δείκτη,  $m_0$ ,  
όπου  $l_0 = l m_0$

1 nm =  $10^{-6}$  mm; 1 micrometer =  $10^{-3}$  mm; 1 Å =  $10^{-7}$  mm

Η πιο θεμελιώδης εξίσωση grating δίνεται από:

$$\sin a + \sin b = 10^{-6} \text{ knl} \quad (1.1)$$

Στους περισσότερους monochromators η θέση των σχισμών εισόδων και εξόδων είναι καθορισμένη και το grating περιστρέφεται. Η γωνία,  $D_v$ , είναι, επομένως, μια σταθερά που καθορίζεται από:

$$D_v = \beta - \alpha \quad (1.2)$$

Εάν η τιμή του alpha και beta πρόκειται να καθοριστεί για ένα δεδομένο μήκος κύματος,  $\lambda$ , η grating εξίσωση (11) μπορεί να εκφραστεί όπως:

$$10^{-6} kn\lambda = 2 \sin[(\beta + \alpha)/2] \cos[(\beta - \alpha)/2] \quad (1.3)$$

Υποθέτοντας τις εξισώσεις (12) και (1-3).

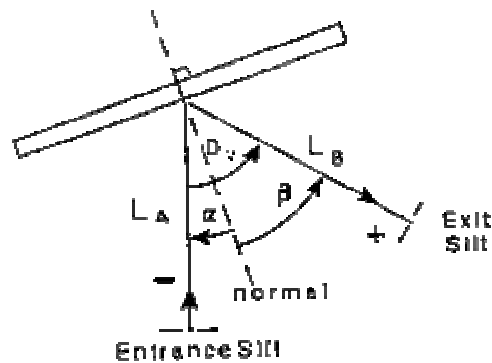


Figure 1 - Monochromator Configuration

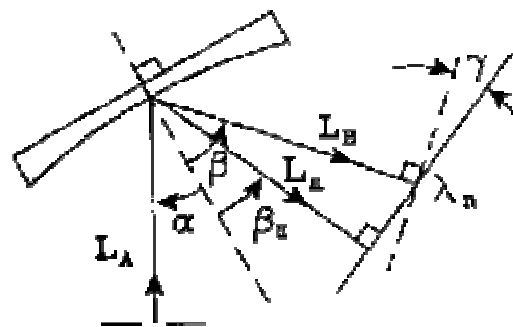


Figure 2 - Spectrograph Configuration

$L_A$ =μήκος βραχιόνων εισόδων

$L_B$ =μήκος βραχιόνων εξόδων

$\beta_H$  = η γωνία μεταξύ των καθέτων του φασματικού επιπέδου και του grating

$L_H$  = κάθετη απόσταση από το φασματικού επιπέδου στο grating

Ο πίνακας 1 επιδεικνύει πόσο τα alpha και beta ποικίλουν ανάλογα με τη γωνία απόκλισης για ένα grating 1200 g/mm που τίθεται να περιθλάσει 500 nm σε ένα monochromator με γεωμετρία βασισμένη στο σχέδιο 1.

Απόκλιση	alpha	beta
0	17.458	17.458 (Littrow)
10	12.526	22.526
20	7.736	27.736
24	5.861	29.861
30	3.094	33.094
40	-1.382	38.618
50	-5.670	44.330

#### 2.2.4.2 Γωνιακή διασπορά

$$d\beta / d\lambda = (kn10^{-6}) / \cos \beta \quad (1-4)$$

$d\beta$  : γωνιακός διαχωρισμός μεταξύ δύο μηκών κύματος (radians)

$d\lambda$  : διαφορικός διαχωρισμός μεταξύ δύο μηκών κύματος nm



### **2.2.4.3 Γραμμική διασπορά**

Η γραμμική διασπορά καθορίζει το βαθμό στον οποίο ένα φασματικό διάστημα διαδίδεται έξω και πέρα από τον εστιακό τομέα ενός φασματόμετρου και εκφράζεται σε nm/mm, °A/mm, cm<sup>-1</sup>/mm, κ.λ.π. Παραδείγματος χάριν, εξετάστε δύο φασματόμετρα: ένα όργανο που διασκορπίζει ένα φασματικό τμήμα 0,1 nm πάνω από 1 mm. ενώ το άλλο παίρνει ένα φασματικό τμήμα 10 nm και το διαχέει πάνω από 1mm.

Προφανώς, η λεπτή φασματική λεπτομέρεια θα προσδιοριζόταν ευκολότερα στο πρώτο όργανο από το δεύτερο. Το δεύτερο όργανο παρουσιάζει "χαμηλή" διασπορά έναντι της "υψηλότερης" διασποράς του πρώτου. Η γραμμική διασπορά συνδέεται με τη δυνατότητα ενός οργάνου να επιλύσει τη λεπτή φασματική λεπτομέρεια.

Η γραμμική διασποράς κάθετη στην περιθλούμενη ακτίνα σε ένα κεντρικό μήκος κύματος,  $\lambda$ , δίνεται από:

$$d\lambda / dx = (10^6 \cos \beta) / (knL_B) \quad (1-5)$$

όπου το  $L_B$  είναι το αποτελεσματικό εστιακό μήκος εξόδων σε mm και  $dx$  είναι το διάστημα μονάδων σε mm. (σχέδιο 1)

Σε ένα monochromator, το  $L_B$  είναι το μήκος από τον καθρέφτη εστίασης στην σχισμή εξόδου ή εάν το grating είναι κοίλο, από το grating στη σχισμή εξόδου. Επομένως, η γραμμική διασπορά ποικίλλει άμεσα με το  $\cos \beta$ , και αντιστρόφως με το μήκος εξόδου,  $L_B$ ,  $k$ , και την πυκνότητα αυλακιών,  $n$ .

Σε έναν φασματογράφο, η γραμμική διασπορά για οποιοδήποτε μήκος κύματος εκτός από εκείνο το μήκος κύματος που είναι κανονικό στο φασματικό επίπεδο θα τροποποιηθεί από το συνημίτονο της γωνίας

της κλίσης (γάμα) στο μήκος κύματος  $\lambda_n$ . Το σχέδιο 2 παρουσιάζει φασματογράφο "επίπεδων τομέων" όπως χρησιμοποιείται με μια γραμμική σειρά διόδων.

Γραμμική διασπορά

$$d\lambda_n / dx = (10^6 \cos \beta \cos \gamma) / (knLB_{\lambda_n}) \quad (1-6)$$

$$\gamma = \beta_H - \beta \quad (17)$$

$$d\lambda_n / dx = (10^6 \cos \beta \cos^2 \gamma) / (knL_H) \quad (1-8)$$

#### 2.2.4.4 Μήκος κύματος και διάταξη

Το σχήμα 3 παρουσιάζει φάσμα από 200 έως 1000 nm που είναι εξαπλωμένα γύρω από έναν εστιακό τομέα στη φασματογραφική περιοχή. Από την εξίσωση (11) για ένα grating δεδομένης πυκνότητας αυλακιού και για μια δεδομένη αξία alpha και beta:

$$k\lambda = \text{constant} \quad (1-9)$$

έτσι ώστε εάν η διάταξη διάθλασης k διπλασιάζεται, το  $\lambda$  διχοτομείται, κ.λ.π.

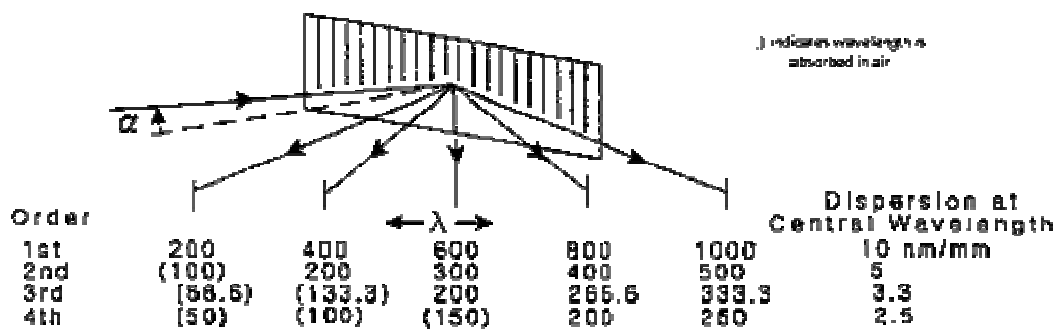


Figure 3 - Dispersion and Order

Εάν, παραδείγματος χάρη, μια πηγή φωτός εκπέμπει μήκος κύματος από

20 nm σε 1000 nm, στη θέση 800 nm και στα μήκη κύματος 400, 266.6, και 200 nm θα περνά επίσης φως ανιχνεύσιμο από τον ίδιο ανιχνευτή. Προκειμένου να κατευθυνθεί μόνο φως στα 800 nm, φίλτρα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να αποβάλουν τα υψηλότερα μήκη κύματος.

Τα μήκη κύματος μεταξύ 200 και 380 nm μπορούν να κατευθυνθούν χωρίς φίλτρα επειδή τα μήκη κύματος κάτω από 190 nm απορροφώνται από τον αέρα. Εάν, εντούτοις, το όργανο λειτουργεί σε κενό αέρος ή σε κενό με N<sub>2</sub>, τα υψηλότερα φίλτρα τάξης θα απαιτούνταν πάλι.

#### **2.2.4.5 Διαχωριστική ικανότητα**

Η διαχωριστική ικανότητα είναι μια θεωρητική έννοια και δίνεται από

$$R = \lambda / d\lambda \quad (\text{χωρίς μονάδες μέτρησης}) \quad (1-10)$$

όπου, το  $d\lambda$  είναι η διαφορά στο μήκος κύματος μεταξύ δύο φασματικών γραμμών ίσης έντασης. Έτσι, ο διαχωρισμός (resolution) είναι η δυνατότητα του οργάνου να διαχωρίσει τις γειτονικές φασματικές γραμμές. Δύο κορυφές θεωρούνται διαχωρίσιμες εάν η απόσταση μεταξύ τους είναι τέτοια ώστε το μέγιστο της μιας συμπίπτει με το πρώτο ελάχιστο άλλης. Αυτό καλείται κριτήριο Rayleigh.

Μπορεί να αποδειχθεί ότι:

$$R = \lambda / d\lambda = knW_g = kN \quad (1-11)$$

$\lambda$  - το κεντρικό μήκος κύματος της φασματικής γραμμής που πρέπει να διαχωριστεί

$W_g$  το φωτοαγώγιμο πλάτος του grating

Ν ο συνολικός αριθμός αυλακιών στο κυκλίδωμα

Η αριθμητικά διαχωρίσιμη ικανότητα "R" δεν πρέπει να συσχετιστεί με το διαχωρισμό ή τη ζωνοπερατότητα ενός συστήματος οργάνων

Θεωρητικά, ένα grating 1200 g/mm με ένα πλάτος 110 mm, που χρησιμοποιείται ως πρώτης τάξης έχει μια αριθμητικά διαχωρίσιμη ικανότητα  $R = 1200 \times 110 = 132,000$ .

Επομένως, σε 500 nm, η ζωνοπερατότητα είναι :

$$D\lambda = 500/132.000 = 0.0038nm$$

Σε ένα πραγματικό όργανο, εντούτοις, η γεωμετρία χρήσης καθορίζεται από την εξίσωση (11). Όπου K:

$$k = (\sin \alpha + \sin \beta) / 10^{-6} n \lambda \quad (1-12)$$

Αλλά το κυβερνημένο πλάτος,  $W_g$ , του grating:

$$W_g = N / n \quad N = W_g n \quad (1-13)$$

όπου  $1/n = \text{mm/groove}$  (αυλάκι) (1-14)

μετά από την αντικατάσταση (1- 12) και (1- 13) μέσα (11).

Η επίλυση της δύναμης μπορεί επίσης να εκφραστεί όπως:

$$R = W_g (\sin \alpha + \sin \beta) / 10^{-6} \lambda \quad (1-15)$$

Συνεπώς, η διαχωρίσιμη ικανότητα ενός grating εξαρτάται από:

- Το πλάτος του κυκλιδώματος
- Το κεντρικό μήκος κύματος που επιλύεται
- Η γεωμετρία των όρων χρήσης

Επειδή η ζωνοπερατότητα καθορίζεται από το πλάτος σχισμών του φασματόμετρου και των υπολειπόμενων σφαλμάτων του συστήματος, μια υλοποιήσιμη ζωνοπερατότητα είναι σε αυτό το επίπεδο δυνατή μόνο σε περιορισμένης διαθλαστικότητας όργανα θεωρώντας ένα απίθανο 100% θεωρητικών.

#### **2.2.4.6 Blazed Gratings**

Blaze: Η συγκέντρωση μιας συγκεκριμένης περιοχής του φάσματος σε οποιαδήποτε τάξη εκτός από τη μηδενική τάξη. Τα blazed gratings κατασκευάζονται για να παραγάγουν τη μέγιστη αποδοτικότητα σε καθορισμένο μήκος κύματος. Ένα grating μπορεί, επομένως, να περιγραφεί "blazed σε 250 nm" ή "blazed σε 1 micron" κ.λπ. από την κατάλληλη επιλογή της γεωμετρίας των αυλακιών.

Ένα blazed grating είναι ένα grating στο οποίο τα αυλάκια του ρυθμίζονται για να διαμορφώσουν τέλεια τρίγωνα με μια "γωνία blaze,  $w$ ," όπως φαίνεται στο σχέδιο 4. Εντούτοις, οι γωνίες κορυφών μέχρι  $110^\circ$  μπορούν να είναι υπάρχουν ειδικά στα ολογραφικά blazed gratings. Η επιλογή της μέγιστης γωνίας του τριγωνικού αυλακιού προσφέρει την ευκαιρία να βελτιστοποιηθεί το γενικό σχεδιάγραμμα αποδοτικότητας του gratings.

##### **2.2.4.6.1 Παράγοντας Littrow**

Τα αυλάκια των blazed gratings υπολογίζονται για τον παράγοντα

Littrow όπου οι προσπίπτουσες και περιθλόμενες ακτίνες ευθυγραμμίζονται αυτόματα (δηλ.,  $\alpha = \beta$ ). Οι ακτίνες εισόδου και εξόδου, επομένως, διαδίδουν κατά μήκος του ίδιου άξονα. Σε αυτήν την περίπτωση στο “blaze” μήκος κύματος  $\lambda_B$ .

$$\begin{aligned} \sin \alpha + \sin \beta &= kn\lambda_B 10^{-6} \\ \omega = \alpha = \beta & \quad \omega = \text{the blaze angle} \\ 2\sin \omega &= kn\lambda_B 10^{-6} \end{aligned} \quad (116)$$

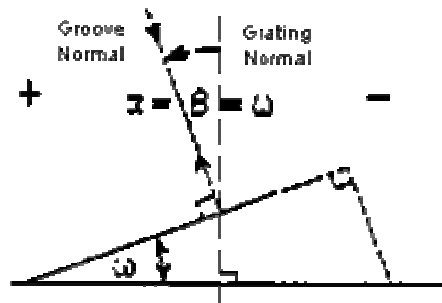


Figure 4 - Littrow Condition for a Single Groove of a Blazed Grating

#### 2.2.4.6.2 Σχεδιαγράμματα αποδοτικότητας

Πλην άλλης ενδείξεως, η αποδοτικότητα ενός πλέγματος περίθλασης μετρείται στη διαμόρφωση Littrow σε ένα δεδομένο μήκος κύματος.

$$\% \text{Απόλυτη αποδοτικότητα} = (\text{energy out} / \text{energy in}) \times (100/1) \quad (117)$$

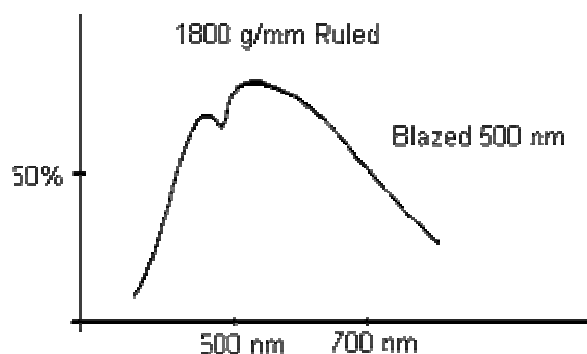
$$\% \text{Σχετική αποδοτικότητα} = (\text{αποδοτικότητα του grating} / \text{αποδοτικότητα ενός καθρέφτη}) \times (100/1) \quad (118)$$

Οι μετρήσεις σχετικής αποδοτικότητας απαιτούν ο καθρέφτης να είναι ντυμένος με το ίδιο υλικό και να χρησιμοποιηθεί στην ίδια γωνιακή διαμόρφωση με το grating.

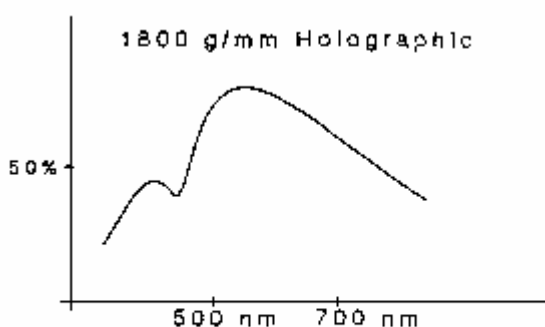
5α και 5β για τις χαρακτηριστικές καμπύλες αποδοτικότητας ενός blazed, οδηγούμενου πλέγματος, και ενός nonblazed, ολογραφικού πλέγματος, αντίστοιχα.

Σαν γενική προσέγγιση για τα blazed gratings, η δύναμη ενός σήματος μειώνεται μέχρι 50% στα δύο τρίτα του blazed μήκους κύματος, και 1,8 φορές το blazed μήκος κύματος.

#### **2.2.4.6.3 Αποδοτικότητα**



**Figure 5a - Efficiency Curve of a Blazed, Ruled Grating**



**Figure 5b - Efficiency Curve of a Non-Blazed, Holographic Grating.**

\* Η αποδοτικότητα στις μεγαλύτερες τάξεις ακολουθεί συνήθως την καμπύλη αποδοτικότητας πρώτης τάξης.

\* Για ένα grating blazed στην πρώτη τάξη η μέγιστη αποδοτικότητα για κάθε μια από τις επόμενες υψηλότερες τάξεις μειώνεται καθώς η τάξη  $K$  αυξάνεται.

Τα ολογραφικά grating μπορούν να σχεδιαστούν με τα σχεδιαγράμματα αυλακιού που κάνουν διακρίσεις εις βάρος των μεγαλύτερων τάξεων. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στο VUV χρησιμοποιώντας τα σχεδιαγράμματα αυλακιών με στρώματα που δημιουργούνται από την ιοντική εγχάραξη.

**Σημείωση:** Ακριβώς επειδή ένα grating είναι "nonblazed" απαραίτητως δεν σημαίνει ότι είναι λιγότερο αποδοτικό! Δείτε το σχέδιο 5β καμπύλη αποδοτικότητας για ένα ημιτονοειδές αυλακωμένο ολογραφικό grating 1800 g/mm.

#### **2.2.4.7 Πλέγμα περίθλασης παρασιτικής ακτινοβολίας**

Ως παρασιτική ακτινοβολία (stray light) χαρακτηρίζεται το (ανεπιθύμητο) σύνολο των ακτινοβολιών, που φθάνουν στον ανιχνευτή χωρίς να ανήκουν στην επιλεγμένη από τον μονοχρωμάτορα δέσμη.

##### **2.2.4.7.1 Διάχυση φωτός**

Διάχυση φωτός μπορεί να προκληθεί από τα παρακάτω :

(α) διάχυση φωτός οφειλόμενη σε επιφανειακές ατέλειες οποιασδήποτε οπτικής επιφάνειας

(β) εστιασμένη παρασιτική ακτινοβολία οφειλόμενη σε μη περιοδικά σφάλματα στη διαγράμμιση του grating



#### **2.2.4.8 Επιλογή grating**

##### **2.2.4.8.1 Πότε επιλέγεται ολογραφικό grating**

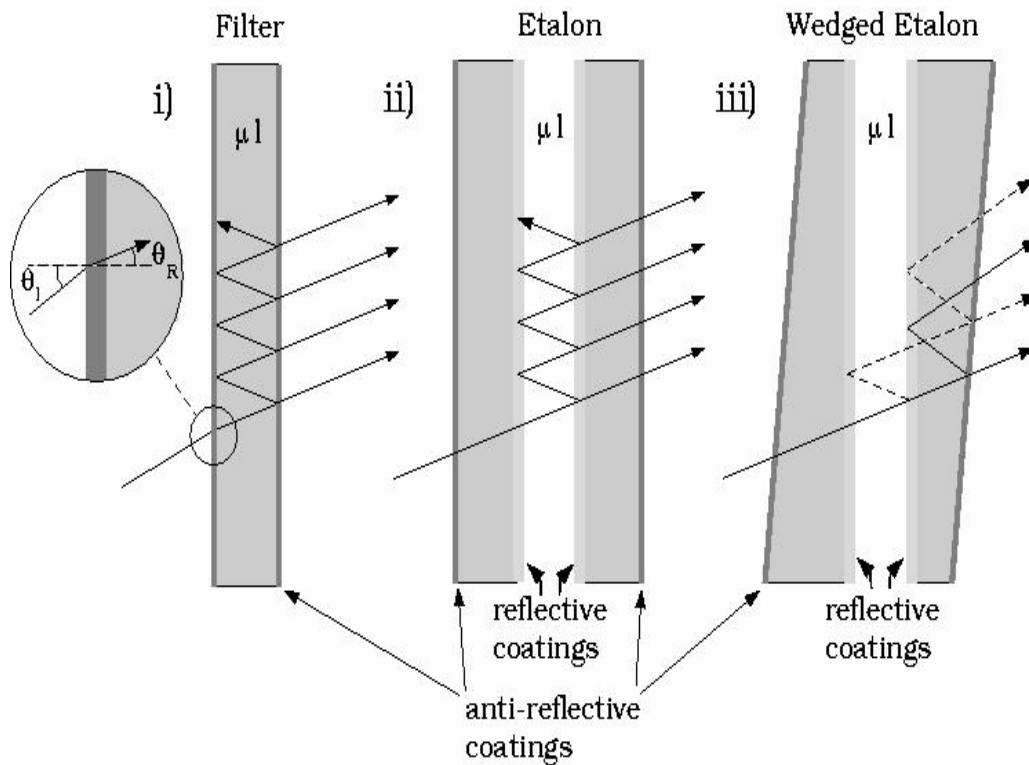
- (1) Όταν το grating είναι κοίλο.
- (2) Όταν υπάρχει φως λείζερ.
- (3) Οποτεδήποτε η πυκνότητα των αυλακιών είναι 1200 g/mm ή μεγαλύτερη (μέχρι 6000 g/mm και 120 mm. X 140 mm. σε μέγεθος) για χρήση κοντά σε UV, VIS και NIR.
- (4) Κατά τη λειτουργία σε W κάτω από 200 nm έως 3 nm.
- (5) Για υψηλή ανάλυση όταν μεγάλη πυκνότητα αυλακιών στο grating θα είναι μεγαλύτερη από ένα χαμηλής πυκνότητας αυλακιών grating που χρησιμοποιείται σε μεγάλες τάξεις ( $k > 1$ ).
- (6) Όταν ένα ιοντικής εγχάραξης ολογραφικό grating είναι διαθέσιμο.

##### **2.2.4.8.2 Πότε επιλέγεται Ruled Grating**

- (1) Κατά τη λειτουργία σε IR επάνω από το 1.2  $\mu\text{m}$ , εάν ένα ιοντικής εγχάραξης ολογραφικό grating είναι μη διαθέσιμο.
- (2) Κατά τη λειτουργία με πολύ χαμηλής πυκνότητα αυλακιών, π.χ. λιγότερο από 600 g/mm.

## 2.2.5 Γραμμικά Μεταβαλλόμενο Φίλτρο Συμβολής (Variable Interference Filter)

Το φίλτρο συμβολής είναι διηλεκτρικό υλικό λεπτού στρώματος που έχει διαφορετικούς διαθλαστικούς δείκτες για να παραγάγουν την εποικοδομητική και μη συμβολή του εισερχόμενου φωτός, αυτό συμβαίνει με τη εκπομπή ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος μόνο. Αυτό είναι ένα φίλτρο ακρίβειας για να παρέχει μια πολύ απότομη κλίση απομόνωσης ή μη σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος.

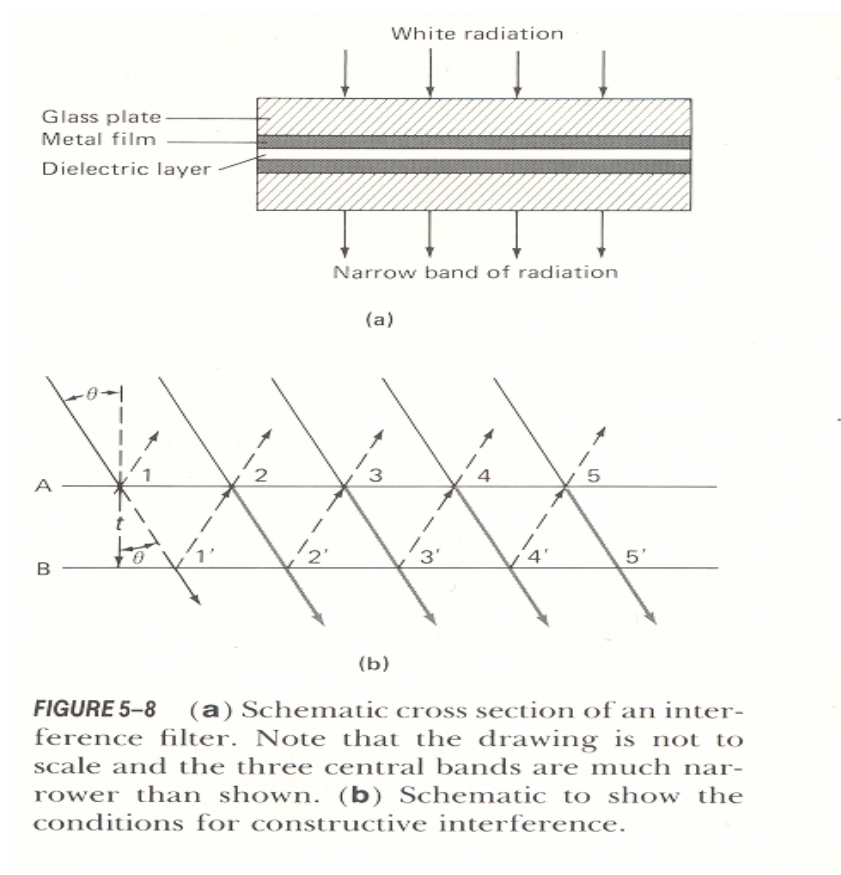


**Σχήμα 2.29.** (I) Interference filter: the internal structure is not shown. (ii) Fairy-Perot etalon. (iii) Wedged Perot-Perot etalon, which avoids the problem of the plates behaving like interference filters.

Αυτά τα φίλτρα έχουν μια εξαιρετικά στενή ζώνη ή μια ευρεία ζώνη ανάλογα με το απαραίτητο εύρος ζώνης. Τα ζωνοπερατά φίλτρα είναι διαθέσιμα για 220nm στο υπεριώδες μέχρι far-Infrared πάνω από 10

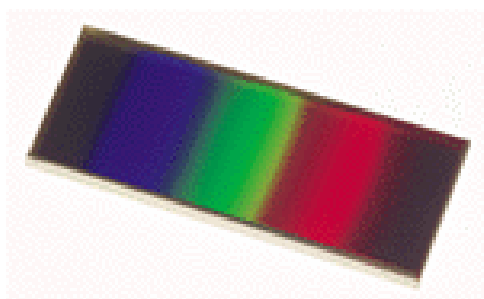
μικρά. Το φράξιμο προστίθεται στο φίλτρο, το οποίο αποτρέπει τα μήκη κύματος πέρα από τη ζώνη διέλευσης.

Από την άποψη των φασματικών χαρακτηριστικών, τα φίλτρα συμβολής μπορούν να είναι ευρέα ή στενά ζωνοπερατά, ή μπορούν να είναι sharpcut φίλτρα. Τα φίλτρα συμβολής γίνονται με την επένδυση του οπτικού γυαλιού με δύο λεπτές ταινίες υλικού που αντανακλά και χωρίζονται από ένα ομαλής διάταξης spacer layer.



Το κεντρικά μήκος κύματος και το εύρος ζώνης του φίλτρου μπορούν να ελεγχθούν με την μεταβολή του πάχους του spacer layer ή/και του αριθμού των στρωμάτων αντανάκλασης. Για να εξασφαλισθεί η φραγή εκτός ζώνης (φράξιμο ανεπιθύμητων μηκών κύματος του φωτός) ένας επιπλέον παράγοντας φραγής προστίθεται. Ενώ το πρόσθετο φράξιμο αποβάλλει την εκτός ζώνης μετάδοση και μειώνει τον παρασιτικό θόρυβο, μειώνει επίσης τη γενική μετάδοση φωτός. Τα

φίλτρα συμβολής επιτρέπουν χαρακτηριστικά 10- 70% του φωτός να μεταδοθεί. Η ελάχιστη μετάδοση εξαρτάται από το διαβιβασθέντα μήκος



κύματος και το εύρος ζώνης. Τα φίλτρα συμβολής επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Το κεντρικό μήκος κύματος θα μετατοπιστεί γραμμικά με, και στην κατεύθυνση, τις αλλαγές στη

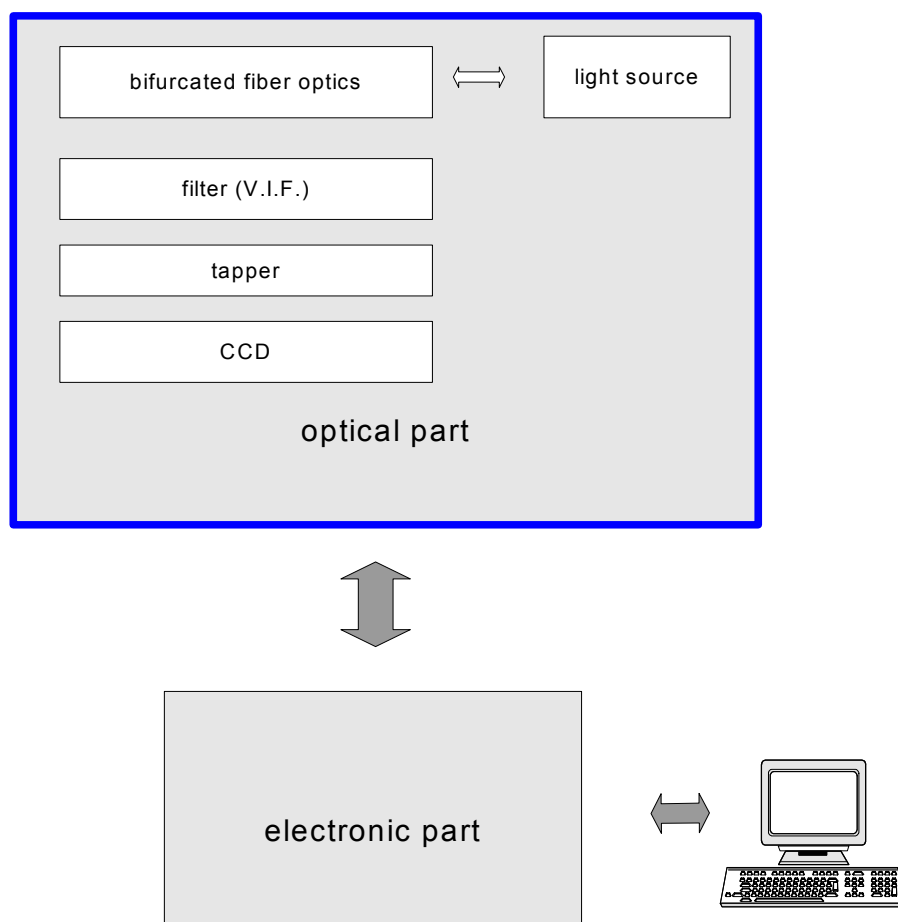
θερμοκρασία. Παραδείγματος χάριν, ο συντελεστής θερμοκρασίας για ένα φίλτρο 400 nm είναι περίπου 0,015 nm/°C. Το κεντρικό μήκος κύματος και η μέγιστη μετάδοση των φίλτρων συμβολής μπορούν να μετατοπιστούν με πάροδο του χρόνου, ειδικά σε συνθήκες υψηλής υγρασίας και μεταβλητής θερμοκρασίας. Τα ερμητικά σφραγισμένα φίλτρα είναι εγγυημένα για ένα έτος. Έχει παρατηρηθεί ότι υπό καλές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως σε ένα εργαστήριο, τα φίλτρα δείχνουν αμελητέα σημάδια «γήρανσης» μετά από δύο χρόνια.

Ένα καινούργιο φίλτρο συμβολής έχει συνήθως μια ομοιόμορφα σκοτεινή πλευρά και μια ομοιόμορφα αντανακλαστική ή καθρέφτη πλευρά. Για να προστατεύσει το φίλτρο από τη θερμότητα και το φως, η αντανακλαστική πλευρά πρέπει πάντα να αντιμετωπίσει την πηγή φωτός. Ένα φίλτρο που επηρεάζεται από την πάροδο του χρόνου και την υγρασία θα παρουσιάσει αποχρωματισμό γύρω από την εξωτερική διάμετρο, αυτός ο αποχρωματισμός θα επεκταθεί προς το κέντρο του φίλτρου με το χρόνο. Οι συνιστώμενες συνθήκες λειτουργίας για τα φίλτρα συμβολής είναι  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $+70^{\circ}\text{C}$ , και μια μέγιστη αλλαγή θερμοκρασίας  $5^{\circ}\text{C/min}$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> :**

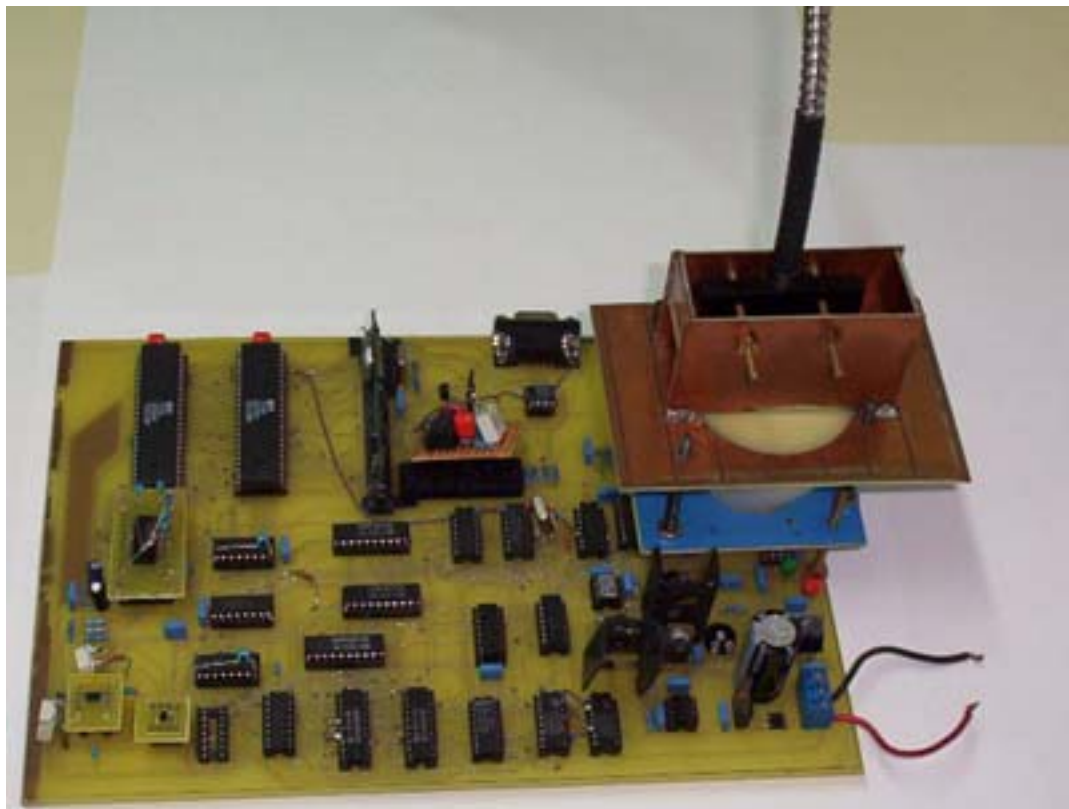
### **3.1 Υλοποίηση οπτοηλεκτρονικού μέρους**

Σε αυτή την διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε ένα οπτικό φασματόμετρο του οποίου το οπτοηλεκτρονικό μέρος παρουσιάζεται παρακάτω :



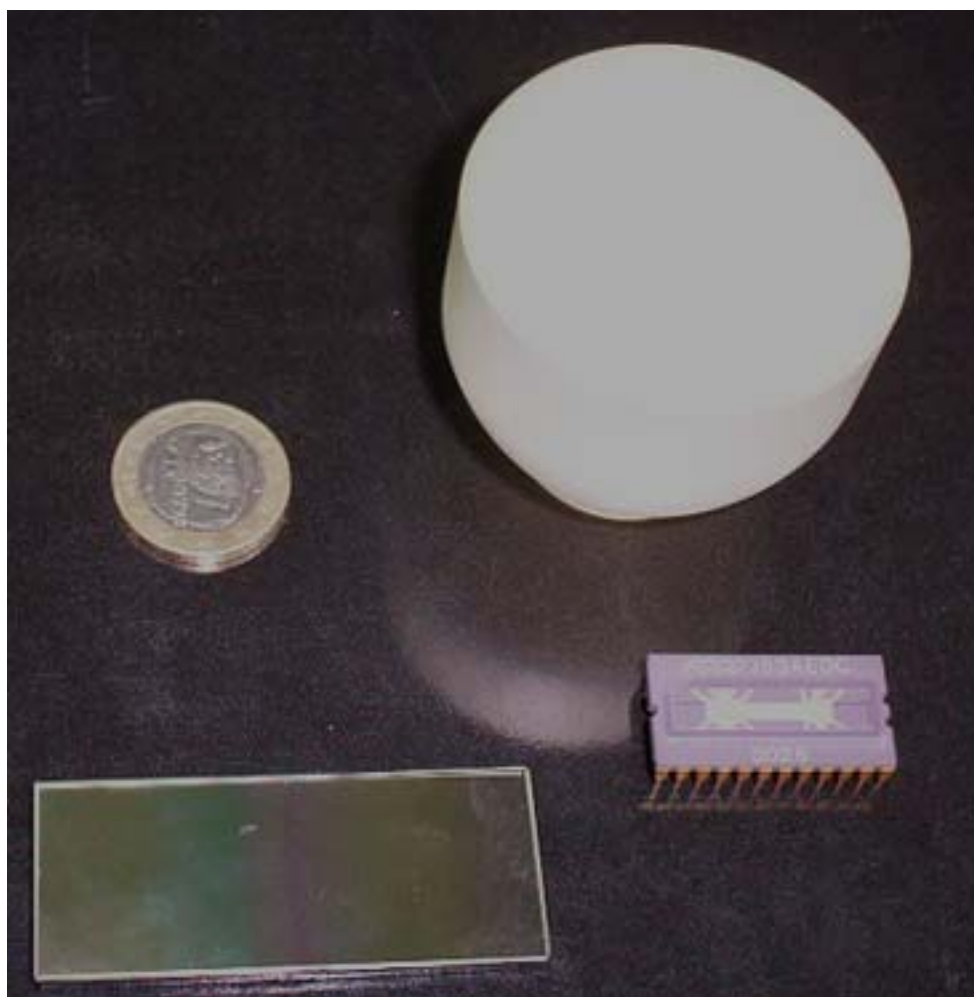
Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και από το παραπάνω σχήμα, το οπτοηλεκτρονικό μέρος υλοποιήθηκε σύμφωνα με την μέθοδο που αναλύσαμε στην παράγραφο 2.1. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μία πηγή

φωτός, η οποία στέλνει φως στην μία άκρη μιας διακλαδούμενης οπτικής ίνας. Το φως εξάγεται από τις ίνες που το μεταφέρουν στη διακλάδωση και αντανακλάται από το υπό εξέταση δείγμα.



Στη συνέχεια το φως που αντανακλάται συλλέγεται από τις υπόλοιπες οπτικές ίνες της διακλάδωσης και οδηγείται στην άλλη άκρη της διακλαδούμενης ίνας. Η άκρη αυτή της οπτικής ίνας έχει ειδικά τοποθετημένες τις οπτικές ίνες σε μία γραμμή. Η γραμμή αυτή έχει το κατάλληλο μήκος ώστε να προσαρμοστεί στο γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής, το οποίο με την σειρά του θα αντιστοιχίσει μήκη κύματος σε σημεία της φωτοευαίσθητης περιοχής του CCD153A (Fairchild Imaging). Το CCD153A είναι ένας γραμμικός CCD αισθητήρας και έχει μια φωτοευαίσθητη περιοχή 512 ψηφίδων (cells). Οι ψηφίδες αυτές είναι χωρισμένες σε δύο ομάδες, ανάλογα με το αν ο αριθμός της θέσης τους είναι άρτιος ή περιττός, οι οποίες ακολουθούν παράλληλη επεξεργασία στο εσωτερικό του CCD και παράγουν τελικά δύο ξεχωριστά video σήματα.

Αρχικά η ιδέα ήταν να εφαρμοστεί με επαφή πάνω στη φωτοευαίσθητη περιοχή του CCD ένα γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο παρεμβολής το οποίο θα ανέλυε το εισερχόμενο φως στα διάφορα μήκη κύματος, το οποίο στη συνέχεια να κατευθυνόταν αναλυμένο στον ανιχνευτή (CCD). Έτσι, οι απώλειες θα ήταν αμελητέες και ένα μεγάλο ποσοστό από το υπό ανάλυση φως θα κατέληγε στον ανιχνευτή. Σε αυτή την διπλωματική εργασία αυτό στάθηκε αδύνατο να γίνει γιατί το κόστος ενός τέτοιου φίλτρου ήταν πολύ υψηλό σε σχέση με τον ετήσιο προϋπολογισμό του εργαστηρίου ηλεκτρονικής (που στήριζε οικονομικά την εκπόνηση αυτής της εργασίας).



Το φίλτρο συμβολής που υπήρχε στην διάθεση μας είχε πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις (6-7cm) σε σχέση με την φωτοευαίσθητη

περιοχή του ανιχνευτή ( $<1\text{cm}$ ), με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η σωστή ανάλυση του εισερχόμενου φωτός στα αντίστοιχα μήκη κύματος, δηλαδή το CCD μπορούσε να ανιχνεύσει μόνο κάποιες περιοχές του φάσματος και όχι ολόκληρη τη περιοχή του ( $400\text{nm}-1000\text{nm}$ ). Για αυτό το λόγο στη συνέχεια μελετήθηκαν διάφορες μέθοδοι ώστε να γίνει σωστά η προβολή του φίλτρου στην φωτοευαίσθητη περιοχή του ανιχνευτή.

Επειδή η πρώτη σκέψη ήταν να χρησιμοποιηθούν φακοί για την προβολή αυτή, κατασκευάστηκε μια διάταξη από δυο φακούς οι οποίοι συγκέντρωναν το αναλυμένο φως πάνω στον ανιχνευτή. Επειδή η ένταση του ανακλώμενου φωτός ήταν πολύ χαμηλή, η πειραματική διάταξη αποτελείτο από χαμηλού κόστους υλικά που εισήγαγαν υψηλές απώλειες, ο τύπος του φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε έχει μικρό βαθμό απόδοσης, αλλά και επειδή οι φακοί αδυνατούν να συλλέξουν μεγάλο ποσοστό από το εκπεμπόμενο φως, το φως που έφτανε τελικά στον ανιχνευτή είχε πολύ μικρή ένταση και τελικά το σήμα στην έξοδο του το CCD ήταν στα επίπεδα του θορύβου, ακόμα και για χρόνους έκθεσης του CCD της τάξης του δευτερολέπτου. Αν και στη συνέχεια η διάταξη υλοποιήθηκε με μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων από φακούς, το σήμα δεν κατέστη δυνατόν να ξεχωρίσει από το θόρυβο, πράγμα που οφείλεται στην αδυναμία των φακών να συλλέξουν μεγάλο ποσοστό από το διαχεόμενο φως πίσω από το φίλτρο.

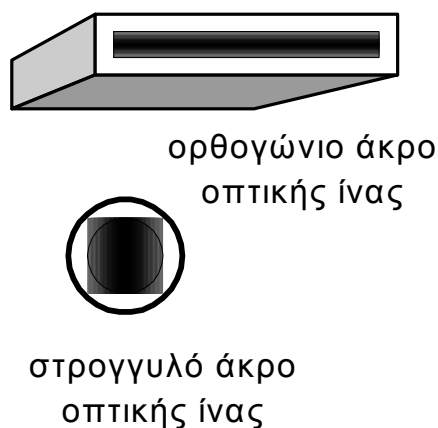
Στη συνέχεια έγινε προσπάθεια προβολής με την βοήθεια ενός προσαρμογέα δέσμης οπτικών ινών (fiber optic bundle, taper). Ο προσαρμογέας αυτός αποτελείται από παράλληλες οπτικές ίνες, που έχουν μικρότερη διατομή στην έξοδό του, από αυτή που έχουν στην είσοδό του. Με αυτόν τον τρόπο μετασχηματίζει σύμμορφα μια οπτική επιφάνεια σε μία άλλη. Κατασκευάστηκε ένα μηχανικό σύστημα με μικρομετρικές ρυθμίσεις, το οποίο εφάρμοζε το bundle ακριβώς πάνω στην φωτοευαίσθητη περιοχή του CCD χωρίς ταυτόχρονα να το πιέζει με



το βάρος του bundle, το οποίο αξίζει να σημειωθεί ότι είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το μέγεθος του (όπως συμβαίνει με όλα τα γυάλινα αντικείμενα). Ακριβώς πάνω από το bundle εφαρμόσαμε το φίλτρο συμβολής και παρατηρήσαμε ότι η ένταση του φωτός που έφτανε στον ανιχνευτή ήταν σε πολύ καλύτερα επίπεδα από αυτά που είχαν σαν αποτέλεσμα οι φακοί. Με το bundle το σήμα ήταν σε ικανοποιητικά επίπεδα σε σχέση με το θόρυβο και ήταν πλέον δυνατόν να εντοπιστούν τα διάφορα μήκη κύματος. Το πρόβλημα που εμφανίστηκε σε αυτή τη κατασκευή ήταν ότι το bundle που ήταν διαθέσιμο είχε χαμηλό λόγο μετασχηματισμού με αποτέλεσμα και πάλι να μην συμπίπτουν οι διαστάσεις του φίλτρου και του φωτοευαίσθητου μέρους του CCD. Το διαθέσιμο bundle δεν ήταν σε θέση να προβάλει όλο το φίλτρο στο CCD με αποτέλεσμα να μην μπορούμε ταυτόχρονα να ανιχνεύσουμε φως στο κόκκινο και το μπλε.

Γι' αυτό μεταξύ του φίλτρου και του CCD εφαρμόζεται το bundle. Η κατασκευή υλοποιήθηκε έτσι ώστε το φίλτρο συμβολής να μπορεί να μετακινηθεί και να μπορούμε να έχουμε όλα τα μήκη κύματος σε διάφορες χρονικές στιγμές. Η μετακίνηση του φίλτρου γινόταν σε τέσσερις θέσεις, με αποτέλεσμα να χωρίζεται ουσιαστικά το φάσμα που μπορούσε να ανιχνεύσει το CCD και να αναλύσει το φίλτρο σε τέσσερις περιοχές. Η πρώτη κάλυπτε από 800nm-700nm, η δεύτερη από 700nm-600nm, η τρίτη από 600nm-500nm και η τέταρτη από 500nm-400nm. Έτσι, κάθε pixel του CCD έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει 100/512nm, δηλαδή περίπου 0,2nm του φάσματος. Με την βοήθεια του μικροεπεξεργαστή που είχαμε εφαρμόσει στο ηλεκτρονικό μέρος του φασματομέτρου καθώς και με τον κατάλληλο προγραμματισμό στον υπολογιστή ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη προβολή του φάσματος χωρίς να χάνονται δεδομένα, μπορέσαμε να συγχρονίσουμε το CCD153A με την κίνηση του φίλτρου.

Εκτός από το πρόβλημα της προβολής του φίλτρου στο CCD, έπρεπε να επιλυθεί ακόμα ένα πρόβλημα. Το φως που ερχόταν από την bifurcated ίνα στο φίλτρο κατέληγε σε στρογγυλό σχήμα με αποτέλεσμα να μην μπορεί στο φίλτρο να εισέρθει σωστά το φως. Γι'αυτό και συνδέσαμε στο άκρο της bifurcated ίνας, μια οπτική ίνα που το ένα άκρο της είναι στρογγυλό και το άλλο ορθογώνιο ίδιας περίπου διάστασης με το φίλτρο. Παρακάτω φαίνονται τα άκρα της ίνας.

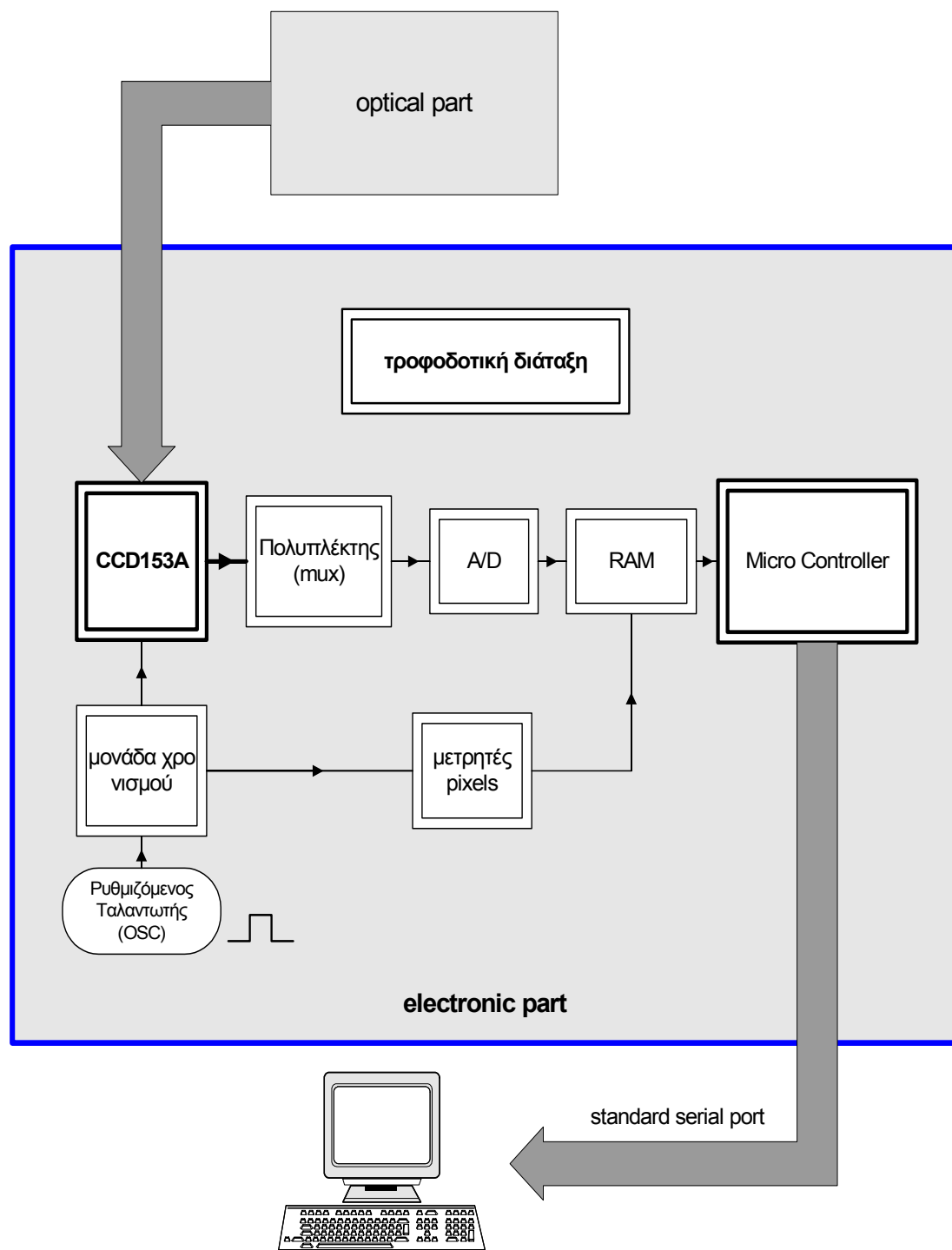


Τα αποτελέσματα που τελικά εξάχθηκαν με την παραπάνω μέθοδο-διάταξη είναι αρκετά ικανοποιητικά και θα αναλυθούν διεξοδικά στο κεφάλαιο 4.

Από όλη την παραπάνω διαδικασία μπορούμε να σχετικά εύκολα να συμπεράνουμε ότι αν εφαρμοστεί το κατάλληλο γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής στο κατάλληλο , από άποψη μεγέθους, γραμμικό CCD η μέθοδος «sandwich» θα μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε να σημειώσουμε ότι και με τα δεδομένα στοιχεία (V.I.F – CCD153A) θα μπορούσε να υλοποιηθεί η μέθοδος αν εφαρμοστούν δυο bundles σε σειρά (το ένα πάνω από το άλλο) ή ένα με μεγαλύτερη δυνατότητα σμίκρυνσης.

### 3.2 Υλοποίηση ηλεκτρονικού μέρους

Εκτός από το οπτοηλεκτρονικό μέρος, ένα από τα βασικά τμήματα αυτού του φασματόμετρου είναι και το ηλεκτρονικό, το οποίο αναλυτικά το παρουσιάζουμε παρακάτω:



Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε, αρχικά, μια τροφοδοτική διάταξη η οποία παρέχει αρκετές διαφορετικές στάθμες DC τάσης, που είναι απαραίτητες για να λειτουργήσουν οι πολλές και διαφορετικές κατηγορίες ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (CCD, analog CMOS, digital CMOS, analog bipolar και βαθμίδες με διακριτά στοιχεία) του κυκλώματος μας. Τα επίπεδα τάσης είναι 5V, 10, 12V και 14V.



Ένα από τα πιο βασικά εξαρτήματα της παραπάνω σχεδίασης είναι το γραμμικό CCD153A της Fairchild Imaging, το οποίο έχει την δυνατότητα να ανιχνεύει ροή φωτονίων χάρη στην φωτοευαίσθητη περιοχή 512 pixels που διαθέτει και να τη μετατρέπει σε δύο video σήματα. Φως κατευθύνεται από το γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής του οπτικού μέρους στην φωτοευαίσθητη περιοχή του CCD ώστε να γίνει δυνατή η μέτρηση της έντασης του φωτός σε κάθε μήκος κύματος και άρα η μέτρηση του φάσματος του υπό εξέταση δείγματος.

Η λειτουργία του CCD καθορίζεται από τη μονάδα χρονισμού. Αυτή είναι υπεύθυνη για να παρέχει τα απαραίτητα σήματα και με τον

κατάλληλο συγχρονισμό στο CCD ώστε η λειτουργία του να είναι βέλτιστη και αναμενόμενη. Αυτή η μονάδα περιέχει και ένα ταλαντωτή με συχνότητα εξωτερικά ελεγχόμενη, έτσι ώστε να μπορεί ο χρήστης να ελέγχει χρόνο έκθεσης των ανιχνευτικών κυψελίδων της φωτοευαίσθητης περιοχής του CCD.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην έξοδο του CCD εμφανίζονται δύο video σήματα. Αυτά κατευθύνονται σε ένα πολυπλέκτη ο οποίος στην έξοδο του δίνει ένα video σήμα που απεικονίζει το φάσμα του δείγματος. Το σήμα αυτό οδηγείται σε ένα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και σε ψηφιακή πλέον μορφή αποθηκεύεται σε δυο μνήμες. Η διεύθυνση εγγραφής αυτών των μνημών οδηγείται από την έξοδο μιας διάταξης μετρητών pixels, ώστε να εγγράφεται το κάθε pixel στην αντίστοιχη της αρίθμησης που είχε στο CCD θέση στη μνήμη. Όπως έχουμε αναφέρει και στην παράγραφο 2.2.1.4 η σημαντική πληροφορία του σήματος video περιέχει εκτός από τα 512 φωτοστοιχεία, τέσσερα pixel με τη στάθμη του σκότους και δύο με τη στάθμη της μέγιστης φωτεινότητας. Μεταξύ των χρονικών στιγμών της χρήσιμης πληροφορίας υπάρχουν και χρόνοι χωρίς πληροφορία ώστε να αποφεύγεται η αλληλεπίδραση διαφορετικών χρήσιμων σταθμών.

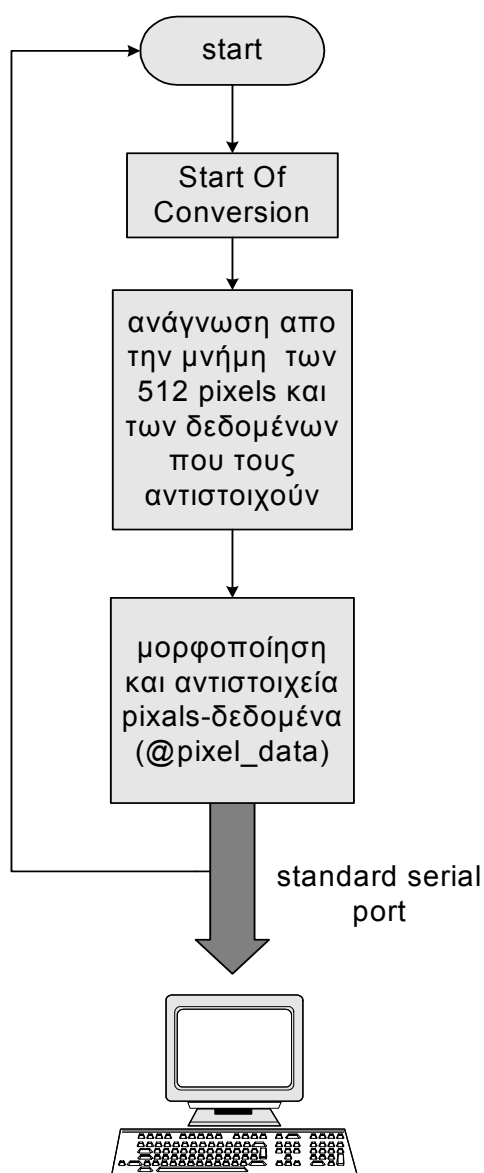
Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε είναι 8051 συμβατός (DS2250) και διαβάζει δεδομένα από τις μνήμες, τα επεξεργάζεται κατάλληλα και τα στέλνει μέσω της σειριακής στον υπολογιστή. Στην επόμενη παράγραφο θα αναλυθεί διεξοδικά η επεξεργασία των δεδομένων από τον DS2250 και τον υπολογιστή.

### **3.3 Υλοποίηση λογισμικού**

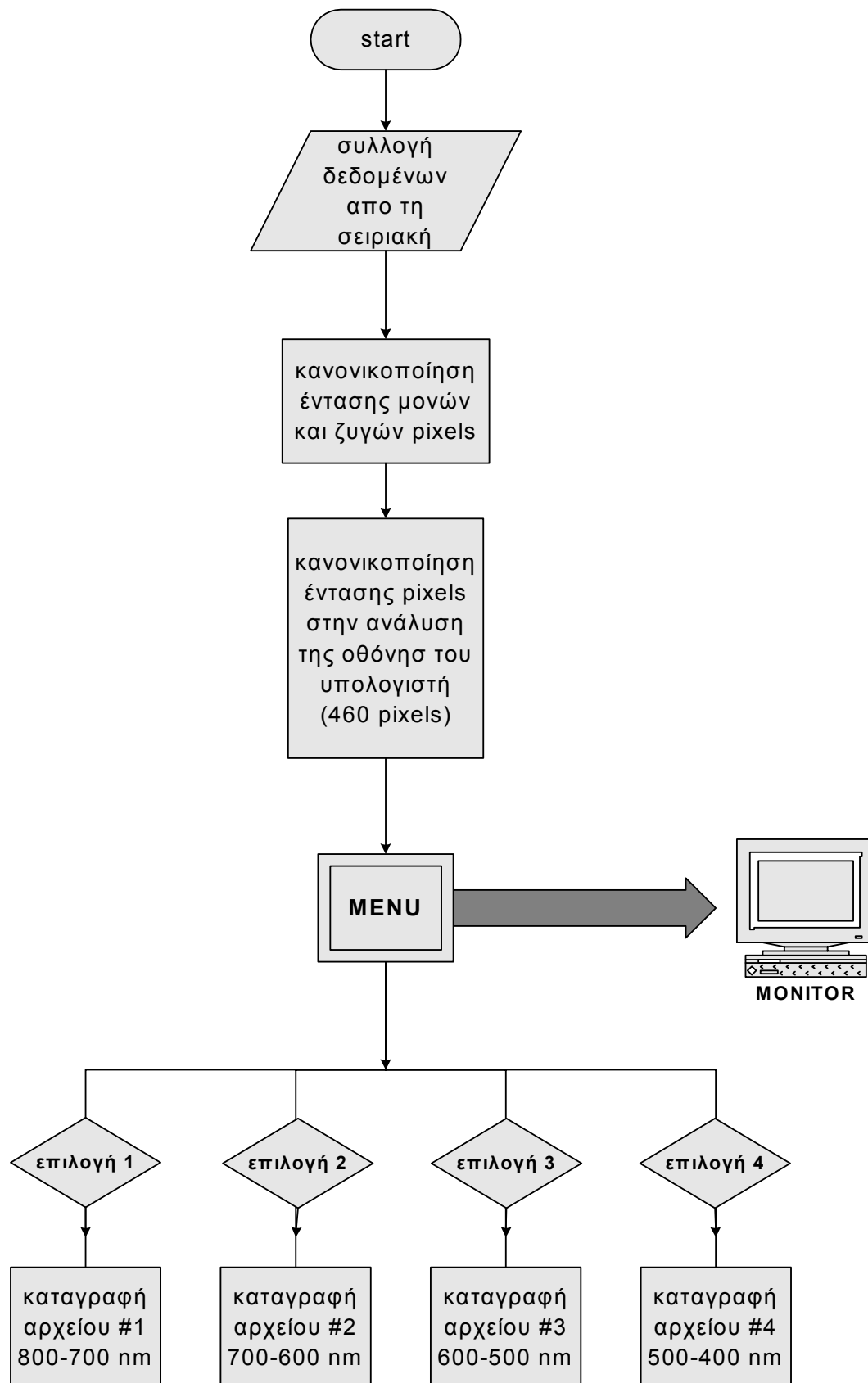
Το τελευταίο τμήμα του οπτικού φασματόμετρου που υλοποιήθηκε είναι ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή DS2250 καθώς και η

δημιουργία ενός προγράμματος στον υπολογιστή το οποίο απεικονίζει την ανάλυση του φάσματος ενός δείγματος σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε στον μικροελεγκτή έχει ως βασικό του στόχο την ανάγνωση των δεδομένων από την μνήμη, τη σωστή αντιστοίχιση pixel-δεδομένων, την κατάλληλη επεξεργασία ώστε να είναι τα δεδομένα αναγνώσιμα από τον υπολογιστή και την αποστολή τους στη σειριακή θύρα του υπολογιστή.



Ο υπολογιστής με τη σειρά του, μέσω προγράμματος που υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού BASIC, συλλέγει τα μορφοποιημένα δεδομένα από την σειριακή του θύρα, τα αποκωδικοποιεί, δηλαδή διαχωρίζει ποια δεδομένα αναφέρονται στη θέση των pixels και ποια στα data (ένταση φωτός) και κανονικοποιεί την μέση ένταση του φωτός των μονών με τα ζυγά pixels. Αυτή η κανονικοποίηση γίνεται γιατί παρατηρήθηκε ότι μεταξύ των δυο video σημάτων που έδινε στην έξοδο του το CCD153A υπήρχε κάποια διαφορά, η οποία ήταν χρονικά μεταβαλλόμενη και ενγενής του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου. Στη συνέχεια γίνεται προσαρμογή της τιμής κάθε pixel στο ύψος της οθόνης του υπολογιστή και τυπώνεται μια κάθετη γραμμή ανάλογου μήκους στην οριζόντια θέση της οθόνης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο pixel. Με το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε στον υπολογιστή δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη του φασματομέτρου να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την ανάλυση του φάσματος του δείγματος που εξετάζει. Τέλος, δίνεται στο χρήστη, μέσω του υπολογιστή η δυνατότητα να καταγράφει την ανάλυση του φάσματος του δείγματος του σε κάθε φάση του, δηλαδή και στις τέσσερις περιοχές του φάσματος, σε αριθμημένα αρχεία .txt τα οποία μπορεί εύκολα να τα μετατρέψει σε γραφήματα. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατόν να καταγραφούν τα αποτελέσματα του φασματομέτρου που κατασκευάστηκε και θα αναλυθούν διεξοδικά στο κεφάλαιο 4. παρακάτω παρατίθεται ένα flow chart του κώδικα που υλοποιήθηκε στον υπολογιστή και ρυθμίζει όλες τις παραπάνω λειτουργίες.



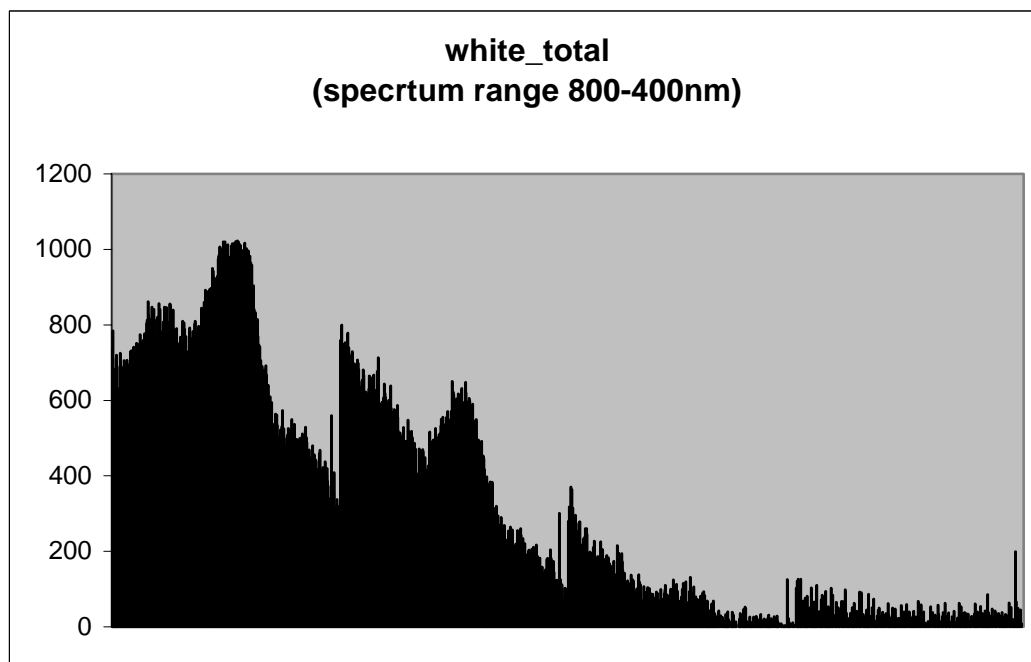


## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> :**

### **4.1 Μέτρηση φάσματος :**

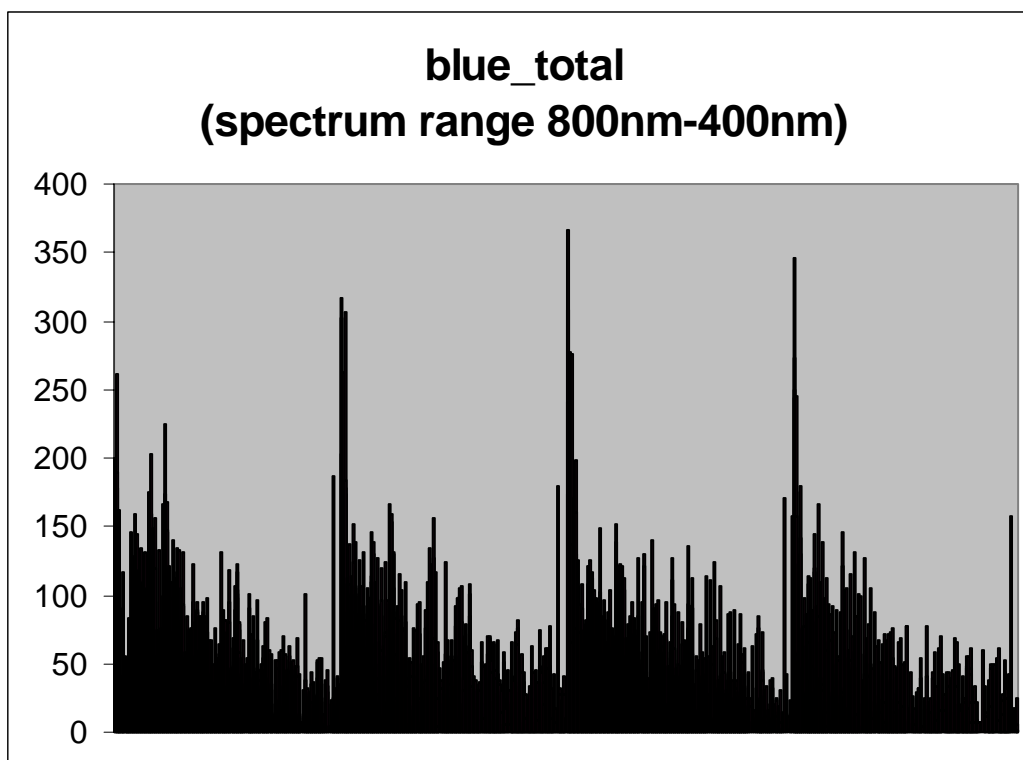
Σε αυτή την διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε το οπτικό φασματόμετρο που περιγράφηκε παραπάνω και έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

Αρχικά, δοκιμάστηκε το σύστημα στο λευκό φως για να ελεγχθεί την ποιότητα της φασματικής του ανάλυσης. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα υπό εξέταση μια λευκή κόλλα χαρτί A4, ως πηγή φωτός μια πηγή αλογόνου και ρυθμίστηκε ως συχνότητα λειτουργίας του φασματόμετρου το 1Hz. Το πείραμα επαναλήφθηκε για 10 φορές με τις ίδιες συνθήκες φωτισμού, ίδιο δείγμα και την ίδια συχνότητα λειτουργίας του φασματόμετρου και πάρθηκαν κάποιες τιμές των οποίων η συνολική απεικόνιση φαίνεται παρακάτω.



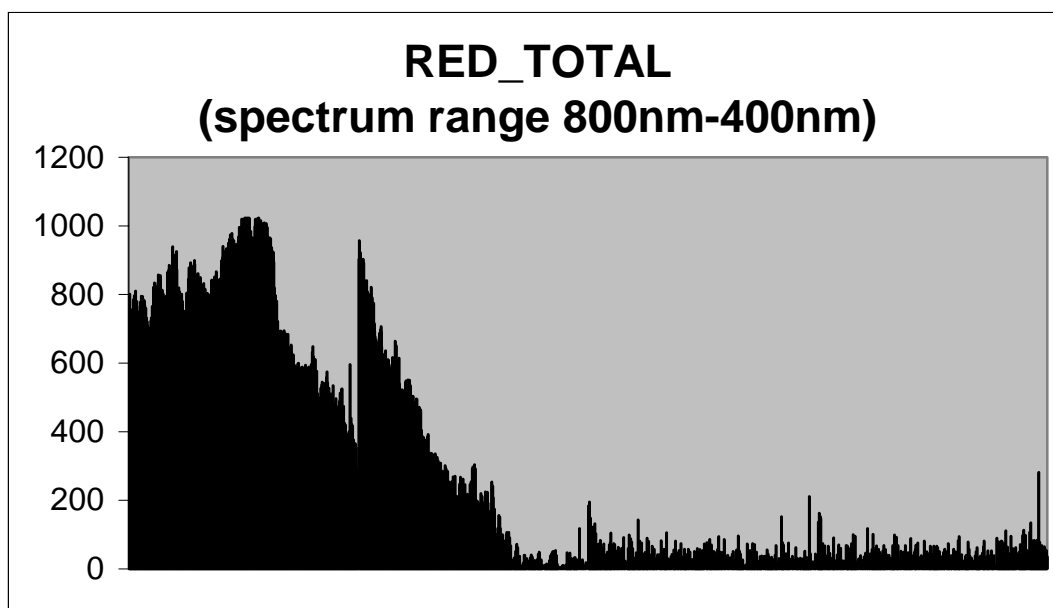
Αυτή η γραφική παράσταση παρουσιάζει την φασματική ανάλυση του λευκού φωτός με το φασματόμετρο που κατασκευάστηκε. Παρατηρείται ότι από 800 έως περίπου 650nm η φασματική ανάλυση είναι ικανοποιητική. Παρουσιάζεται μια προσεγγιστική ομοιομορφία στην ένταση σ' αυτά τα μήκη κύματος, αντίθετα από 650nm έως και τα 400nm οι τιμές παρουσιάζουν μια κάθετη πτώση που αγγίζει τα όρια του θορύβου που παρουσιάζει το φασματόμετρο. Ύστερα, από αρκετούς πειραματισμούς και διεξοδική μελέτη του συστήματος και των αποτελεσμάτων των πειραμάτων συμπεραίνεται ότι το γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής που χρησιμοποιήθηκε καθώς και οι οπτικές ίνες έχουν έντονη απορροφητικότητα στην περιοχή του μπλε χρώματος του φάσματος, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπουν στο φως αυτού του μήκους κύματος να ανιχνευτεί από το CCD. Αυτό θα γίνει περισσότερο κατανοητό στα αποτελέσματα των πειραμάτων για δείγματα μπλε χρώματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για φασματική ανάλυση δείγματος χρώματος μπλε. Σε αυτά τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ακριβώς η ίδια πηγή αλογόνου, το φασματόμετρο ρυθμίστηκε να λειτουργεί στα 1Hz και το δείγμα υπό εξέταση ήταν ένα ματ χαρτόνι μπλε σκούρου χρώματος. Αφού πραγματοποιήθηκε το πείραμα στις ίδιες συνθήκες για 10 φορές διεξάχθηκαν συνολικά τα παρακάτω αποτελέσματα που απεικονίζονται στην γραφική παράσταση που ακολουθεί.



Παρατηρείται μια έντονη ανομοιομορφία κατά μήκος όλου του φάσματος. Αντίθετα με το γράφημα που θα έπρεπε να απεικονίζει χαμηλές έντασης κατά μήκος όλου του φάσματος εκτός από την περιοχή του μπλε όπου θα έπρεπε να παρατηρείται η ένταση να φτάνει σε ανώτατα επίπεδα, η γραφική μας παράσταση απεικονίζει χαμηλά επίπεδα της έντασης του φωτός κατά μήκος όλου του φάσματος εκτός από κάποιες κορυφές που υπάρχουν λόγω θορύβου.

Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε η λειτουργία του φασματόμετρου για ένα δείγμα χρώματος κόκκινου. Και για αυτή την πειραματική φασματική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες συνθήκες φωτισμού (πηγή αλογόνου), καθώς και η ίδια συχνότητα λειτουργίας του φασματόμετρου (1Hz). Το δείγμα υπό εξέταση ήταν ένα ματ κόκκινο χαρτόνι έντονου κόκκινου χρώματος.

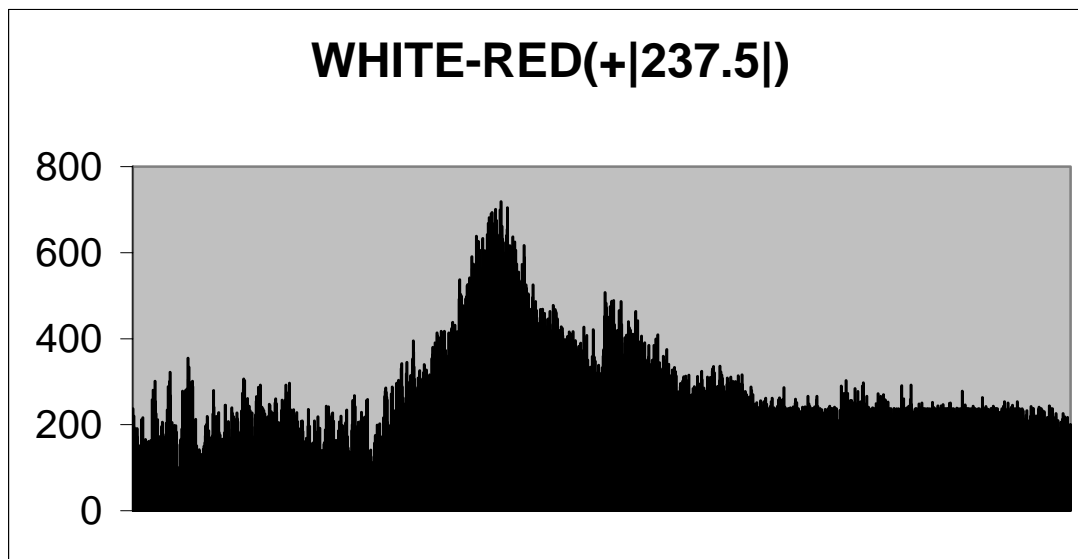


Και για αυτό το δείγμα το πείραμα επαναλήφθηκε 10 φορές με τις ίδιες συνθήκες και το μέσο όρο και των δέκα επαναλήψεων απεικονίστηκε στο παραπάνω γράφημα. Παρατηρείται ότι από 800nm έως περίπου και 700nm ένταση του φωτός είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές του φάσματος. Έτσι, επαληθεύεται ότι η συμπεριφορά του φασματόμετρου που κατασκευάστηκε με αυτή την μεθοδολογία είναι πολύ αποδοτικό στην περιοχή του φάσματος γύρω από το κόκκινο.

Εξετάζοντας συνολικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν για την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του οπτικού φασματόμετρου με γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής που κατασκευάστηκε, παρατηρείται ότι παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά στην περιοχή του κόκκινου και γύρω από αυτή, ενώ υστερεί στην περιοχή του μπλε λόγω του φίλτρου και των οπτικών ινών που χρησιμοποιήθηκαν και έχουν έντονη απορροφητικότητα στην περιοχή αυτή.

Τα παραπάνω τεκμηριώνονται και με την παρουσίαση των παρακάτω γραφικών παραστάσεων pixels-έντασης φωτός που

απεικονίζουν την διαφορά της φασματικής ανάλυσης του κόκκινου δείγματος με το λευκό.



Αυτή η γραφική παράσταση απεικονίζει την διαφορά του λευκού χρώματος από το κόκκινο του δείγματος προσθέτοντας την μεγαλύτερη σε απόλυτη τιμή από τις αρνητικές διαφορές που εμφανίστηκαν με την αφαίρεση αυτή, η οποία είναι το 237,5. Παρατηρείται ότι οι περιοχές όπου η σκασμένη επιφάνεια του γραφήματος είναι μικρή παρουσιάζεται η φασματική περιοχή όπου το δείγμα έχει μεγαλύτερη φωτεινότητα, εκτός από τις περιοχές του φάσματος που είναι γύρω από το μπλε (τέλος γραφήματος) όπου το φασματόμετρο παρουσιάζει ασυνεπή συμπεριφορά.

#### **4.2 Τεχνική αξιολόγηση :**

Για να γίνει σωστή αξιολόγηση του συστήματος που κατασκευάστηκε, εκτός από την διεξαγωγή πειραμάτων για να ελεγχθεί η ποιότητα της φασματικής ανάλυσης του οργάνου, είναι σημαντικό να αξιολογηθούν και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά αναλυτικά.

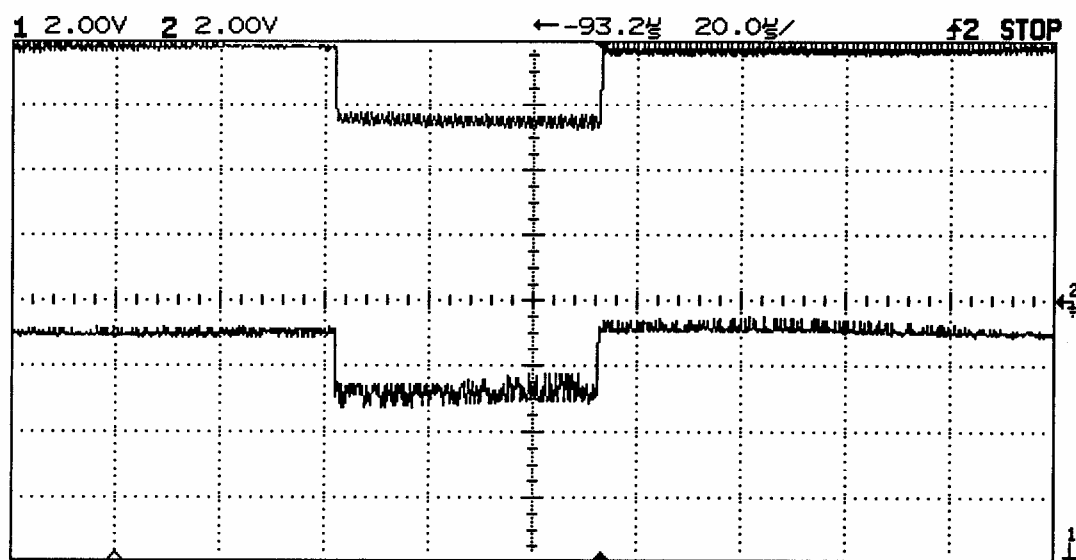
Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαίο να διαχωριστεί το σύστημα στα επιμέρους μέρη του. Αρχικά, το οπτοηλεκτρονικό μέρος παρουσιάζει σημαντικές απώλειες γύρω από την περιοχή του μπλε. Αυτό οφείλεται κυρίως από την έντονη απορροφητικότητα που παρουσιάζεται σε αυτή την περιοχή και στην οπτική ίνα και στο φίλτρο συμβολής. Χαρακτηριστικά, η διακλαδούμενη οπτική ίνα παρουσιάζει την ελάχιστη απώλεια της τάξης του 15-20% κατά μήκος όλου του φάσματος αλλά ιδιαίτερα στην περιοχή του μπλε υπολογίζεται γύρω στο 30%. Σημαντικές απώλειες παρουσιάζει και το φίλτρο συμβολής, οι οποίες είναι της τάξης του 50-60%. Και το γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής έχει έντονη απορροφητικότητα στο φως της περιοχής γύρω από το μπλε.

Από τα παραπάνω, εύκολα συμπεραίνεται ότι το σύστημα παρουσιάζει σημαντικές απώλειες οι οποίες στην περιοχή του μπλε είναι καταλυτικές για τη λειτουργία του συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φασματόμετρο που κατασκευάστηκε να παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά στην φασματική περιοχή του κόκκινου, ικανοποιητική στη φασματική περιοχή του κίτρινου και πράσινου και χειρίστη στην περιοχή του μπλε.

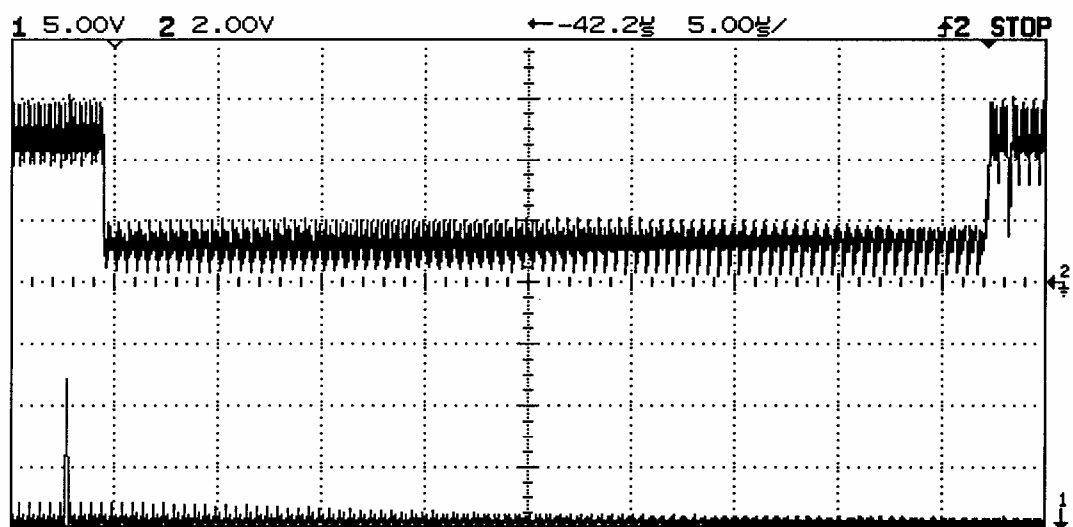
Για να γίνει εμπεριστατωμένη η τεχνική αξιολόγηση σημαντικό είναι να αναλυθούν διεξοδικά τα σήματα που παρατηρούνται στα διάφορα μέρη του φασματόμετρου. Γι' αυτό το σκοπό με την χρήση ενός παλμογράφου απεικονίστηκαν τα σήματα που θα αναλυθούν παρακάτω.

Αρχικά, παρατηρείται στην ακόλουθη γραφικά παράσταση χρόνου προς τάσης τα δύο video σήματα από την έξοδο του CCD153A. Το κάτω σήμα (κανάλι 1 του παλμογράφου) απεικονίζει το video σήμα που παράγουν τα μονά pixels του CCD153A, ενώ το πάνω σήμα (κανάλι 2 του παλμογράφου) απεικονίζει το δεύτερο video σήμα που παράγεται από τα ζυγά pixels του CCD153A. Εύκολα παρατηρείται διαφορά στα

δύο σήματα, το σήμα στο κανάλι 1 περιέχει έντονο θόρυβο σε σχέση με αυτό στο κανάλι 2 και αισθητή διαφορά τάσης. Αυτό το φαινόμενο είναι χαρακτηριστικό του δεδομένου CCD (linear CCD153A της Fairchild Imaging ) και οδήγησε στην διαδικασία της κανονικοποίησης των δύο σημάτων μέσω λογισμικού.



Στη συνέχεια, παρατίθεται το σήμα της εξόδου του multiplexer που πολυπλέκει τα δύο video σήματα που παράγει το CCD153A. Και αυτή η γραφική παράσταση είναι χρόνου –τάσης και δείχνει ακόμα πιο έντονα την διαφορά τάσης μεταξύ των δύο σημάτων. Το κάτω σήμα απεικονίζει το start of conversion (S.O.C.) το οποίο δίνει ο χρήστης.

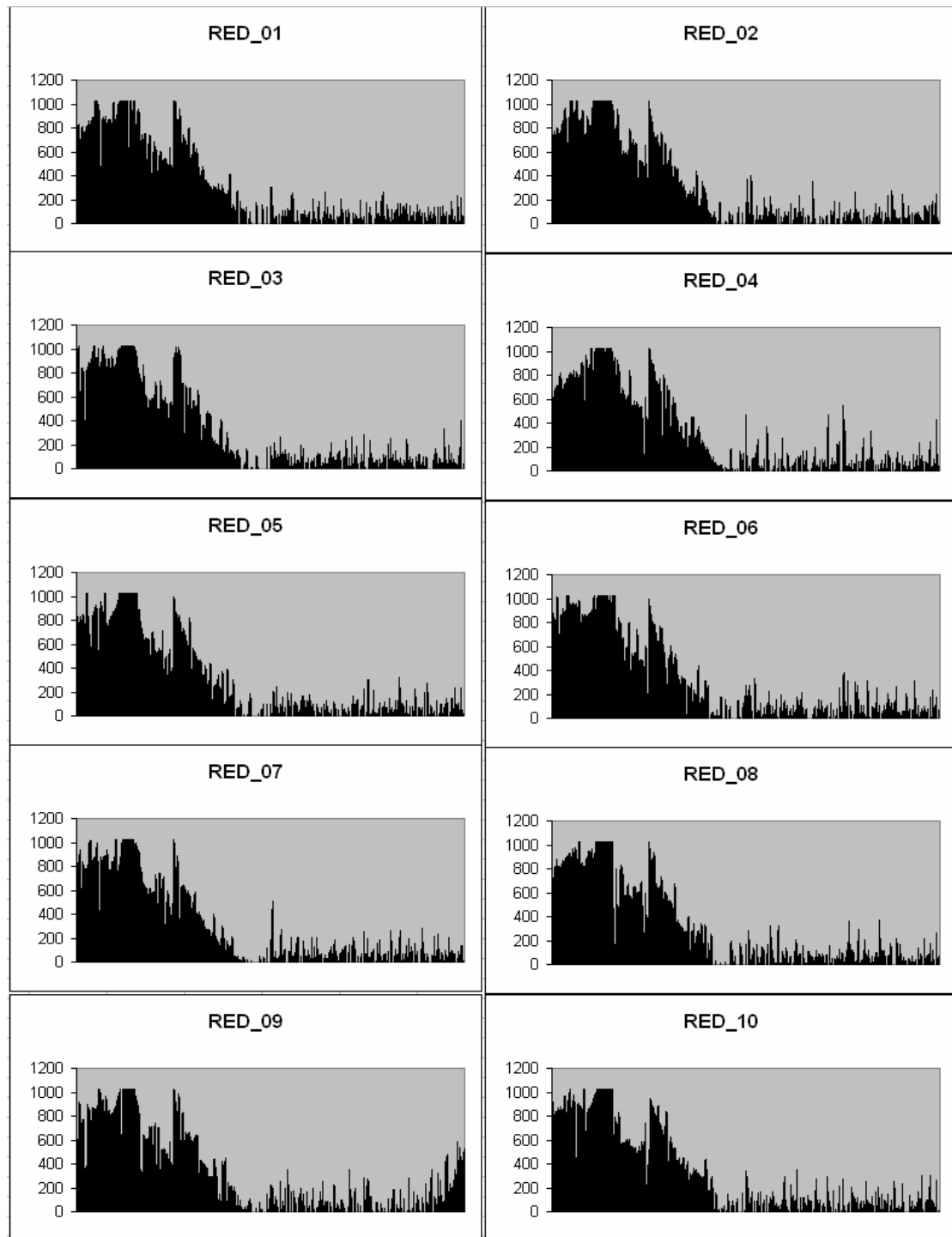


### **4.2.1 Επαναληψιμότητα :**

Για να είναι πιο τεκμηριωμένη η μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών του φασματόμετρου εκτός από τα σήματα που απεικονίστηκαν μέσω παλμογράφου είναι σημαντικό να εξεταστεί και η επαναληψιμότητα του συστήματος.

Αυτό εξετάστηκε πειραματικά με το να διεξάγεται το κάθε πείραμα 10 φορές σε ίδιες συνθήκες και να συγκρίνονται τα αποτελέσματα τους. Έτσι, όπως παρατηρείται και παρακάτω, αρχικά για δείγμα κόκκινου χρώματος η φασματική ανάλυση ήταν η παρακάτω.

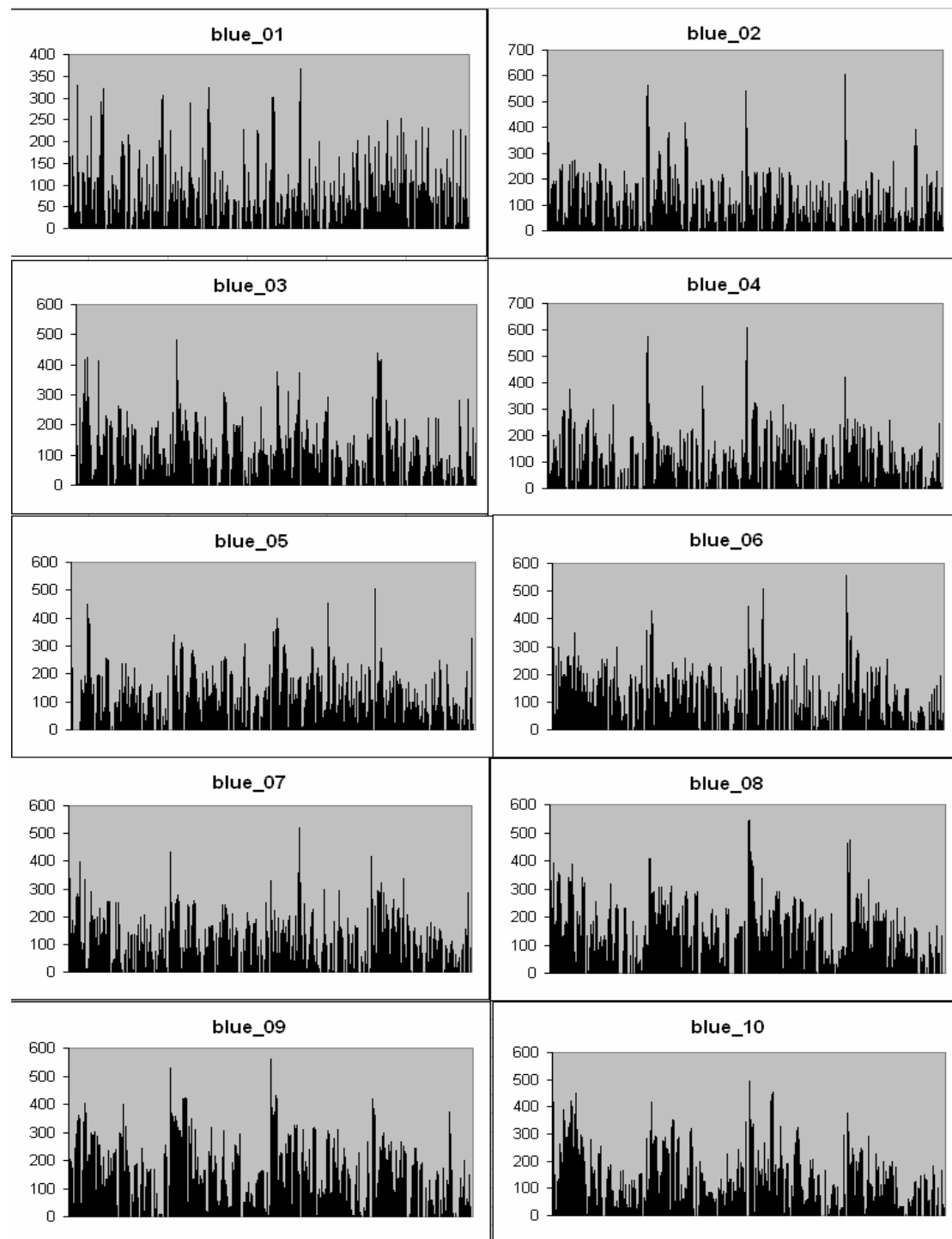




Παρατηρώντας στο σύνολο τους τις παραπάνω γραφικές, είναι εμφανές ότι παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες και αποδεικνύουν ότι το φασματόμετρο παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά στην φασματική ανάλυση του κόκκινου δείγματος. Γι'αυτό είναι αρκετά ασφαλές να

διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι η επαναληψιμότητα του οπτικού φασματόμετρου που κατασκευάστηκε στο κόκκινο χρώμα αγγίζει το ποσοστό του 90-95%.

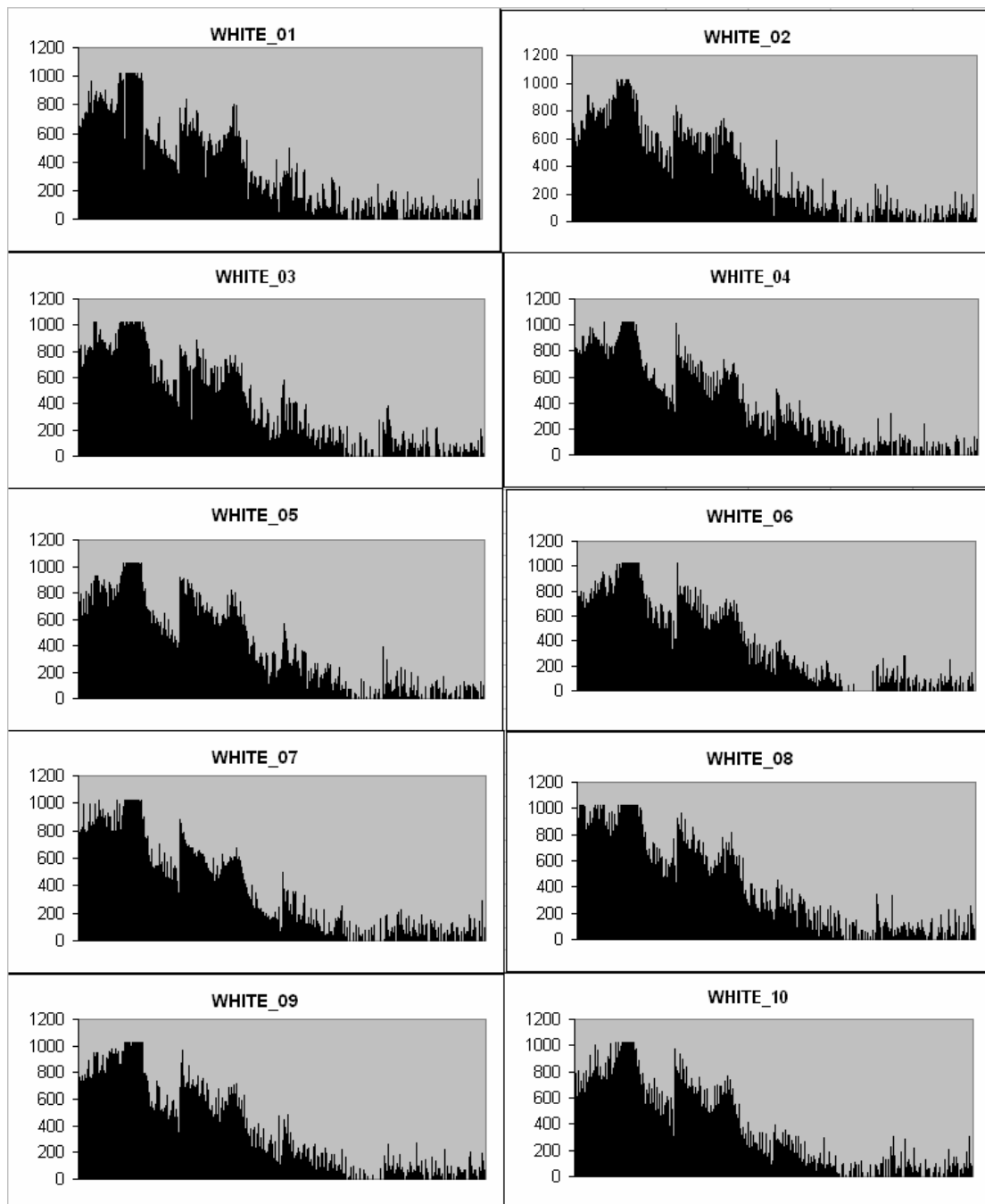
Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για το μπλε χρώμα και έδωσε τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις.



Στα πειράματα που διεξάχθηκαν για τη φασματική ανάλυση δείγματος μπλε χρώματος παρατηρήθηκε αρκετά μεγάλη ομοιότητα στις γραφικές παραστάσεις παρότι η απόδοση του φασματομέτρου σ' αυτή την περιοχή ήταν μέτρια. Αυτό οδηγεί στο ασφαλές συμπέρασμα ότι και σ' αυτήν την

περιοχή η επαναληψιμότητα του οργάνου είναι σε αρκετά υψηλά επίπεδα, γύρω στο 75-85%.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε φασματική ανάλυση σε δείγμα λευκού χρώματος 10 φορές με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων απεικονίζονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις.



Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις είναι εμφανές ότι παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα έως και ταύτιση σε μερικές περιπτώσεις, με αποτέλεσμα το ποσοστό επαναληψιμότητας του οπτικού φασματόμετρου στην περιοχή του λευκού να είναι μεγάλο και να αγγίζει το 95%

Από όλα τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η επαναληψιμότητα του οργάνου σε όλες τις περιοχές που εξετάστηκαν κυμαίνεται από 75-95% ποσοστό αρκετά μεγάλο που δίδει στην κατασκευή αυτή μεγάλη αξιοπιστία.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> :**

### **5.1 Συμπεράσματα :**

Η κατασκευή και μελέτη του οπτικού φασματόμετρου βασισμένο σε γραμμικά μεταβαλλόμενο φίλτρο συμβολής που υλοποιήθηκε πιστοποίησε ότι η μέθοδος «sandwich», δηλαδή η εφαρμογή της οπτικής ίνας ακριβώς πάνω στο φίλτρο συμβολής και η εφαρμογή του φίλτρου ακριβώς πάνω στην φωτοευαίσθητη περιοχή του ενός γραμμικού CCD, λειτουργεί ικανοποιητικά και μπορεί να αποδώσει σημαντικά αν χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα εξαρτήματα τόσο από οπτικής πλευράς όσο και από ηλεκτρονικής.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η κατασκευή φασματόμετρου με αυτή την μεθοδολογία έχει ιδιαίτερα μεγάλο κόστος λόγω των οπτικών εξαρτημάτων που χρειάζονται. Ενδεικτικά, το κόστος των φίλτρων συμβολής κυμαίνεται γύρω στις 2,000\$-4,000\$ και των γραμμικών CCD στα 1,000\$- 3,000\$.

### **5.2 Προοπτικές — Βελτιώσεις :**

Η σχεδίαση και κατασκευή αυτού του οπτικού φασματόμετρου με την συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να σχεδιαστεί με ένα γραμμικό CCD με περισσότερα pixels, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη φασματική ανάλυση καθώς και με φίλτρο συμβολής συμβατά από άποψη διαστάσεων με την φωτοευαίσθητη περιοχή του CCD και να δώσει πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Αυτή η μεθοδολογία σχεδίασης φασματόμετρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή οργάνου που μπορεί να ανιχνεύει

παθολογικούς ιστούς . Αυτό μπορεί να γίνει με το να χρωματιστεί το μέρος του ιστού που εξετάζεται με κατάλληλες χρωστικές ώστε να διαφοροποιούνται χρωματικά τα παθολογικά από τα υγιή. Έτσι με την φασματική ανάλυση του δείγματος του ιστού είναι δυνατός ο διαχωρισμός των υγιή από των μη κυττάρων, χωρίς χειρουργική επέμβαση .

## Αναφορές-Βιβλιογραφία

- [1] Dooglas A. Skoog “Principles of instrumental analysis”, third edition, Saunders college publishing
- [2] Henry Zanger, Cynthia Zanger “Fiber Optics Communication And Other Applications”
- [3] John Eric Anderson “Fiber Optics: Multi-node Transmission”
- [4] Dr Stavros Pissadakis “Optoelectronics 2002”
- [5] Dr Konstantinos Balas “Σημειώσεις Οπτοηλεκτρονικής 2003”
- [6] Vikram Bhatia, Kent A Murphy, Richard O Clausy, Mark E Jones, Jennifer L Grace, Tuan A Tranz and Jonathan A Greenez “Optical fibre based absolute extrinsic Fabry–Pérot interferometric sensing system”, Meas. Sci. Technol. **7** (1996)
- [7] [http://kerouac.pharm.uky.edu/ASRG/ideal\\_method.htm](http://kerouac.pharm.uky.edu/ASRG/ideal_method.htm) General Overview of Spectroscopy
- [8] <http://www.omega.com/> Omega Fiber Optics
- [9] <http://www.mpe.mpg.de> Circular Variable Filters
- [10] <http://www.fairchildimaging.com/main/index.htm> Faichild Imaging Linear Arrays
- [11] <http://www.etradetianjin.com/index.htm> Fiber Optics Taper
- [12] <http://www.us.schott.com/english/index.html> Interference Filters
- [13] Καφετζή Γεώργιο -Μπαράτη Ευδόξιο “Οπτικές Ίνες” Project Οπτοηλεκτρονικής 2003
- [14] Μακάκης Μιχάλης “Θεωρία CCD”, Χανιά 2003
- [15] Παπαδάκης Εμμανουήλ “Οπτική Βιοψία”, Χανιά 2003