



ΣΧΟΛΗ Σ.Τ.Ε.Φ.
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ



**«ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ»**

ΣΤΕΦΑΝΑΚΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

**Επιβλέπων καθηγητής :
ΚΟΥΔΟΥΜΑΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**

Ηράκλειο, 2012

για τη σύζυγό μου Βούλα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας, παράλληλα ολοκληρώνεται το τελευταίο μεγάλο βήμα, όπου η φοιτητική ζωή γίνεται παρελθόν και οι γνώσεις που αποκτήθηκαν εφαρμόζονται πλέον στην πράξη. Γι' αυτό το σημαντικό βήμα στη ζωή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με στήριξαν στην πορεία αυτή.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή μου, κύριο Κουδουμά Εμμανουήλ, για τις γνώσεις τις οποίες μου προσέφερε κατά τη φοίτησή μου, καθώς και για την καθοδήγηση στην πτυχιακή εργασία μου, η οποία προσανατόλισε την σκέψη μου.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου Αντώνιο και Στυλιανή και την αδελφή μου Διαμάντα, για την στήριξη (οικονομική και κυρίως ψυχολογική) και για την υπομονή που επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θέλω να αφιερώσω την εργασία αυτή στη σύζυγό μου Μισοδράκου Παρασκευή, η οποία κατέβαλε κάθε δυνατή προσπάθεια, ώστε να γίνει όσο το δυνατό λιγότερο επίπονη η διαδικασία της συγγραφής, μιας και κατά τη διάρκεια της θητείας μου, με συνεχή επικοινωνία, η βοήθειά της ήταν καταλυτική στην πορεία της πτυχιακής. Η συμπαράστασή της ήταν ο θεμέλιος λίθος για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ABSTRACT

Στην περίληψη αναφέρονται τα κυριότερα σημεία του κυρίου μέρους της εργασίας και των συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στον πρόλογο γίνεται αναφορά του αντικειμένου της εργασίας, του σκοπού της και του τρόπου δόμησής της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Εδώ γίνεται μια γενική αναφορά στις βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία των φωτοανιχνευτικών διατάξεων και των χαρακτηριστικών τους. Επίσης παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες φωτοανιχνευτών και τα χαρακτηριστικά της κάθε μίας από αυτές.

Οι επιμέρους ενότητες του κεφαλαίου αφορούν:

- 3.1 Θεωρητική Εισαγωγή**
 - 3.1.1 Φωτονική**
 - 3.1.2 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο**
 - 3.1.2.1 Φωτοδίοδος**
 - 3.1.2.2 Εξωτερικό Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο**
 - 3.1.2.1.1 Φωτοηλεκτρική Εκπομπή**
 - 3.1.2.3 Εσωτερικό Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο**
 - 3.1.2.3.1 Οπτική Απορρόφηση**
 - 3.1.2.3.2 Μηχανισμοί Οπτικής Διέγερσης**
 - 3.1.2.3.3 Μηχανισμοί Επανασυνδέσεων - Παραγωγή Φωτός**
 - 3.1.2.3.4 Φωτοαγωγιμότητα**
 - 3.2 Αρχή Λειτουργίας**
 - 3.2.1 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Φωτοανιχνευτών**
 - 3.2.1.1 Ευαισθησία**
 - 3.2.1.2 Θόρυβος Φωτοανιχνευτών**
 - 3.2.1.2.1 Απάλειψη Θορύβου Κατόπιν Διαμόρφωσης του Σήματος με Τεμαχισμό (Chopping)**
 - 3.2.1.3 Ελάχιστη Στάθμη Θορύβου**
 - 3.2.1.4 Ανιχνευτικότητα**
 - 3.2.1.5 Κβαντική Απόδοση**
 - 3.2.1.6 Ταχύτητα Απόκρισης**
 - 3.2.2 Κατηγορίες Φωτοανιχνευτών**
 - 3.2.2.1 Θερμικοί ανιχνευτές**
 - 3.2.2.2 Φωτοαγωγιμοί Ανιχνευτές**

- 3.2.2.3 Φωτοβολταϊκοί Ανιχνευτές
- 3.2.2.4 Φωτοανιχνευτές Εξωτερικής Φωτοεκπομπής
- 3.2.2.5 Διατάξεις Συζευγμένων Φορτίων (Charge Coupled Devices – CCD)
- 3.2.2.6 Φωτοανιχνευτές εκτός ορατού φάσματος
 - 3.2.2.6.1 Φωτοανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR)
 - 3.2.2.6.2 Φωτοανιχνευτές υπεριώδους ακτινοβολίας (UV)
 - 3.2.2.6.2.1 Γενικά για την υπεριώδη ακτινοβολία
 - 3.2.2.6.2.2 Φωτοανιχνευτές υπεριώδους
- 3.2.3 Βαθμονόμηση Φωτοανιχνευτών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι εφαρμογές που βρίσκουν οι φωτοανιχνευτές στη βιομηχανία, στην έρευνα, στην ιατρική και στους λοιπούς τομείς.

Οι επιμέρους ενότητες του κεφαλαίου αφορούν:

- 4.1 Εφαρμογές στον Ερευνητικό Τομέα
 - 4.1.1 Ανιχνευτές Σωματιδίων
 - 4.1.2 Ιατρική
- 4.2 Εφαρμογές σε άλλους Τομείς
 - 4.2.1 CCD camera

4.2.2 Ασύρματη Μετάδοση Δεδομένων

4.2.3 Βιομηχανία

4.2.4 Άλλες εφαρμογές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ-ΕΞΕΛΙΞΗ

Εδώ αναφέρονται προοπτικές βελτίωσής καθώς και η εξέλιξη των φωτοανιχνευτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εδώ αναφέρονται συμπεράσματα και επισημάνσεις που προκύπτουν από τη μελέτη του θέματος .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αναφορά των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας. Γίνεται διαχωρισμός τους σε έντυπες και σε ηλεκτρονικές πηγές από το διαδίκτυο, καθώς και σε ελληνικές και ξενόγλωσσες πηγές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια μελέτη των φωτοανιχνευτών, μιας δηλαδή συγκεκριμένης ομάδας οπτοηλεκτρονικών διατάξεων, οι οποίες ως αισθητήρες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συναντούν ένα πλήθος εφαρμογών σε πάρα πολλούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Η μελέτη των επιμέρους χαρακτηριστικών των διατάξεων που ανήκουν σ' αυτήν την κατηγορία καθίσταται αναγκαία λόγω της ποικιλομορφίας που παρουσιάζουν ως προς την αρχή λειτουργίας τους, ως προς το φάσμα ανίχνευσης, ως προς το σήμα στην έξοδο τους και ως προς την ακρίβειά τους. Για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης για μια δεδομένη εφαρμογή κρίνεται απαραίτητη η εμπειριστατωμένη γνώση όλων των παραπάνω στοιχείων.

ABSTRACT

The aim of this thesis is the study of photodetectors, a specific group of optoelectronic devices which, as sensors of electromagnetic radiation, find numerous applications in many technological fields. The study of the characteristics of these devices is considered necessary due to their diversity regarding their principle of operation, their detection range, their output and their accuracy. The selection of an appropriate device for a given application requires knowledge of all of the above characteristics.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η θεμελίωση της κβαντικής θεωρίας και η ανάπτυξη της ατομικής φυσικής κατά τα τελευταία χρόνια οδήγησαν όχι μόνο στην ανάδειξη νέων θεωρητικών ερευνητικών κλάδων, αλλά και σε ένα πλήθος νέων εφαρμογών που επέφεραν ριζικές και ραγδαίες αλλαγές στην τεχνολογία. Ήδη από το 1960 με την ανάδειξη της φωτονικής ως νέου επιστημονικού κλάδου, μια μεγάλη μερίδα της επιστημονικής κοινότητας στράφηκε στην έρευνα και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που βασίζονται στις αρχές της κβαντικής οπτικής. Το αποτέλεσμα όλων αυτών των εργασιών είναι η ανάπτυξη που παρουσιάζει σήμερα ένα πλήθος κλάδων, όπως είναι οι τηλεπικοινωνίες, οι διατάξεις λέιζερ με τις ποικίλες εφαρμογές τους, καθώς και πολλοί ακόμη τεχνολογικοί τομείς.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των φωτοανιχνευτών, μιας συγκεκριμένης ομάδας οπτοηλεκτρονικών διατάξεων, οι οποίες ως αισθητήρες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (και ιδιαίτερα της ακτινοβολίας που εμπίπτει στο ορατό φάσμα του φωτός) συναντούν ένα πλήθος εφαρμογών σε πάρα πολλούς τομείς.

Όσον αφορά τη δομή του κυρίως μέρους της εργασίας, αυτό χωρίζεται σε δύο κεφάλαια, ακολουθούμενα από ένα κεφάλαιο όπου γίνεται συνόψιση των συμπερασμάτων:

- Στο πρώτο κεφάλαιο του κυρίως μέρους γίνεται μια εκτενής αναφορά στην αρχή λειτουργίας των διαφόρων φωτοανιχνευτικών διατάξεων. Παρουσιάζονται όλα εκείνα τα θεωρητικά στοιχεία που

είναι απαραίτητα για τη ανάπτυξη ενός τέτοιου θέματος και γίνεται κατηγοριοποίηση των ανιχνευτικών διατάξεων ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους και τα διάφορα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η ευαισθησία, η ανιχνευτικότητα, η κβαντική απόδοση και η ταχύτητα απόκρισης.

- Στο δεύτερο κεφάλαιο του κυρίως μέρους δίνεται έμφαση στις εφαρμογές που βρίσκουν οι φωτοανιχνευτές σε διάφορους τομείς όπως οι τηλεπικοινωνίες, η βιομηχανία και ιατρική.
- Τέλος, στα συμπεράσματα αναφέρονται τα κυριότερα πορίσματα που εξάγονται από τη μελέτη του κυρίως μέρους της εργασίας και γίνεται αναφορά σε τυχόν προβλήματα λειτουργίας και προοπτικές βελτίωσης των ήδη χρησιμοποιούμενων φωτοανιχνευτικών διατάξεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: **ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ**

3.1 Θεωρητική Εισαγωγή

Προτού προχωρήσουμε στην αρχή λειτουργίας των φωτοανιχνευτών, είναι σκόπιμο να γίνει μια γενική αναφορά στις βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία των διατάξεων αυτών.

3.1.1 Φωτονική

Με τον όρο “φωτονική” αναφερόμαστε στον κλάδο εκείνο των επιστημών και της τεχνολογίας που ασχολείται με την δημιουργία, τον έλεγχο και την ανίχνευση φωτονίων, ιδιαίτερα στην περιοχή του ορατού φωτός, του υπεριώδους, αλλά και στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. (Photonics, 2010)

Αν και μπορούμε να πούμε πως υπάρχει κάποιος συσχετισμός μεταξύ της φωτονικής ως επιστήμης και της κβαντικής οπτικής, τα όρια μεταξύ τους δεν είναι σαφή. Συνήθως με τον όρο “κβαντική οπτική” αναφέρεται κανείς στην βασική έρευνα και με τον όρο “φωτονική” αναφέρεται στην εφαρμοσμένη έρευνα. Επίσης ο όρος “οπτοηλεκτρονική” αναφέρεται στη στενή περιοχή της μελέτης ενεργών αλλά και παθητικών

υλικών που αλληλεπιδρούν ηλεκτρικά με το φως. Επιπλέον, δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ αυτών των πεδίων και της οπτικής, ενώ χρησιμοποιούνται διαφορετικοί ορισμοί σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και σε διαφορετικές βιομηχανίες.

Το πεδίο της φωτονικής περιλαμβάνει την εκπομπή, την μετάδοση, την ενίσχυση, την ανίχνευση και την διαμόρφωση του φωτός. Οι φωτονικές διατάξεις περιλαμβάνουν τις οπτοηλεκτρονικές διατάξεις όπως τα λέιζερ και οι φωτοανιχνευτές, τους φωτονικούς κρυστάλλους, τις οπτικές ίνες, τους επίπεδους κυματοδηγούς και άλλα παθητικά οπτικά στοιχεία.

Μερικές από τις περιοχές όπου βρίσκει εφαρμογή η φωτονική είναι οι τηλεπικοινωνίες, η επεξεργασία πληροφοριών, η φωταψία, η μετρολογία, η φασματοσκοπία, η ολογραφία, η ιατρική (χειρουργική, διόρθωση όρασης, ενδοσκόπηση, παρακολούθηση υγείας), η επεξεργασία υλικών με χρήση λέιζερ, η τέχνη της όρασης, η βιοφωτονική, η ρομποτική και η άμυνα.

Ο τομέας της φωτονικής εμφανίστηκε ουσιαστικά το 1960, με την εφεύρεση των λέιζερ. Κατά την διάρκεια του 1970 η ανάπτυξη των οπτικών ινών όπως επίσης και των ενισχυτών προσμίξεων Ερβίου αποτέλεσαν την κύρια εφαρμογή της φωτονικής και έθεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, ενώ παρείχαν την απαραίτητη υποδομή για την ανάπτυξη του διαδικτύου.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη της φωτονικής σε περιοχές που δεν αφορούν τις τηλεπικοινωνίες και το διαδίκτυο. Επιπλέον αναμένεται τεράστια ανάπτυξη του πεδίου αυτού, αν ευοδωθούν οι προσπάθειες κατασκευής φωτονικών διατάξεων από πυρίτιο (silicon photonics). (Photonics, 2010)

3.1.2 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

3.1.2.1 Φωτοδίοδος

Βασικός ανιχνευτής ακτινοβολίας (σε ορατό φάσμα αλλά και εκτός ορατού φάσματος) είναι η φωτοδίοδος. Όπως γνωρίζουμε ένας τρόπος για να διασπάσουμε δεσμούς σε έναν ημιαγωγό και να δημιουργήσουμε ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές είναι να τον ακτινοβολήσουμε με φωτεινή ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος (ένας δεύτερος τρόπος διάσπασης των δεσμών είναι με την αύξηση της ανάστροφης τάσης). Προκειμένου να συμβεί κάτι τέτοιο θα πρέπει, τα φωτόνια της ακτινοβολίας να έχουν ενέργεια ην όσο χρειάζεται για τη διάσπαση του δεσμού. Σε αυτό ακριβώς το φαινόμενο στηρίζεται η λειτουργία των φωτοδίοδων.

Η φωτοδίοδος αποτελείται από μια επαφή pn που είναι τοποθετημένη μέσα σε διαφανές υλικό. Το υλικό αυτό είναι κατάλληλα χρωματισμένο ή σκεπάζεται με ειδικό μεταλλικό περίβλημα έτσι, ώστε το φως να πέφτει σε ορισμένη περιοχή της επαφής. Τα σύνολο έχει πολύ μικρό όγκο με διαστάσεις μερικά δέκατα του cm.

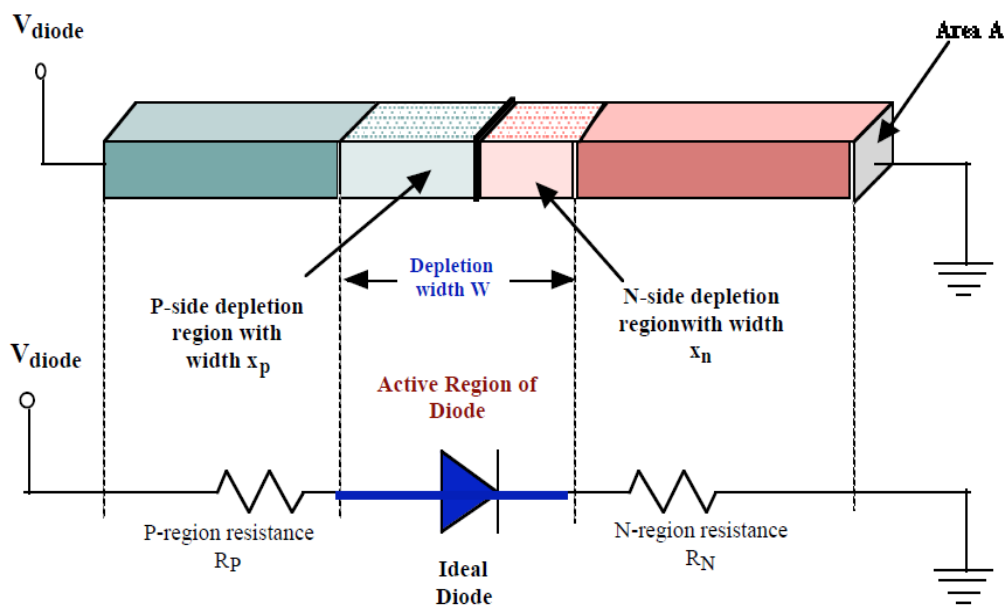
Όταν πολώσουμε ανάστροφα την επαφή pn, σε σκοτεινό χώρο, θα έχουμε ένα πολύ μικρό και σταθερό ανάστροφο ρεύμα. Αυτό λέγεται ρεύμα σκότους. Φωτίζοντας τη φωτοδίοδο με ακτινοβολία κατάλληλης συχνότητας, το ανάστροφο ρεύμα αυξάνεται, αφού τα προσπίπτοντα φωτόνια διασπούν τους δεσμούς του καθαρού ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέα ηλεκτρόνια και οπές, μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως, που προστίθεται σε αυτά που ήδη προϋπήρχαν. Η τιμή του ρεύματος εξαρτάται τόσο από το είδος της δίοδου, όσο και από την φωτεινή ροή και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των φωτοδιόδων είναι:

- Η περιοχή φάσματος της φωτεινής ακτινοβολίας στην οποία μπορεί να λειτουργεί
- Το ρεύμα σκότους
- Η μέγιστη ανάστροφη τάση λειτουργίας
- Η απόκριση συχνότητας. Μέχρι ποια συχνότητα λειτουργεί ικανοποιητικά
- Η ευαισθησία ρεύματος. Πόσο δηλαδή ρεύμα μπορεί να δώσει ανά μονάδα φωτισμού.

Πέρα από τις φωτοδιόδους επαφής pn, υπάρχουν και οι φωτοδιόδοι ακίδας που έχουν μεγάλες ταχύτητες λειτουργίας. Η χρησιμοποίησή τους είναι δυνατή σε διατάξεις που είναι εύκολη η εστίαση της ακτινοβολίας σε μια πολύ μικρή περιοχή. Υπάρχουν επίσης και φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας. Αυτές λειτουργούν με ανάστροφες τάσεις μεγαλύτερες από την τάση Zener, κυρίως στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Φωτοδιόδοι που μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλες ταχύτητες και με μεγάλη επιλεκτικότητα στη συχνότητα κατασκευάζονται με επαφή pn από διαφορετικά υλικά, όπως π.χ. GaAs τύπου p σε επαφή με Ge τύπου n.



(a) Basic Photodiode

3.1.2.2 Εξωτερικό Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

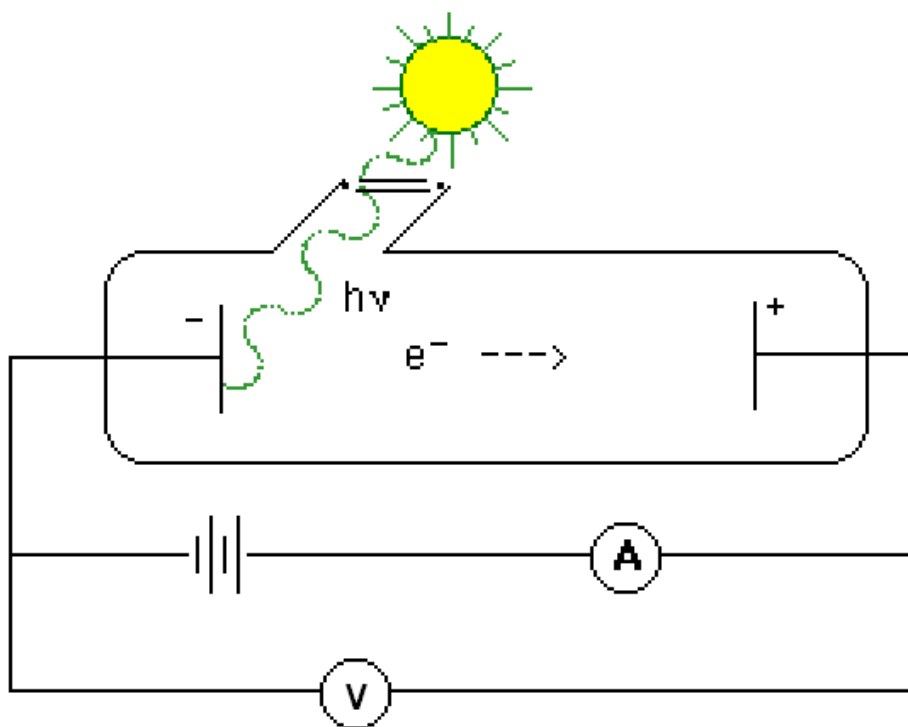
Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Heinrich Hertz το 1887, κατά τη διάρκεια πειραμάτων με αντικείμενο την επαλήθευση της θεωρητικής πρόβλεψης του Maxwell (1864) περί παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από περιοδικές μεταβολές του ηλεκτρικού ρεύματος. Κατά το φαινόμενο αυτό, ηλεκτρόνια αποσπώνται από μια μεταλλική επιφάνεια όταν σ' αυτή προσπέσει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. (Fowler M., 1986)

3.1.2.2.1 Φωτοηλεκτρική Εκπομπή

Τα ηλεκτρόνια σθένους ενός μετάλλου, είναι ελεύθερα να μετακινούνται μέσα στο υλικό, αλλά είναι δεσμευμένα σ' αυτό σαν σύνολο. Σε μια απλή περιγραφή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, μπορούμε να πούμε ότι μια ακτίνα φωτός παρέχει σ' ένα ηλεκτρόνιο ποσό ενέργειας ίσο ή μεγαλύτερο από την ενέργεια που το κρατάει δέσμιο στην επιφάνεια του μετάλλου, επιτρέποντάς του έτσι να διαφύγει.

Μια πιο λεπτομερής περιγραφή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, απαιτεί γνώση (βασισμένη στο πείραμα) της σχέσης ανάμεσα στις παραμέτρους που εμπλέκονται κατά τη φωτοηλεκτρική εκπομπή. Τέτοιες παράμετροι είναι η συχνότητα και η ένταση του φωτός, το φωτοηλεκτρικό ρεύμα, η κινητική ενέργεια και η χημική ταυτότητα της επιφάνειας, από την οποία αποσπώνται τα ηλεκτρόνια, για τα οποία χρησιμοποιούμε τον όρο φωτοηλεκτρόνια.

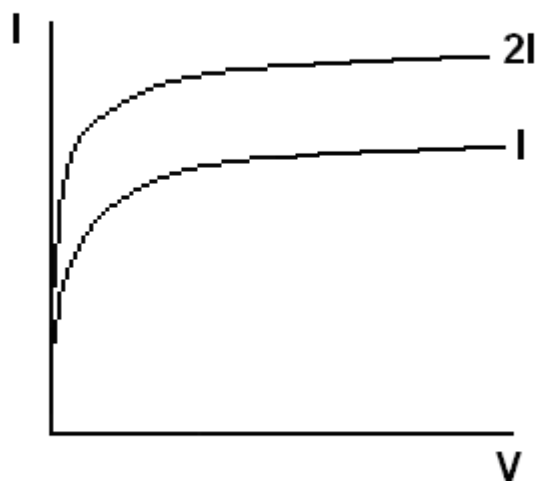
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια απλή πειραματική διάταξη, με βάση την οποία μπορεί να γίνει μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. (Fordham University, 2010)



Σχήμα 1 : Πειραματική διάταξη μελέτης φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Η διάταξη αποτελείται από κλειστό αερόκενο σωλήνα (για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ φωτοηλεκτρονίων και μορίων αερίου), στον οποίο έχουν σχηματισθεί δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Στα άκρα της διάταξης εφαρμόζεται τάση V , έτσι ώστε το ένα ηλεκτρόδιο (άνοδος) να βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό από το άλλο ηλεκτρόδιο (κάθοδος). Όταν μονοχρωματικό φως προσπέσει στη μεταλλική επιφάνεια της

καθόδου, αποσπτά ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια) που συλλέγονται από την άνοδο και δημιουργούν έτσι ένα ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Με την αύξηση της ανοδικής τάσης, το ρεύμα θα αυξηθεί μέχρι το πλήθος των αποσπώμενων φωτοηλεκτρονίων να γίνει ίσο με το πλήθος των φωτοηλεκτρονίων που συλλέγονται από την άνοδο (ρεύμα κόρου). Περαιτέρω αύξηση της ανοδικής τάσης, δεν προκαλεί αύξηση του ρεύματος. Τα παραπάνω φαίνονται στο διάγραμμα I-V του σχήματος 2. (Fordham University, 2010)



Σχήμα 2 : Χαρακτηριστικές I - V για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας I και με δυναμικό ανόδου υψηλότερο από το δυναμικό της καθόδου.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι για $V=0$ το ρεύμα δε μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει γιατί ορισμένα φωτοηλεκτρόνια, κατά την

απόσπασή τους από την κάθοδο, έχουν τέτοια κινητική ενέργεια που τους επιτρέπει να φθάσουν στην άνοδο και να συλλεχθούν, χωρίς την ύπαρξη εξωτερικής πόλωσης.

Αν αντιστρέψουμε την πολικότητα της πηγής, δηλαδή αν η άνοδος βρεθεί σε χαμηλότερο δυναμικό από την κάθοδο, τότε η αρνητικά φορτισμένη άνοδος απωθεί τα φωτοηλεκτρόνια που φθάνουν από την κάθοδο. Όταν το παραγόμενο έργο, από το ηλεκτροστατικό πεδίο δυναμικού V στο φωτοηλεκτρόνιο, εξισωθεί με την αρχική του κινητική ενέργεια, τότε το τελευταίο θα σταματήσει να κινείται πριν φθάσει στην άνοδο και θα ισχύει:

$$eV = \frac{1}{2} m_0 u^2 \quad (\text{σχέση 1})$$

όπου u είναι η ταχύτητα του φωτοηλεκτρονίου τη στιγμή που αφήνει την κάθοδο, V το δυναμικό που το σταματά πριν αυτό συλλεγεί από την άνοδο, m_0 η μάζα αδράνειας και e το φορτίο του.

Για συγκεκριμένη τιμή του δυναμικού $V=V_0$, όλα τα φωτοηλεκτρόνια, ακόμη και εκείνα με την υψηλότερη κινητική ενέργεια και ταχύτητα u_{\max} , θα σταματήσουν να κινούνται πριν φθάσουν στην άνοδο και το ρεύμα θα μηδενισθεί. Τότε θα ισχύει:

$$eV_0 = \frac{1}{2} m_0 u_{\max}^2 \quad (\text{σχέση 2})$$

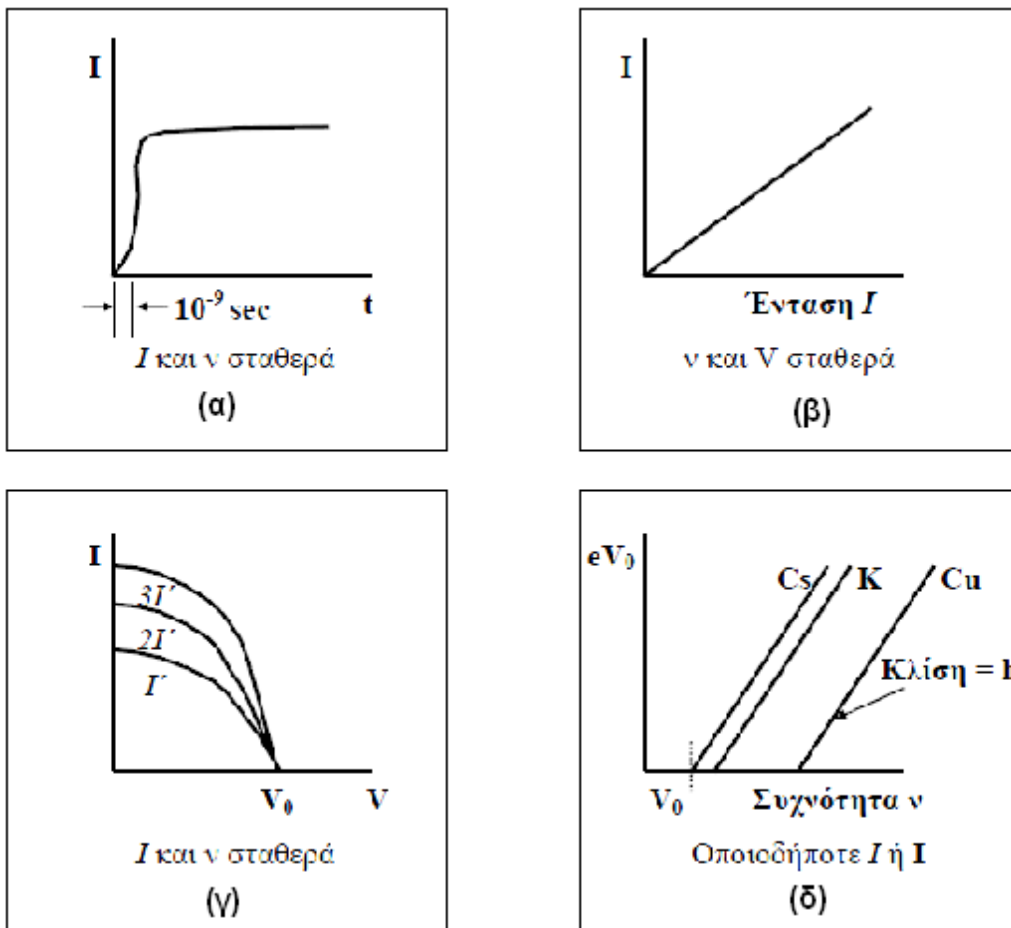
Σε ακόμη υψηλότερα δυναμικά, όλα τα φωτοηλεκτρόνια θα κινηθούν προς τα πίσω, πριν φθάσουν στην άνοδο.

Παραθέτουμε στη συνέχεια τα πειραματικά δεδομένα, με σχετική ανάλυση βασισμένη στην κλασσική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, όπου παρατηρείται ασυμφωνία μεταξύ του αποτελέσματος και της ερμηνείας

που δίνει η κλασική θεωρία και τελικά θα δούμε πως μπορεί να κατανοηθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο βάσει της κβαντικής ερμηνείας του.

Πειραματικά δεδομένα φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Τα πειραματικά δεδομένα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είναι συγκεντρωμένα στο σχήμα 3. Ας τα αναλύσουμε με τη σειρά που παρουσιάζονται:



Σχήμα 3 Πειραματικά δεδομένα φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- α. Όταν φως προσπέσει στη μεταλλική επιφάνεια, το φωτόρρευμα εμφανίζεται σχεδόν άμεσα, ακόμη και για πολύ χαμηλή ένταση της ακτινοβολίας. Η χρονική καθυστέρηση, από τη στιγμή της πρόσπτωσης του φωτός μέχρι την εμφάνιση του φωτορεύματος, δεν υπερβαίνει τα 10^{-9} sec.
- β. Για δεδομένες τιμές συχνότητας ν και δυναμικού V , **το φωτόρρευμα I είναι ανάλογο της έντασης I του φωτός.**
- γ. Για σταθερές τιμές συχνότητας ν και έντασης I του φωτός, **το φωτόρρευμα I ελαττώνεται με την αύξηση του δυναμικού V** , για να μηδενισθεί όταν $V = V_0$
- δ. Για συγκεκριμένη μεταλλική επιφάνεια, **η τιμή του δυναμικού αποκοπής V_0 εξαρτάται από τη συχνότητα ν του φωτός, αλλά είναι ανεξάρτητη από την ένταση I του φωτός** και επομένως, από την (β), **ανεξάρτητη από το φωτόρρευμα I .** Στο **Σχήμα 3δ** φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα από τρεις διαφορετικές μεταλλικές επιφάνειες. Για κάθε μέταλλο, υπάρχει μια συγκεκριμένη συχνότητα ν_0 που καλείται **συχνότητα κατωφλίου** και που θα πρέπει να ξεπερασθεί για να υπάρξει φωτοεκπομπή, δηλαδή για να έχουμε παραγωγή φωτοηλεκτρονίων θα πρέπει για την συχνότητα της εισερχόμενης ακτινοβολίας να ισχύει $\nu > \nu_0$. Για τα περισσότερα μέταλλα, η ν_0 βρίσκεται στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Το δυναμικό αποκοπής φθάνει συνήθως σε αρκετά volts, ενώ τα εκπεμπόμενα φωτοηλεκτρόνια έχουν ενέργειες αρκετών eV. Μπορούμε επομένως να χρησιμοποιήσουμε για τα φωτοηλεκτρόνια, την κλασική σχέση της κινητικής ενέργειας. Για οποιονδήποτε λοιπόν τύπο μετάλλου, οι πειραματικές τιμές μπορεί να παρασταθούν από ευθεία γραμμή με εξίσωση:

$$eV_0 = h\nu - h\nu_0$$

(σχέση 3)

όπου το h , που εκφράζει την κλίση της ευθείας, είναι το ίδιο για όλα τα μέταλλα και το ν_0 είναι η συχνότητα κατωφλίου συγκεκριμένου μετάλλου.

Προσπάθεια κλασσικής ερμηνείας του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Θα προσπαθήσουμε τώρα να ερμηνεύσουμε τα πειραματικά αποτελέσματα, με βάση τις κλασσικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όπως και προηγουμένως, βάση αναφοράς μας θα είναι το σχήμα 3.

- α. Εξαιτίας της συνεχούς φύσης του φωτός, περιμένουμε ότι η ενέργεια που απορροφάται από τη φωτοηλεκτρική επιφάνεια θα είναι ανάλογη της έντασης του φωτός (ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας), της επιφάνειας και του χρόνου φωτισμού της. Θεωρούμε όλα τα ηλεκτρόνια, που είναι δεσμευμένα με την ίδια ενέργεια στην επιφάνεια του μετάλλου, ισοδύναμα και ότι οποιοδήποτε από αυτά θα μπορεί να διαφύγει από τη στιγμή που θα προσλάβει ενέργεια ίση με την ενέργεια δέσμευσης. Αν λοιπόν, μετά από κάποιο διάστημα φωτισμού της επιφάνειας, ένα ηλεκτρόνιο έχει προσλάβει ενέργεια ικανή να το αποσπάσει από την επιφάνεια, τότε και τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια θα μπορούσαν επίσης να αποσπασθούν. Πειράματα, που πραγματοποιήθηκαν, δείχνουν ότι ένα ηλεκτρόνιο σε μια τυπική μεταλλική επιφάνεια είναι δεσμευμένο με ελάχιστο ποσό ενέργειας μερικών eV. Ένας συντηρητικός υπολογισμός δείχνει ότι σε πολύ χαμηλή ένταση του φωτός (10^{-10} W/m²), για την οποία έχει παρατηρηθεί χρόνος καθυστέρησης

εμφάνιση φωτορεύματος περίπου 10^{-9} sec., δεν θα παρατηρηθεί φωτόρευμα παρά μόνο μετά από μερικές εκατοντάδες ώρες! Είναι φανερό ότι εδώ η κλασσική θεωρία δεν μπορεί να ερμηνεύσει το φαινόμενο της άμεσης φωτοηλεκτρικής εκπομπής.

- β. Η κλασσική θεωρία προβλέπει ότι όσο αυξάνει η ένταση του φωτός, τόσο αυξάνει και η ενέργεια που απορροφάται από τα ηλεκτρόνια στην επιφάνεια του μετάλλου. Εδώ η κλασσική θεωρία συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- γ. Τα αποτελέσματα αυτής της παρατήρησης, δείχνουν ότι υπάρχει μια κατανομή των ενεργειών ή ταχυτήτων των εκπεμπόμενων φωτοηλεκτρονίων. Από μόνη της, αυτή η κατανομή δεν έρχεται σε αντίθεση με την κλασσική θεωρία γιατί μπορεί να αποδοθεί σε διαφορετικά ποσά ενέργειας που απορροφούνται από τα ηλεκτρόνια. Το γεγονός όμως ότι για δεδομένη συχνότητα, υπάρχει ένα συγκεκριμένο δυναμικό αποκοπής V_0 ανεξάρτητο από την ένταση του φωτός, δείχνει ότι η μέγιστη ενέργεια των αποσπασθέντων ηλεκτρονίων σε καμιά περίπτωση δεν εξαρτάται από τη συνολική ενέργεια, που φτάνει στην επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου. Η κλασσική θεωρία δεν προβλέπει τέτοιο φαινόμενο.
- δ. Η ύπαρξη της συχνότητας κατωφλίου για συγκεκριμένο τύπο μετάλλου, συχνότητα κάτω από την οποία δεν υπάρχει φωτοεκπομπή όσο υψηλή και να είναι η ένταση του φωτός, δεν εξηγείται με κλασσικούς όρους. Η κλασσική θεωρία μας λέει ότι αυτό που ορίζει αν θα υπάρξει ή όχι φωτοεκπομπή είναι το ποσό της ενέργειας (ή η ένταση) που προσπίπτει στη επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου και όχι η συχνότητα. Ακόμη περισσότερο, η εμφάνιση της σταθεράς h που συνδέει (σχέση 3) τη μέγιστη ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων με τη συχνότητα για οποιοδήποτε υλικό, δεν μπορεί να εξηγηθεί με όρους οποιασδήποτε

σταθεράς του κλασσικού ηλεκτρομαγνητισμού.

Συμπερασματικά, η κλασσική ηλεκτρομαγνητική θεωρία δεν μας παρέχει μια λογική βάση για να κατανοήσουμε τα πειραματικά δεδομένα, όπως αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 3 (α, β, γ, δ).

3.1.2.3 Εσωτερικό Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στους ημιαγωγούς, ανεξάρτητα από το αν είναι ενδογενείς ή ημιαγωγοί πρόσμιξης. Όταν ένα ηλεκτρόνιο απορροφήσει ένα φωτόνιο, τότε αυξάνεται η ενέργειά του και διεγείρεται σε ανώτερη ενεργειακή στάθμη, αυξάνοντας έτσι την αγωγιμότητα του ημιαγωγού. (Fowler M., 1986)

3.1.2.3.1 Οπτική Απορρόφηση

Όταν ακτινοβολία επαρκούς ισχύος και κατάλληλου μήκους κύματος απορροφηθεί από έναν ημιαγωγό, ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους διεγείρονται και μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας οπές στη ζώνη σθένους. Η διαδικασία απορρόφησης ενός φωτονίου για τη δημιουργία φωτοφορέων (δηλαδή ζευγών ηλεκτρονίου - οπής) απαιτεί ποσό ενέργειας του φωτονίου μεγαλύτερο ή ίσο με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού:

$$h\nu \geq E_g \quad (\text{σχέση 4})$$

Η μέγιστη τιμή επομένως του μήκους κύματος λ_c που αν

απορροφηθεί θα δημιουργήσει οπτική διέγερση (ονομάζεται μήκος κύματος αποκοπής), προσδιορίζεται από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού:

$$h(c/\lambda_c) = E_g \text{ ή } \lambda_c = 1,24/E_g \quad (\text{σχέση 5})$$

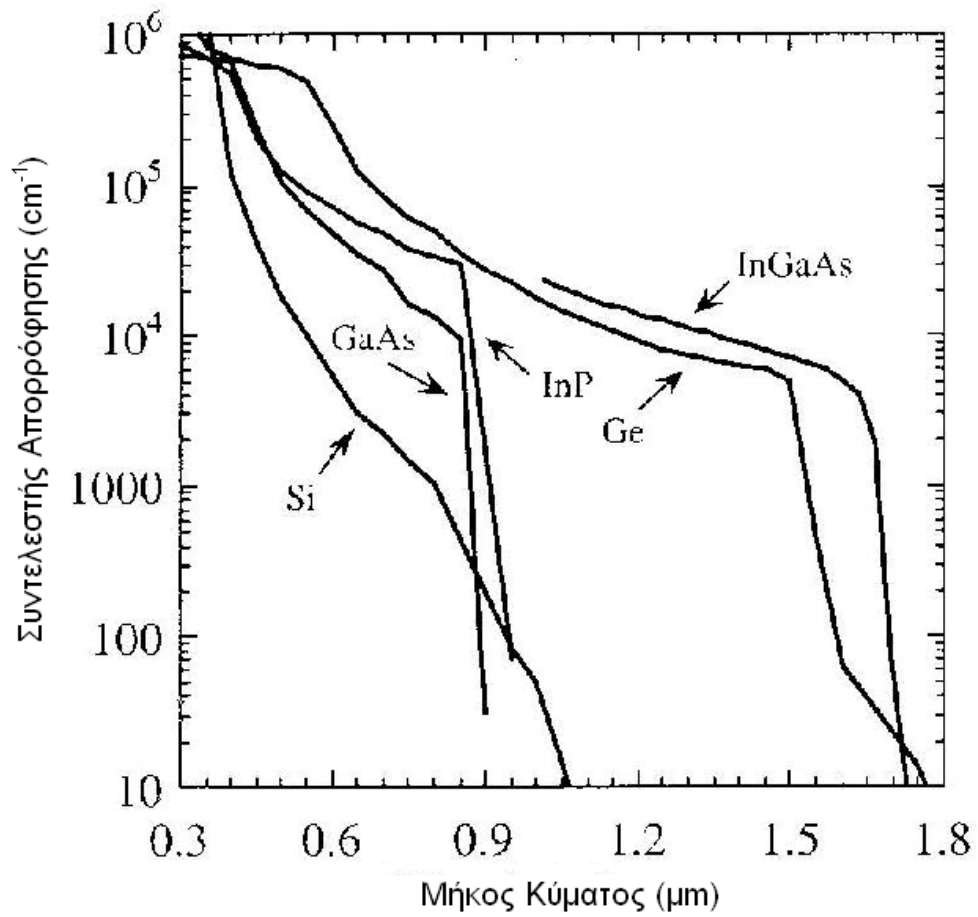
όπου το μήκος κύματος αποκοπής λ_c είναι σε μm και το ενεργειακό χάσμα E_g σε eV .

Οποιαδήποτε ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda > \lambda_c$ δεν μπορεί να δημιουργήσει οπτική διέγερση. Όμως προσπίπτουσα ακτινοβολία με μήκος κύματος μικρότερο από λ_c απορροφάται καθώς οδηγείται διά μέσου του ημιαγωγίμου υλικού, ενώ η έντασή της που είναι ανάλογη του πλήθους των φωτονίων, εξασθενεί εκθετικά με την απόσταση που διανύεται μέσα στον ημιαγωγό. Η ένταση I σε βάθος x από την επιφάνεια του ημιαγωγού, δίνεται από τη σχέση:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (\text{σχέση 6})$$

όπου I_0 η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του ημιαγωγού και α ο συντελεστής απορρόφησης, ο οποίος εξαρτάται από το μήκος κύματος ή από την ενέργεια του φωτονίου.

Ο συντελεστής απορρόφησης α , αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών. Το μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης (63%) σημειώνεται σε απόσταση $d=1/\alpha$, όπου η ποσότητα $1/\alpha$ καλείται βάθος διείσδυσης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο συντελεστής απορρόφησης α σε σχέση με το μήκος κύματος για διάφορους ημιαγωγούς, όπου φαίνεται ότι η συμπεριφορά του α εξαρτάται από το υλικό του ημιαγωγού. (Brigham Young University, 2009)



Σχήμα 4 : Ο συντελεστής απορρόφησης σε σχέση με το μήκος κύματος για διάφορους ημιαγωγούς.

3.1.2.3.2 Μηχανισμοί Οπτικής Διέγερσης

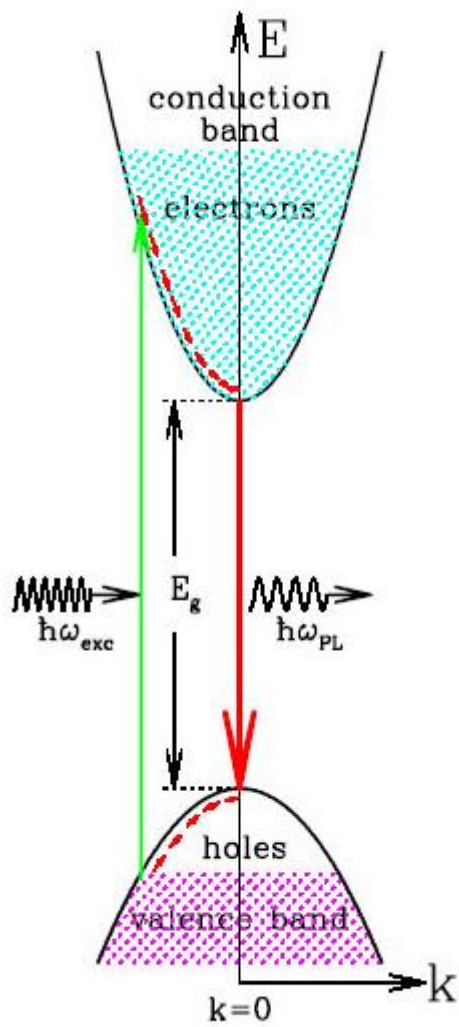
Στους ημιαγωγούς άμεσου χάσματος, όπως για παράδειγμα της ομάδας III-V (GaAs, InAs, InP και GaSb), καθώς και κραμάτων τους (InGaAs και GaAsSb), η απορρόφηση ενός φωτονίου είναι μια άμεση διαδικασία και δεν απαιτεί τη βοήθεια πλεγματικών ταλαντώσεων. Ένα φωτόνιο απορροφάται και διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο κατ' ευθείαν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, χωρίς μεταβολή του κυματικού ανύσματος k (ή της κρυσταλλικής ορμής $\hbar k/2\pi$). Η μεταβολή δηλαδή της ορμής του ηλεκτρονίου, κατά τη μεταπήδησή του από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας είναι:

$$\hbar k_2 - \hbar k_1 \approx 0 \quad (\text{σχέση 7})$$

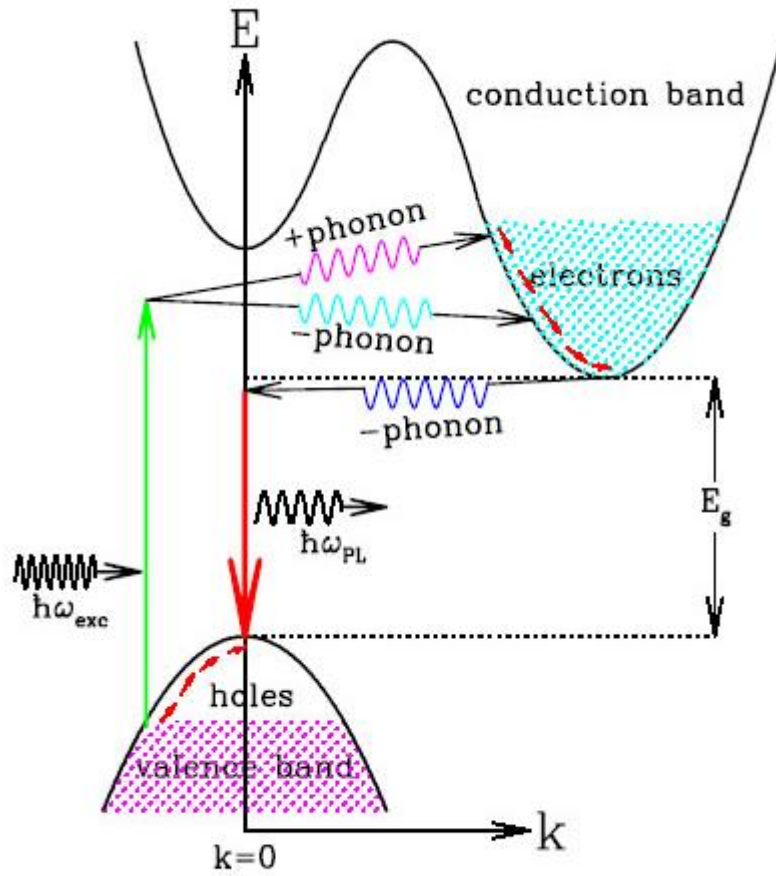
Αυτή η διαδικασία, στο διάγραμμα $E - k$, αντιστοιχεί σε κατακόρυφη μετάβαση.

Στους ημιαγωγούς έμμεσου χάσματος, όπως για παράδειγμα Si και Ge, η απορρόφηση ενός φωτονίου ενέργειας περίπου ίσης με το ενεργειακό χάσμα, απαιτεί τη βοήθεια πλεγματικών ταλαντώσεων και οι διαζωνικές μεταβάσεις δεν είναι ισχυρές.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι στις διαζωνικές μεταβάσεις, δηλαδή στις διεγέρσεις από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, παράγεται ένα ζεύγος φωτοφορέων (ζεύγος ελεύθερου ηλεκτρονίου και οπής). (Aigen Li, 2004)



Σχήμα 5 : Απορρόφηση φωτονίου σε ημιαγωγό άμεσου χάσματος.



Σχήμα 6 : Απορρόφηση φωτονίου σε ημιαγωγό έμμεσου χάσματος.

3.1.2.3.3 Μηχανισμοί Επανασυνδέσεων - Παραγωγή Φωτός

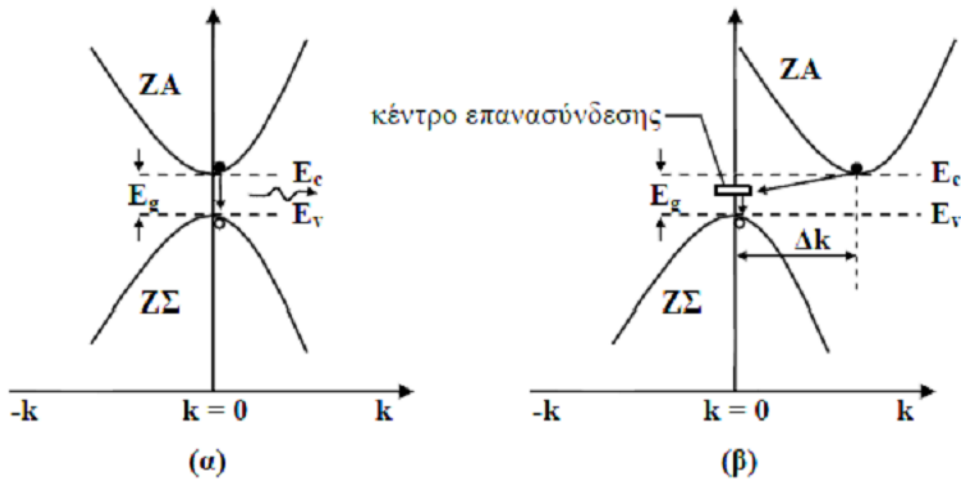
Η απορρόφηση φωτός από ένα ημιαγωγό υλικό δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίου - οπής. Μπορούμε επίσης να επιτύχουμε έγχυση φωτοφορέων, αν για παράδειγμα συνδέσουμε μια επαφή p-n με εξωτερικό κύκλωμα που περιλαμβάνει πηγή. Σε κάθε περίπτωση, με τη δημιουργία φωτοφορέων, αναπτύσσεται ταυτόχρονα και ένας μηχανισμός επανασυνδέσεων έτσι που ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας θα μεταπέσει ξανά στη ζώνη σθένους λόγω ασταθούς ισορροπίας και θα επανασυνδεθεί με μια οπή. Ανάλογα με το πώς αποδίδεται στο περιβάλλον η ενεργειακή διαφορά των δυο καταστάσεων πριν και μετά την επανασύνδεση, οι επανασυνδέσεις αυτές χωρίζονται σε ακτινοβολούσες και μη ακτινοβολούσες επανασυνδέσεις. Κατά τις ακτινοβολούσες επανασυνδέσεις, παράγεται ένα φωτόνιο που αντιστοιχεί στην ενέργεια της επανασύνδεσης σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda = hc/\Delta E \quad (\text{σχέση 8})$$

Κατά τις μη ακτινοβολούσες επανασυνδέσεις η ενέργεια της επανασύνδεσης απορροφάται από το κρυσταλλικό πλέγμα.

Οι ακτινοβολούσες επανασυνδέσεις συναντώνται περισσότερο στους ημιαγωγούς άμεσου χάσματος, επειδή η μετάπτωση του ηλεκτρονίου από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους πραγματοποιείται κατακόρυφα και δεν απαιτείται μεταβολή της ορμής, παρά μόνο μεταβολή της ενέργειας (Σχήμα 7α). Αντίθετα, στους ημιαγωγούς έμμεσου χάσματος η μετάπτωση δεν πραγματοποιείται κατακόρυφα (Σχήμα 7β) και επομένως απαιτείται ταυτόχρονη μεταβολή

της ενέργειας και της ορμής, γεγονός που δεν ευνοεί τις ακτινοβολούσες επανασυνδέσεις. Σ' αυτή την περίπτωση η επανασύνδεση των φορέων γίνεται μέσω ενός κέντρου επανασύνδεσης.



Σχήμα 7 (α) Ακτινοβολούσα επανασύνδεση σε ημιαγωγό άμεσου χάσματος. (β) Επανασύνδεση σε ημιαγωγό έμμεσου χάσματος πραγματοποιείται μέσω κέντρου επανασύνδεσης και απαιτεί ταυτόχρονη μεταβολή ενέργειας και ορμής.

3.1.2.3.4 Φωτοαγωγιμότητα

Με τον όρο φωτοαγωγιμότητα χαρακτηρίζεται η οποιαδήποτε αύξηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού, ως συνέπεια της έκθεσής του σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως είναι το φως.

Η φωτοαγωγιμότητα αναφέρεται σε τρεις τύπους: ενδογενή, εξωγενή και φωτοβολταϊκή αγωγιμότητα.

Ενδογενής φωτοαγωγιμότητα

Η ενδογενής φωτοαγωγιμότητα εμφανίζεται κυρίως στις περιπτώσεις των ενδογενών ημιαγωγών, που δεν περιέχουν δηλαδή προσμίξεις π.χ. γερμανίου ή πυριτίου, όταν κάποιο φωτόνιο προκαλεί μετάπτωση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας με παράλληλη δημιουργία οπής (κενό θέσης ηλεκτρονίου) στην ενδιάμεση "απαγορευμένη ζώνη". Συνεπώς στο τύπο της ενδογενούς φωτοαγωγιμότητας ενός υλικού κύριοι παράγοντες δημιουργίας της είναι τόσο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια όσο και οι δημιουργούμενες τρύπες.

Εξωγενής φωτοαγωγιμότητα

Η εξωγενής φωτοαγωγιμότητα παρατηρείται στους ημιαγωγούς που φέρουν προσμίξεις που κατέχουν θέση δότη ή δέκτη ηλεκτρονίων μέσα στην απαγορευμένη ζώνη όπως είναι οι ημιαγωγοί τύπου **n** και τύπου **p** αντίστοιχα.

Έτσι ο μηχανισμός της εξωγενούς φωτοημιαγωγιμότητας είναι ανάλογος της ενδογενούς με τη διαφορά ότι για τη πραγματοποίησή της, η ενέργεια που απαιτείται να έχει το φωτόνιο μπορεί να είναι και λίγο μικρότερη.

Φωτοβολταϊκή αγωγιμότητα

Ανεξάρτητα από τους παραπάνω δύο τύπους φωτοαγωγιμότητας, η φωτοβολταϊκή αγωγιμότητα βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο που παρουσιάζουν κάποια στοιχεία καλούμενα φωτοβολταϊκά με συνέπεια να μην απαιτεί επίδραση εξωτερικής διαφοράς δυναμικού σε αντίθεση προς

τις άλλες δύο προηγούμενες που θεωρείται αναγκαία, έστω και ορισμένη.

Οι φωτοφορείς που παράγονται από οπτική διέγερση σ' έναν ημιαγωγό, συμμετέχουν στην αγωγιμότητά του. Η αγωγιμότητα σ_0 ενός ημιαγωγού σε συνθήκες σκότους είναι:

$$\sigma_0 = n\mu_e + p\mu_p \text{ (ohm}^{-1}\text{m}^{-1}\text{)} \quad \text{(σχέση 9)}$$

όπου e , είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, n και p οι συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών σε m^{-3} , ενώ μ_e και μ_p είναι οι ευκινησίες των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα σε m^2/Vs .

Όταν ο ημιαγωγός φωτιστεί, η αγωγιμότητά του αυξάνει κατά το ποσό:

$$\Delta\sigma = \Delta n\mu_e + \Delta p\mu_p \quad \text{(σχέση 10)}$$

όπου Δn και Δp οι μεταβολές των συγκεντρώσεων ηλεκτρονίων και οπών, λόγω του φωτισμού.

3.2 Αρχή Λειτουργίας

Η ανίχνευση της οπτικής ακτινοβολίας, πραγματοποιείται συνήθως με την μετατροπή της οπτικής ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα. Οι φωτοανιχνευτές είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του φωτός, στις περισσότερες περιπτώσεις οπτικών ισχύων. Δεδομένου ότι οι απαιτήσεις για εφαρμογές ποικίλλουν σημαντικά, υπάρχουν πολλοί τύποι φωτοανιχνευτών που μπορούν να είναι κατάλληλοι σε μια συγκεκριμένη περίπτωση. Οι ανιχνευτές φωτός χωρίζονται γενικά σε δυο κατηγορίες, στους φωτονικούς ανιχνευτές, όπου τα προσπίπτοντα φωτόνια απελευθερώνουν ηλεκτρόνια τα οποία ανιχνεύονται από το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα και στους θερμικούς ανιχνευτές, όπου η οπτική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα.

3.2.1 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Φωτοανιχνευτών

Η απόδοση των φωτοανιχνευτών περιγράφεται από ένα πλήθος χαρακτηριστικών μεγεθών που έχουν επικρατήσει ευρέως στην τεχνολογία οπτικής ανίχνευσης.

3.2.1.1 Ευαισθησία – Αποκρισιμότητα

Χαρακτηριστικό μέγεθος των φωτοανιχνευτών αποτελεί η ευαισθησία R στην περιοχή μηκών κύματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Το κύριο ενδιαφέρον για ένα ανιχνευτή, είναι να γνωρίζουμε την τιμή του σήματος που μας δίνει, σε σχέση με την ποσότητα της ισχύος (ακτινοβόλου ροής) την οποία απορροφά. Ο λόγος αυτός R ονομάζεται **αποκρισιμότητα (responsivity)** ή **ευαισθησία (sensitivity)**. Αν το μέγεθος της R είναι σταθερό, τότε ο ανιχνευτής λέμε ότι είναι **γραμμικός**, δηλαδή θα υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της απόκρισής του και της ακτινοβόλου ροής που δέχεται:

$$S = R \cdot \Phi \quad (\text{σχέση 11})$$

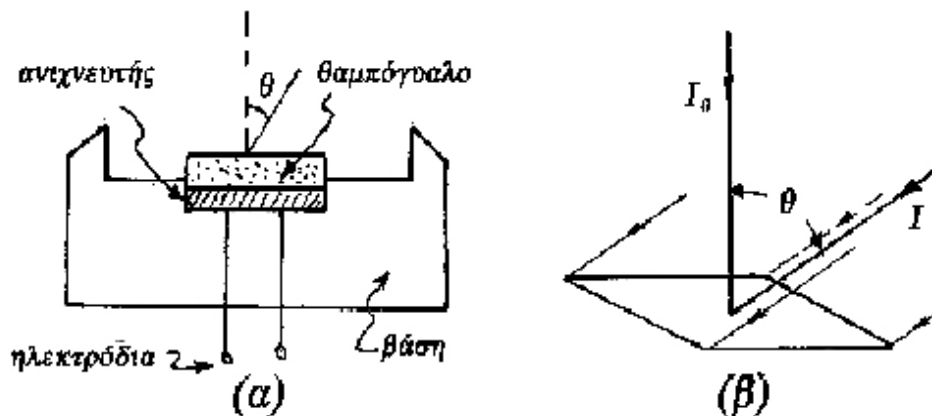
όπου S η απόκριση (σήμα) και Φ η ροή ακτινοβολίας. Γνωρίζοντας δηλαδή την R , είναι σαν να βαθμονομούμε τον ανιχνευτή οπότε για κάθε μετρούμενο σήμα S η τιμή της Φ θα είναι S/R . Το γεγονός αυτό όμως είναι μια εξιδανικευμένη περίπτωση επειδή στο σύνολό τους οι αποκρίσεις των ανιχνευτών (εκτός από ορισμένες περιοχές) είναι **μη γραμμικές**. Η μη γραμμικότητα οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, βασικότεροι από τους οποίους είναι η τιμή της εισερχόμενης ροής ακτινοβολίας Φ_λ , η θερμοκρασία T και το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τότε η (σχέση 11) γίνεται:

$$S = R(\lambda, \Phi_\lambda, T) \cdot \Phi_\lambda + S_0 \quad (\text{σχέση 12})$$

όπου S_0 είναι ένα μέγεθος το οποίο ονομάζεται **έξοδος σκότους (dark output)**. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στους περισσότερους ανιχνευτές,

μετράται μια τιμή σήματος, ανεξάρτητα αν σ' αυτούς έχουμε πρόσπτωση ακτινοβολίας. Στην περίπτωση π.χ. που η απόκριση του ανιχνευτή είναι ηλεκτρικό ρεύμα, τότε θα έχουμε το **ρεύμα σκότους**. Η τιμή S_0 θα πρέπει ν' αφαιρεθεί από την S προκειμένου να πάρουμε την απόκριση $R(\lambda, \Phi_\lambda, T) * \Phi_\lambda$.

Η σχέση 12 ονομάζεται **εξίσωση ανίχνευσης (detection equation)**. Μια τέλος σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την συνάρτηση αποκρισιμότητας R είναι η γωνία θ με την οποία πέφτει το φως σε σχέση με την κάθετη στην επιφάνεια του ανιχνευτή (σχήμα 8α).



Σχήμα 8 : Γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας

Επειδή η ένταση του φωτός I που δέχεται μια επιφάνεια όταν φωτίζεται από ένα επίπεδο μέτωπο κύματος (σχήμα 8β), με κλίση θ , δίνεται από τη σχέση $I = I_0 \cos\theta$, τότε η εξίσωση της ανίχνευσης γράφεται:

$$S = R(\lambda, \Phi_\lambda, \cos\theta, T) * \Phi_\lambda + S_0 \quad (\text{σχέση 13})$$

Θέλουμε τώρα να δούμε ποια μορφή παίρνει η εξίσωση αυτή, όταν η R εξαρτάται μόνο από το μήκος κύματος λ . Δηλαδή είναι ανεξάρτητη της τιμής της προσπίπτουσας ακτινοβόλου ροής Φ_λ , της θερμοκρασίας T καθώς και άλλων πιθανών παραμέτρων ενώ η ακτινοβολία πέφτει κάθετα προς την επιφάνεια του ανιχνευτή. Τότε θα έχουμε $R = R(\lambda)$.

Έστω επίσης ότι $I_\lambda(\lambda)$ είναι η Σ.Φ.Κ.Ι. (Σχετική Φασματική Κατανομή Ισχύος) δηλαδή η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα περιοχής μήκους κύματος [$\text{Watt} / (\text{m}^2 * \text{nm})$] της προσπίπτουσας δέσμης στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Τότε η στοιχειώδης συνεισφορά στο σήμα ΔS_i που οφείλεται στην ροή ακτινοβολίας $\Delta \Phi_{\lambda i}$ για το μήκος κύματος λ_i θα δίνεται από τη σχέση:

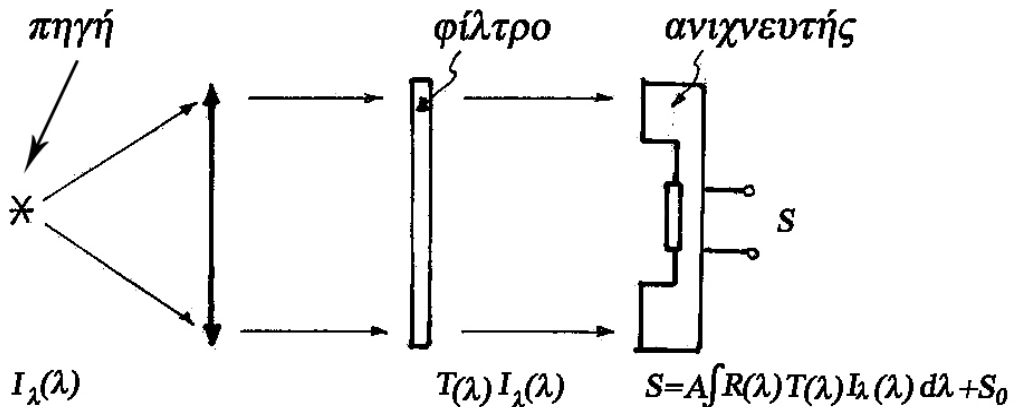
$$\Delta S_i = R(\lambda_i) \Delta \Phi_{\lambda i} + \Delta S_{0i} \quad (\text{σχέση 14})$$

όπου ΔS_{0i} η στοιχειώδης έξοδος σκότους που οφείλεται στο μήκος κύματος λ_i . Αθροίζοντας για όλα τα μήκη κύματος θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \Delta S_i &= \Delta R(\lambda_i) \Delta \Phi_{\lambda i} + \Delta S_{0i} = A \Delta R(\lambda_i) I_{\lambda i}(\lambda_i) + \Delta S_{0i} \quad \text{P} \\ S &= A \int_0^\infty R(\lambda) I_\lambda d\lambda + S_0 \end{aligned} \quad (\text{σχέση 15})$$

όπου S : το συνολικό σήμα, S_0 : η συνολική έξοδος σκότους και η σχέση μεταξύ I και Φ δίνεται κατά τα γνωστά από την $I = \Phi/A$ όπου A το εμβαδόν της επιφάνεια του ανιχνευτή. Αν τώρα μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή παρεμβάλλουμε οπτικό φίλτρο διαπερατότητας $T(\lambda)$ (σχήμα 9) το σήμα S του ανιχνευτή θα δίνεται από τη σχέση:

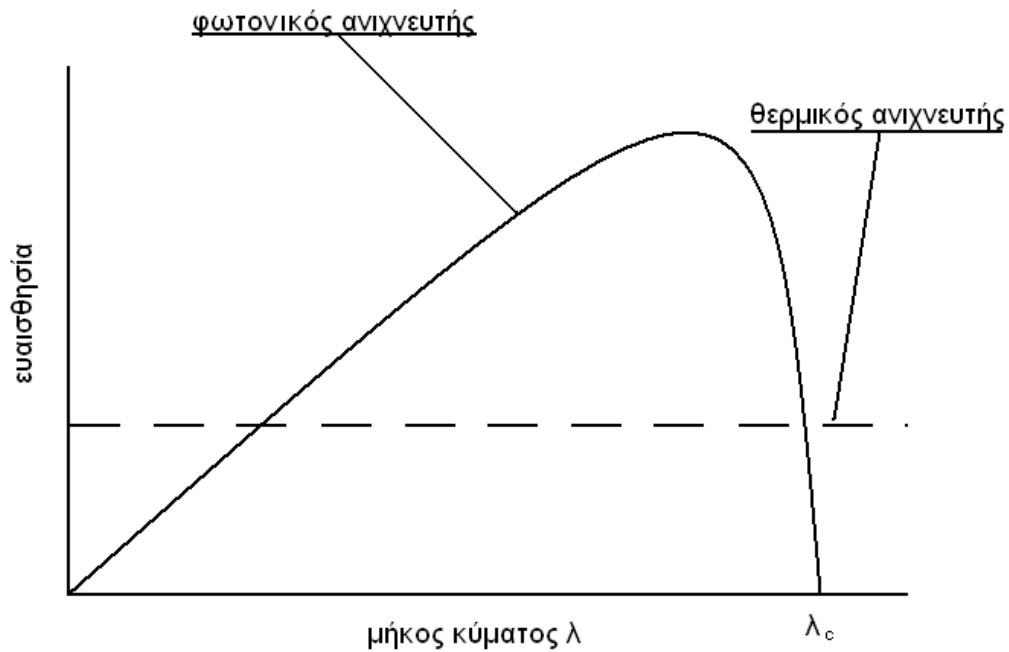
$$S = A \int_0^{\infty} I_{\lambda}(\lambda) R(\lambda) T(\lambda) d\lambda + S_0 \quad (\text{σχέση 16})$$



Σχήμα 9 : Παρεμβολή φίλτρου

Η ευαισθησία εκφράζεται ως το πηλίκο του εξερχόμενου ρεύματος ως προς την ισχύ της εισερχόμενης ακτινοβολίας σε A/W. Ο φωτοανιχνευτής πρέπει να είναι ευαίσθητος σε κάποια δεδομένη φασματική περιοχή (φάσμα οπτικών μηκών κύματος). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ευαισθησία πρέπει να είναι σταθερή ή τουλάχιστον καλά καθορισμένη σε ορισμένα μήκη κύματος. Μπορεί επίσης να είναι σημαντικό να έχουμε μηδενική απόκριση σε κάποια άλλη περιοχή μήκους κύματος. Ένα παράδειγμα είναι οι ηλιακά τυφλοί ανιχνευτές, που είναι ευαίσθητοι μόνο σε μικρού μήκους κύματος υπεριώδη ακτινοβολία, αλλά όχι στο φως του ήλιου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ευαισθησία ενός φωτονικού ανιχνευτή σε σχέση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, καθώς και η αντίστοιχη ενός θερμικού ανιχνευτή. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι στην περίπτωση του θερμικού

ανιχνευτή η ευαισθησία είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος.
(Encyclopedia of Laser Physics and Technology, 2010)



Σχήμα 10 : Φασματική απόκριση ενός φωτονικού και ενός θερμικού ανιχνευτή. Η τιμή λ_c προσδιορίζει το μήκος κύματος αποκοπής.

Είναι φανερό ότι ο φωτοανιχνευτής αξιοποιείται αποδοτικότερα όταν χρησιμοποιείται σε μήκη κύματος στα οποία η φασματική του χαρακτηριστική παρουσιάζει μέγιστο.

Σημείωση 1

Το πραγματικό σύμβολο που περιγράφει την ένταση της ακτινοβολίας (Irradiance), είναι το E_e . Συνήθως όμως όταν πρόκειται

κυρίως για το ορατό φως, χρησιμοποιούμε το σύμβολο I . Θα πρέπει όμως να έχουμε υπόψη μας στην περίπτωση αυτή να μην συγχέουμε την ένταση του φωτός (Irradiance) που μετράται σε Watt/m^2 με την ακτινοβολία ένταση (Radiant Intensity) που περιγράφεται με το σύμβολο I_e αλλά μετράται σε Watt/sr .

Σημείωση 2

Το μήκος κύματος αποκοπής ορίζεται ως το μικρότερο μήκος κύματος στο κενό που αδυνατεί να μεταδοθεί κάτω από δοσμένες συνθήκες.

3.2.1.2 Θόρυβος Φωτοανιχνευτών

Στην έξοδο των φωτοανιχνευτών λαμβάνουμε ένα ηλεκτρικό σήμα (τάση ή ένταση), η λήψη του οποίου γίνεται κατ' ευθείαν από τον ανιχνευτή ή μέσω κυκλωμάτων ενίσχυσης. Αν όμως το αρχικό ηλεκτρικό σήμα του ανιχνευτή το οποίο σχετίζεται με την ισχύ της προς ανίχνευση ακτινοβολίας υπερκαλύπτεται από τυχαίες ως επί το πλείστον ηλεκτρικές διαταραχές των κυκλωμάτων ενίσχυσης ή του περιβάλλοντος, τότε η "μέτρηση" (το σήμα) χάνεται μέσα στον ηλεκτρικό θόρυβο, γεγονός που το καθιστά μη ανιχνεύσιμο.

Ο θόρυβος λοιπόν (ηλεκτρικός ή άλλης φύσης) θα μπορούσε να αποτελείται από ένα ευρύ φάσμα (ανεπιθύμητων) ηλεκτρικών συχνοτήτων f , οι οποίες θα έρχονται σε επαλληλία με αυτές καθ' αυτές τις συχνότητες του επιθυμητού προς μέτρηση σήματος. Μερικοί από τους θορύβους που παράγονται στον ίδιο τον ανιχνευτή ή στα μετά από αυτόν ηλεκτρικά

κυκλώματα, θα μπορούσαν ν' απαλειφθούν με τη βοήθεια ειδικών τεχνικών (φίλτρα). Στην περίπτωση που ένας θόρυβος είναι συστηματικός και όχι τυχαίος και είναι δυνατόν να εντοπισθεί, τότε συνήθως εξουδετερώνεται είτε ηλεκτρονικά (μέσω φίλτρων), είτε με λογιστικό τρόπο αφού πάρουμε το σήμα στην έξοδο.

Για παράδειγμα, ο θόρυβος των ραδιοσυχνοτήτων είναι δυνατόν να εκμηδενιστεί με την ηλεκτρική θωράκιση των ενισχυτικών κυκλωμάτων καθώς και των αγωγών που μεταφέρουν τα σήματα από τον ανιχνευτή. Εκτός των ηλεκτρονικών θορύβων υπάρχει και ο λεγόμενος θόρυβος ακτινοβολίας (noise radiation) που οφείλεται στον τρόπο παραγωγής της.

Οι θόρυβοι κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Φωτονικοί θόρυβοι:
 - Θόρυβος που οφείλεται στον τρόπο παραγωγής της κάθε είδους ακτινοβολίας.
 - Θόρυβος που οφείλεται σε ακτινοβολία υποβάθρου του περιβάλλοντος.

- Θόρυβοι ανιχνευτών:
 - Θερμικός ή θόρυβος Johnson (ή Nyquist), ο οποίος προκαλείται από την θερμική κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων, δηλαδή τις θερμικές διαταραχές του ρεύματος σ' ένα στοιχείο ωμικής αντίστασης. Η αντίσταση παράκαμψης στο φωτοανιχνευτή έχει ένα θόρυβο Johnson που συνδέεται με αυτό. Αυτό οφείλεται στην θερμική δημιουργία των φορέων.
 - Θόρυβος βολής (shot noise). Εμφανίζεται στους ανιχνευτές

που λειτουργούν με τη βοήθεια φράγματος δυναμικού (π.χ. φωτοβολταϊκοί) και για τους οποίους προκύπτει μεταβολή του λόγου παραγωγής φωτοηλεκτρονίων. Ο θόρυβος βολής σχετίζεται με τη στατιστική διακύμανση τόσο του φωτορεύματος, όσο και του ρεύματος σκότους.

- Θόρυβος παραγωγής – επανασύνδεσης (recombination noise). Οφείλεται στις διαταραχές λόγω παραγωγής – επανασύνδεσης των φορέων του ρεύματος.
 - Θόρυβος $1/f$. Οφείλεται στην ατελή επαφή του ανιχνευτή με τα ηλεκτρόδιά του. Στην περίπτωση αυτή, ο θόρυβος ελαττώνεται κατά προσέγγιση αντιστρόφως ανάλογα με τη συχνότητα f του σήματος (π.χ. του ρεύματος).
- Θόρυβοι που οφείλονται στα ηλεκτρονικά στοιχεία των κυκλωμάτων εκτός του ίδιου του ανιχνευτή. Αυτοί οφείλονται στις τέσσερις αιτίες που προαναφέραμε, καθώς και στις θερμοκρασιακές διαταραχές που δεν εξαρτώνται όμως από τη θερμότητα που αναπτύσσει η προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Στις περιπτώσεις για τις οποίες οι μετρήσεις ακτινοβολίας επηρεάζονται από θορύβους, για να τους απαλείψουμε εφαρμόζουμε διάφορες διαδικασίες. Για παράδειγμα, για ν' αποφύγουμε θερμικούς θορύβους, ψύχουμε τον ανιχνευτή σε χαμηλές θερμοκρασίες όπως του υγρού αζώτου ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$). Επίσης για την αποφυγή θορύβων που οφείλονται σε τυχαίες ηλεκτρικές διαταραχές με συχνότητες διαφορετικές αυτών του σήματος, συνήθως αναπτύσσονται διατάξεις ηλεκτρονικού φίλτραρίσματος των παράσιτων συχνοτήτων.

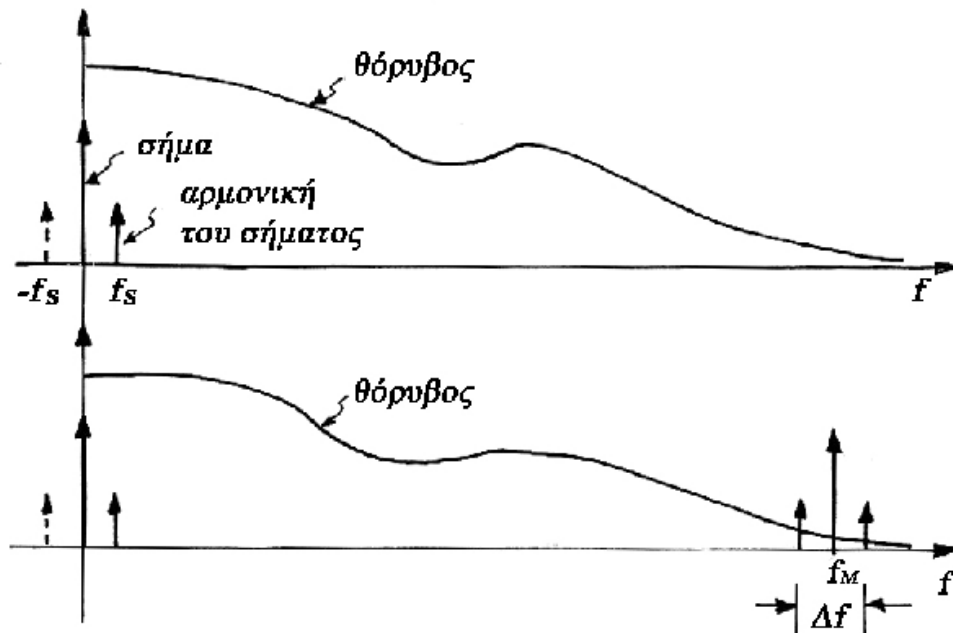
3.2.1.2.1 Απάλειψη Θορύβου Κατόπιν Διαμόρφωσης του Σήματος με Τεμαχισμό (Chopping)

Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια κλασσική μέθοδο απάλειψης θορύβου με τη μέθοδο της διαμόρφωσης της έντασης του φωτεινού σήματος.

Συνήθως τα οπτικά σήματα μιας πηγής που θέλουμε να μετρήσουμε μ' έναν ανιχνευτή, έχουν μεγάλες χρονικές διακυμάνσεις της έντασής τους, με συχνότητα της τάξης λίγων Hz. Σαν παράδειγμα, ας θεωρήσουμε τη δέσμη φωτός ενός Laser He-Ne της οποίας η ένταση I συντίθεται από ένα σταθερό υπόβαθρο (συχνότητας $f = 0$ Hz) και μια μόνο αρμονική συνιστώσα f_s (π.χ. 5 Hz). Αν δηλαδή μπροστά από τη δέσμη παρεμβάλλουμε ένα πέτασμα, θα παρατηρήσουμε την ένταση του φωτός ν' αυξομειώνεται χρονικά, χωρίς όμως να παρουσιάζει μηδενικό ελάχιστο, λόγω του σταθερού υποβάθρου της έντασης. Η αρμονική συνιστώσα της έντασης πιθανόν να προέρχεται από διακύμανση της τάσης του δικτύου την οποία δεν μπορεί να σταθεροποιήσει το τροφοδοτικό σύστημα του Laser. Την αρμονική αυτή, η οποία παρεμβάλλεται στο σταθερό σήμα μας, θα μπορούσαμε να την κατατάξουμε σαν ανεπιθύμητο θόρυβο. Αν τώρα υποθέσουμε ότι δεν υπάρχουν ηλεκτρονικοί θόρυβοι λόγω του συστήματος ενίσχυσης του ανιχνευτή, θα έπρεπε στην έξοδό του να μετρούσαμε μια τάση της ίδιας συχνοτικής απόκρισης (δηλαδή σταθερό υπόβαθρο (συνεχή τάση) και μια αρμονική) όπως ακριβώς αυτή της πηγής. Στην πραγματικότητα όμως δεν συμβαίνει αυτό, καθώς, λόγω της ύπαρξης των διαφόρων ειδών θορύβων, το σήμα της εξόδου παρεμβάλλεται μέσα σ' ένα συνήθως συνεχές υπόβαθρο συνιστωσών διαφορετικών συχνοτήτων μεγάλου εύρους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες στις περισσότερες περιπτώσεις το πραγματικό προς μέτρηση σήμα

υπερκαλύπτεται από το θόρυβο της ίδιας συχνότητας. Αυτό που θέλουμε είναι να βρούμε μια μέθοδο ανάδυσσης του σήματος από το θόρυβο, προκειμένου να το μετρήσουμε.

Η φασματική κατανομή των συχνοτήτων σήματος και θορύβου που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, καταγράφεται μέσω ενός αναλυτή φάσματος (spectrum analyzer), ο οποίος συνδέεται στην έξοδο του ανιχνευτικού συστήματος. Δηλαδή στο σχήμα αυτό βλέπουμε την καταγραφή των πλατών σήματος και θορύβου συναρτήσει της συχνότητας f . Πιο συγκεκριμένα, βλέπουμε μια συνεχή κατανομή συχνοτήτων από το μηδέν μέχρι το άπειρο (θεωρητικά), που οφείλεται στους διάφορους ηλεκτρονικούς θορύβους του ενισχυτικού συστήματος του ανιχνευτή όπως και στον ίδιο και την υπέρθεση: κατά πρώτον στη συχνότητα $f = 0$ Hz του σταθερού σήματος της πηγής καθώς και κατά δεύτερον της μιας αρμονικής συνιστώσας στη θέση $f = f_s$. Όμως, όπως βλέπουμε στην περιοχή αυτή των συχνοτήτων (μεταξύ 0 και f_s), τα πλάτη του σήματος είναι κατά πολύ μικρότερα του υπερκειμένου θορύβου, με συνέπεια το σήμα να μην μπορεί να μετρηθεί (δηλαδή ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο είναι πάρα πολύ μικρός). Τελικά ακόμα κι αν μπορούσαμε με τη βοήθεια καταλλήλων ηλεκτρονικών φίλτρων χαμηλής διαπέρασης (γεγονός που είναι δυνατόν) να αποκόψουμε όλες τις συχνότητες εκτός της περιοχής $f \pm f_s$ με $f = 0$ Hz, δε θα μπορούσαμε να απαλλαγούμε από τον υπερκείμενο θόρυβο αυτής της περιοχής. (Govind P. Agrawal, 2004)

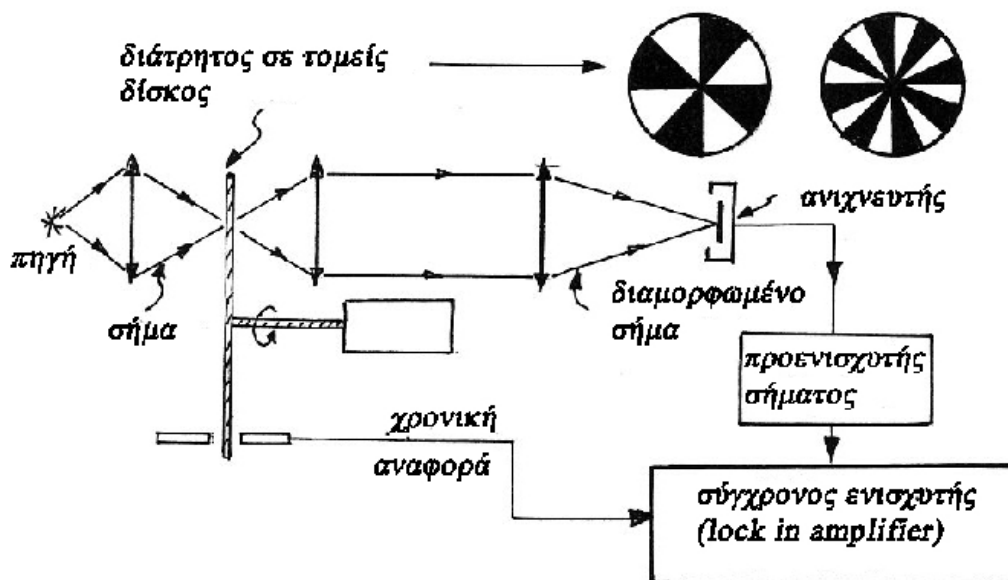


Σχήμα 11 : Φασματική κατανομή των συχνοτήτων σήματος και θορύβου.

Αυτό όμως που μπορεί να γίνει κατά κάποιο τρόπο, είναι να μετακινηθεί το σήμα από την αρχική του θέση ($0 \pm f_s$), σ' αυτή μιας υψηλότερης συχνότητας ($f_M \pm f_s$). Η τιμή της f_M θα μπορούσε να είναι για παράδειγμα λίγες εκατοντάδες Hz ή εκτός της περιοχής ύπαρξης συχνοτήτων θορύβου (το οποίο όμως είναι αρκετά δύσκολο πρακτικά). Στην περιοχή αυτή όπως φαίνεται καθαρά στο σχήμα, το πλάτος του σήματος υπερτερεί κατά πολύ του πλάτους του θορύβου της ίδιας περιοχής συχνοτήτων, οπότε η μέτρησή του μπορεί να γίνει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της διαμόρφωσης με τεμαχισμό (chopping). Δηλαδή η δέσμη του φωτός, πριν πέσει στον ανιχνευτή, διαμορφώνεται από τη συχνότητα f_M που κατά την

εκτίμησή μας αντιστοιχεί σε περιοχή συχνοτήτων όπου ο θόρυβος είναι πολύ μικρός. Τότε από την έξοδο του συστήματος του ενισχυτικού κυκλώματος του ανιχνευτή θα πάρουμε μια διαμορφωμένη χρονικά τάση, που θ' αντιστοιχεί στην απόκριση του σήματος της δέσμης φωτός που πέφτει στον ανιχνευτή καθώς και των θορύβων των ηλεκτρονικών στοιχείων του ενισχυτή. Είναι δυνατόν όμως κατόπιν να χρησιμοποιήσουμε ένα ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο από τη συνεχή αυτή κατανομή συχνοτήτων να επιλέγει στην έξοδό του μόνο μια στενή περιοχή με κεντρική συχνότητα αυτή της συχνότητας διαμόρφωσης f_m της προς μέτρηση δέσμης. Στην περιοχή αυτή όμως (λόγω διαμόρφωσης του αρχικού σήματος) θα βρίσκεται το σήμα που θέλουμε να μετρήσουμε.

Η μέθοδος που επιλέγεται για τη διαμόρφωση της έντασης της δέσμης φωτός (του σήματος) πριν φθάσει στον ανιχνευτή, φαίνεται στη διάταξη του παρακάτω σχήματος. Το οπτικό σήμα (ή δέσμη του φωτός) παρεμποδίζεται και αφήνεται διαδοχικά επειδή πέφτει πάνω σ' ένα περιστρεφόμενο δίσκο ο οποίος περιλαμβάνει κυκλικούς τομείς κλειστούς και διάτρητους (πτερωτή). Η συχνότητα της διαμόρφωσης θα καθορίζεται από τον αριθμό των κυκλικών τομέων, καθώς και από τη συχνότητα περιστροφής του δίσκου. Κατόπιν, το διαμορφωμένο σήμα μέσω συστήματος φακών πέφτει πάνω στον ανιχνευτή και ενισχύεται από ένα προενισχυτή. Η επιλογή των συχνοτήτων γίνεται από ένα σύγχρονο (lock in amplifier) ενισχυτή. Επειδή η συχνότητα διαμόρφωσης είναι δυνατόν ν' αλλάξει κατά βούληση, το τελευταίο θα πρέπει να γίνεται αντιληπτό από το σύγχρονο ενισχυτή. (Govind P. Agrawal, 2004)



Σχήμα 12 : Διάταξη για τη διαμόρφωση της έντασης της δέσμης φωτός.

Αυτός είναι ο λόγος που εκτός της θέσης διέλευσης της προς διαμόρφωσης δέσμης υπάρχει αντιδιαμετρικά στο δίσκο ένας αισθητήρας ο οποίος ταυτόχρονα ειδοποιεί (χρονικό σήμα αναφοράς) για τη διέλευση του οπτικού σήματος. Αν κάποια στιγμή αλλάξουμε τη συχνότητα διαμόρφωσης, το γεγονός γίνεται αντιληπτό άμεσα από το σύγχρονο ενισχυτή. Το διαμορφωμένο σήμα, που είναι τετραγωνικής ή άλλης μορφής, αντιστοιχεί σ' ένα επίπεδο τάσης όταν η δέσμη εμποδίζεται να περάσει και σ' ένα άλλο όταν αυτή περνάει ελεύθερα. Δηλαδή οι συνιστώσες του προς μέτρηση σήματος θα βρίσκονται μετατοπισμένες στην περιοχή της συχνότητας διαμόρφωσης f_M . Με τη βοήθεια του σύγχρονου ενισχυτή, στην πραγματικότητα δεν μπορούμε ν' αποκόψουμε

όλες τις συχνότητες εκτός της f_M , αλλά αυτές που βρίσκονται εκτός της ζώνης εύρους Δf με κεντρική συχνότητα την f_M . Το πλάτος των συχνοτήτων Δf αποτελεί για τον σύγχρονο ενισχυτή μια σπουδαία παράμετρο. Όσο στενότερο είναι το Δf , τόσο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων θορύβου εξουδετερώνει. Όμως στενεύοντας το εύρος της ζώνης θα ισοδυναμούσε για τον σύγχρονο ενισχυτή με αύξηση του χρόνου ολοκλήρωσης των ηλεκτρονικών του στοιχείων, προκειμένου να εκπληρώσει τη διαδικασία της εξάλειψης των ανεπιθύμητων συχνοτήτων που αντιστοιχούν στο θόρυβο. Μια μεγάλη όμως αύξηση του χρόνου ολοκλήρωσης θ' αντιστοιχούσε σε μια αρκετά αργή απόκριση του ανιχνευτή σε μια υποθετική μεταβολή των σημάτων που δέχεται (για παράδειγμα για $\Delta f = 0,1$ Hz, ο χρόνος ολοκλήρωσης θα είναι 10s. Άρα δεν θα μπορούσαν ν' ανιχνευτούν σήματα στην είσοδο του ανιχνευτή με χρονική αλληλουχία μικρότερη των 10s). Έστω επίσης ότι το οπτικό σήμα που θέλουμε ν' ανιχνεύσουμε, είναι αυτό που αναφέραμε στην αρχή, με σταθερό υπόβαθρο και μια αρμονική 5 Hz. Τότε με την εφαρμογή της διαμόρφωσης και τη χρησιμοποίηση του σύγχρονου ενισχυτή του οποίου το εύρος ζώνης διέλευσης είναι $\Delta f = 0,1$ Hz οι αρμονικές των 5 Hz αποκόπτονται. Άρα στην έξοδο του μετρητικού μας συστήματος θ' ανιχνεύεται σταθερή ένταση. Για να υπάρχει δυνατότητα ν' ανιχνεύεται και η αρμονική του σήματος θα πρέπει το εύρος Δf του ενισχυτή να είναι μεγαλύτερο των 10 Hz.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η λειτουργία ενός σύγχρονου ενισχυτή στην πραγματικότητα είναι πολύ πιο ευφυής και περίπλοκη σε σχέση με τον απλοποιημένο τρόπο που επιλέξαμε για να την περιγράψουμε. Για τις περιπτώσεις τέλος που δεν υπάρχει δυνατότητα απάλειψης των ηλεκτρονικών θορύβων με διαμόρφωση των σημάτων, γίνεται χρήση στην έξοδο των ενισχυτικών κυκλωμάτων των ανιχνευτών χαμηλοπερατών

φίλτρων. Βασική προϋπόθεση για τη διαδικασία αυτή είναι η ζώνη αποκοπής των συχνοτήτων να μην περιλαμβάνει το προς μέτρηση σήμα. Την τεχνική αυτή απάλειψης θορύβων εφαρμόζουν στην πράξη τα περισσότερα Ραδιόμετρα και Φωτόμετρα.

3.2.1.3 Ελάχιστη Στάθμη Θορύβου

Για τον καθορισμό της στάθμης θορύβου χρησιμοποιείται ο όρος NEP (Noise Equivalent Power), που ορίζεται ως το ποσό του φωτός που απαιτείται για την παραγωγή σήματος (φωτόρευμα) ίσου με το συνολικό ρεύμα θορύβου του ανιχνευτή σε συγκεκριμένο μήκος κύματος και σε εύρος ζώνης 1 Hz. Εκφράζεται σε $W/Hz^{1/2}$. Από τον ορισμό του NEP είναι φανερό ότι όσο πιο μικρή είναι η τιμή του, τόσο πιο καλή είναι η απόδοση του φωτοανιχνευτή κατά την ανίχνευση μικρών σημάτων παρουσία θορύβου. (Encyclopedia of Laser Physics and Technology, 2010)
Η Ελάχιστη στάθμη θορύβου (NEP \equiv The “Noise Equivalent Power”) δίνεται από:

$$\rightarrow I_{rms} = \sqrt{I_n^2} \quad (\text{σχέση 17})$$

$$\rightarrow I_{rms} = NEP * R \quad (\text{σχέση 18})$$

όπου:

I_{rms} η ενεργός τιμή του ρεύματος και

R η ευαισθησία - αποκρισσιμότητα

3.2.1.4 Ανιχνευτικότητα

Η ανιχνευτικότητα D (detectivity) είναι το αντίστροφο του NEP και εκφράζει το μέτρο της ικανότητας ανίχνευσης του φωτοανιχνευτή. Επειδή συνήθως ο θόρυβος είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας του εμβαδού της φωτοευαίσθητης επιφάνειας, είναι φανερό ότι ελαττώνοντας το εμβαδόν της επιφάνειας, ελαττώνεται ο θόρυβος και αυξάνει η ανιχνευτικότητα. Για να λαμβάνονται υπ' όψη οι ιδιότητες του υλικού του φωτοανιχνευτή, ορίζεται ένα άλλο μέγεθος, το D^* (κανονικοποιημένη ανιχνευτικότητα), που εκφράζεται από τη σχέση:

$$D^* = (\text{φωτοευαίσθητη επιφάνεια})^{1/2} / \text{NEP} \quad (\text{σχέση 19})$$

Ανιχνευτικότητα (Detectivity, D) $\equiv 1/\text{NEP}$ (μικρότερο NEP , και μεγαλύτερο D είναι προτιμότερο)

Κανονικοποιημένη ανιχνευτικότητα, $D^* = (A \Delta f)^{1/2} D$, όπου “ A ” είναι η περιοχή ανίχνευσης και “ Δf ” είναι το εύρος ζώνης του ανιχνευτή. Ο λόγος σήματος/θορύβου των περισσότερων φωτοανιχνευτών είναι αντιστρόφως ανάλογος του $(A \Delta f)^{1/2}$, και συμπεριλαμβάνοντας τον παράγοντα για τον ορισμό της “ D^* ” λαμβάνει αυτό υπόψη – αν δύο ανιχνευτές έχουν το ίδιο “ D ”, αυτός με το μεγαλύτερο $(A \Delta f)^{1/2}$ θεωρείται καλύτερος και παίρνει μεγαλύτερο “ D^* ”.

3.2.1.5 Κβαντική Απόδοση

Η κβαντική απόδοση ορίζεται ως ο λόγος του πλήθους των παραγόμενων φωτοηλεκτρονίων, προς το πλήθος των εισερχόμενων

φωτονίων. Το φωτόρευμα που διαρρέει το εξωτερικό κύκλωμα ενός φωτοανιχνευτή εξαρτάται από τη ροή των ηλεκτρονίων ανά μονάδα χρόνου, στα άκρα του ανιχνευτή. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συλλέγεται ανά δευτερόλεπτο είναι I_{ph}/e .

Αν P_0 είναι η προσπίπτουσα οπτική ισχύς, τότε ο αριθμός των φωτονίων που προσπίπτει ανά δευτερόλεπτο είναι $P_0/h\nu$ και επομένως η κβαντική απόδοση ορίζεται επίσης ως:

$$\eta = \frac{\frac{I_{ph}}{e}}{\frac{P_0}{h\nu}} \quad (\text{σχέση 20})$$

Η κβαντική απόδοση συνδέεται με την ευαισθησία R μέσω της σχέσης:

$$\eta = Rh\nu = R(1,24/\lambda) \quad (\text{σχέση 21})$$

όπου “ η ” η κβαντική απόδοση %, “ R ” η ευαισθησία του φωτοανιχνευτή σε A/W σε μήκος κύματος $\lambda(\mu m)$ και $h\nu$ η ενέργεια του φωτονίου (<http://physics.teiath.gr>).

3.2.1.6 Ταχύτητα Απόκρισης

Η ταχύτητα απόκρισης (Speed Response) εκφράζει την ταχύτητα με την οποία ο ανιχνευτής αποκρίνεται στις μεταβολές της έντασης του φωτός. Αν μια πηγή φωτός σταθερής έντασης φωτίσει τον ανιχνευτή, θα χρειαστεί ένας πεπερασμένος χρόνος μέχρι να εμφανιστεί φωτόρευμα στο εξωτερικό κύκλωμα και μέχρι αυτό να αποκτήσει σταθερή τιμή. Αν η πηγή

σταματήσει να εκπέμπει, θα μεσολαβήσει πάλι κάποιος χρόνος μέχρι να φτάσει το φωτόρευμα στην αρχική μηδενική του τιμή. Γενικά, ο όρος “χρονική απόκριση” αναφέρεται στο χρόνο που απαιτείται για ν’ ανυψωθεί η στάθμη του ρεύματος του φωτοανιχνευτή στο 63,2% της τελικής του τιμής. Ο χρόνος αποκατάστασης είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που η πηγή σταματήσει να εκπέμπει μέχρι το ρεύμα να πέσει στο 36,8% από την τελική του τιμή.

Επειδή, πολλές φορές οι φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση παλμών μικρής διάρκειας, χρησιμοποιείται ο όρος “χρόνος ανύψωσης” για να περιγράψει την ταχύτητα απόκρισης και ορίζεται ως η χρονική διαφορά μεταξύ του σημείου που το σήμα εξόδου έχει φτάσει στο 10% της τελικής του τιμής και του σημείου που το σήμα έχει φτάσει στο 90% της τελικής του τιμής. Σ’ αυτή την περίπτωση, ο χρόνος αποκατάστασης ορίζεται μεταξύ του σημείου που το σήμα έχει πέσει στο 90% της τελικής του τιμής και του σημείου που έχει πέσει στο 10%. Να πούμε βέβαια πως ο χρόνος ανύψωσης μπορεί να μην είναι ο ίδιος με το χρόνο αποκατάστασης.

Ο χρόνος απόκρισης των φωτοανιχνευτών οφείλεται στο χρόνο διέλευσης των φωτοφορέων μέσα από το υλικό του ανιχνευτή και επίσης στη χωρητικότητα της επαφής που δημιουργεί φαινόμενα αποκατάστασης αν διοχετεύσουμε το ρεύμα σε εξωτερικό φορτίο R_L . Τελικά, ανάλογα με την τιμή της αντίστασης φόρτου R_L μπορούμε να επιτύχουμε είτε υψηλή ταχύτητα απόκρισης, είτε υψηλή ευαισθησία (όχι και τα δυο μαζί). Γρήγορη απόκριση απαιτεί χαμηλή τιμή της αντίστασης φόρτου ($>50\Omega$), ενώ υψηλή ευαισθησία απαιτεί υψηλή αντίσταση R_L . Επίσης θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε το εξωτερικό κύκλωμα να παρουσιάζει όσο το δυνατό χαμηλή χωρητικότητα. Κατ’ αυτό τον τρόπο διατηρείται χαμηλή η σταθερά χρόνου $\tau = RC$. (Encyclopedia of Laser Physics and Technology, 2010)

Σημείωση 1. Η αποκρισιμότητα μειώνεται για μικρά μήκη κύματος αποκοπής που αντιστοιχεί στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, επειδή ο αριθμός των φωτοπαραγόμενων ηλεκτρονίων είναι:

$$e_p = \eta P / h\nu = \eta P \lambda / hc \quad (\text{σχέση 22})$$

Σημείωση 2. Η επιλογή του σωστού ημιαγωγικού υλικού για μια φωτοδίοδο περιλαμβάνει την επιλογή ενός αρκετά μικρού ενεργειακού χάσματος, αλλά και η ευαισθησία πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη.

3.2.2 Κατηγορίες Φωτοανιχνευτών

Γενικά οι φωτοανιχνευτές χωρίζονται στους φωτονικούς και τους θερμικούς. Εκτός από αυτό το γενικό διαχωρισμό, οι φωτοανιχνευτές μπορούν να χωριστούν περαιτέρω στις υποκατηγορίες που αναφέρονται παρακάτω. (Encyclopedia of Laser Physics and Technology, 2010)

3.2.2.1 *Θερμικοί ανιχνευτές*

Ο T. Seebeck το 1821 παρατήρησε ότι όταν δύο αγωγοί από διαφορετικά μέταλλα ενωθούν στις άκρες τους σχηματίζοντας κλειστό κύκλωμα, αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, εφόσον οι δύο επαφές βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία.

Ο συνδυασμός δύο διαφορετικών υλικών (μετάλλων, ημιαγωγών ή

αμετάλλων), όπως περιγράφονται παραπάνω απαρτίζουν ένα ανιχνευτή θερμοκρασίας, ο οποίος καλείται **θερμοστοιχείο (ή θερμοζεύγος – thermocouple)**. Το σημείο της ένωσης ονομάζεται επαφή μέτρησης, ενώ τα ελεύθερα άκρα αποτελούν την επαφή αναφοράς.

Αν οι επαφές βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, τότε οι διαφορές δυναμικού μεταξύ τους αντισταθμίζονται και το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο όταν οι θερμοκρασίες τους είναι διαφορετικές. Τότε οι διαφορές δυναμικού δεν αναιρούνται και στο κύκλωμα εμφανίζεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη που ονομάζεται **θερμοηλεκτρική τάση ΔV** . Μεταξύ της τελευταίας και της διαφοράς θερμοκρασίας $T_1 - T_2 = \Delta T$, ισχύει η σχέση:

$$\Delta V = C \cdot \Delta T \quad (\text{σχέση 23})$$

όπου C είναι ο **συντελεστής θερμοηλεκτρικής τάσης** και εξαρτάται από τη φύση των μετάλλων και τη θερμοκρασία.

Τα θερμοστοιχεία από μόνα τους είναι μεν κατάλληλα για μετρήσεις θερμοκρασίας έχουν όμως χαμηλή αποκρισσιμότητα σαν ανιχνευτές Η/Μ ακτινοβολίας (στο υπέρυθρο). Το μειονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται αν συνδέσουμε κατά σειρά ένα μεγάλο αριθμό θερμοστοιχείων.

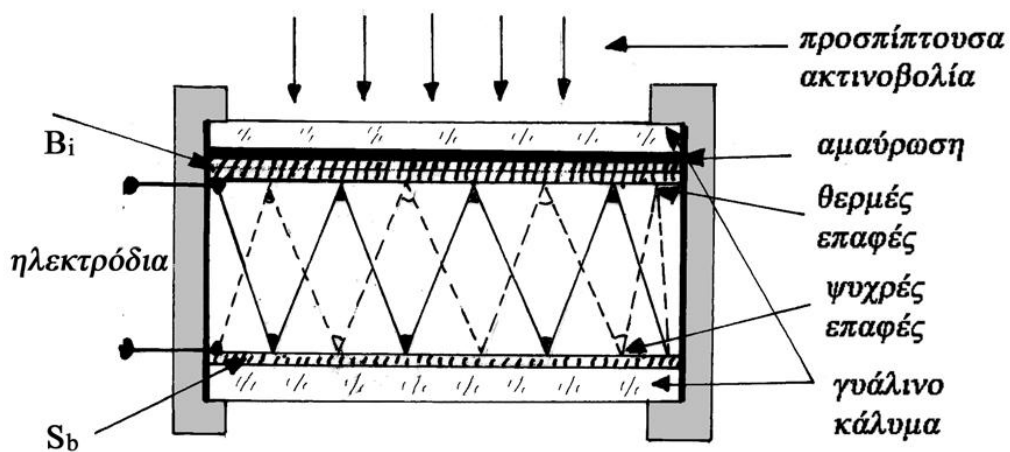
Μια τέτοια διάταξη ονομάζεται **θερμοπύλη (thermopile)**. Συνήθως οι θερμοπύλες δεν λειτουργούν αποκλειστικά σαν μια σειρά θερμοστοιχείων στο χώρο, αλλά σε συνδυασμό με άλλα οπτικά στοιχεία σε κυκλική διάταξη όπου οι επαφές τους (πάνω – κάτω) έχουν εξαχνωθεί σ' ένα επίπεδο στρώμα συνήθως Bi – Sb (Βισμούθιου – Αντιμονίου). Το πάνω μέρος, από το οποίο πρόκειται να δεχθεί η διάταξη την ροή ακτινοβολίας, επικαλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα μαύρου υλικού με διαπερατότητα σε στενή φασματική περιοχή, που προστατεύεται από ένα γυάλινο κάλυμμα μεγάλης φασματικής διαπερατότητας, μέσα από το οποίο θα μπορούν να

περάσουν τα μήκη κύματος της προς μέτρηση ακτινοβολίας.

Ο χώρος μεταξύ των επαφών είναι απομονωμένος, έτσι ώστε οι κάτω επαφές (τμήμα αναφοράς) να διατηρούνται σε μια σχετικά σταθερή θερμοκρασία, η οποία δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές που προκαλεί η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πάνω μέρος της θερμοπύλης. Το όλο σύστημα προστατεύεται από ειδικό αδιαφανές περίβλημα.

Η διάταξη της θερμοπύλης αυξάνει κατά πολύ την αποκρισιμότητα σε σχέση με αυτή του ενός θερμοστοιχείου, αλλά λόγω της μεγάλης της επιφάνειας ελαττώνει αρκετά το χρόνο απόκρισης του ανιχνευτή.

Τελευταία έχουν κατασκευαστεί βελτιωμένες θερμοπύλες με αυξημένη αποκρισιμότητα και μικρό χρόνο απόκρισης, γενικά όμως αυτού του είδους οι ανιχνευτές χρησιμοποιούνται για μετρήσεις ακτινοβολιών ισχυρών εντάσεων.



Σχήμα 13 : Η θερμοπύλη

3.2.2.2 Φωτοαγώγιμοι Ανιχνευτές (ή Φωτοαντιστάσεις)

Στους φωτοαγώγιμους ανιχνευτές, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι ανιχνευτές αυτού του τύπου είναι ημιαγωγικές διατάξεις και πολώνονται από εξωτερικό κύκλωμα.

Η αρχή λειτουργίας ενός φωτοαγώγιμου ανιχνευτή στηρίζεται στο γεγονός ότι προκαλείται μεταβολή στην αγωγιμότητα του (αντίσταση), όταν πάνω του προσπέσει ακτινοβολία. Η μεταβολή στην αγωγιμότητα, προκύπτει από αύξηση των ηλεκτρικών φορέων που προέρχονται από διεγέρσεις ατόμων κατάλληλων ημιαγωγικών υλικών, τα οποία απορροφούν την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας. Το φαινόμενο ονομάζεται φωτοαγωγή (photoconduction). Το ρεύμα το οποίο περνάει μέσα από τον ανιχνευτή και το οποίο βασίζεται σε κατάλληλη πόλωση του μέσω μιας πηγής σταθερής τάσης, είναι που διαμορφώνεται από το επιπλέον ρεύμα λόγω φωτοαγωγής. Αυτός άλλωστε είναι και ο τρόπος λειτουργίας του.

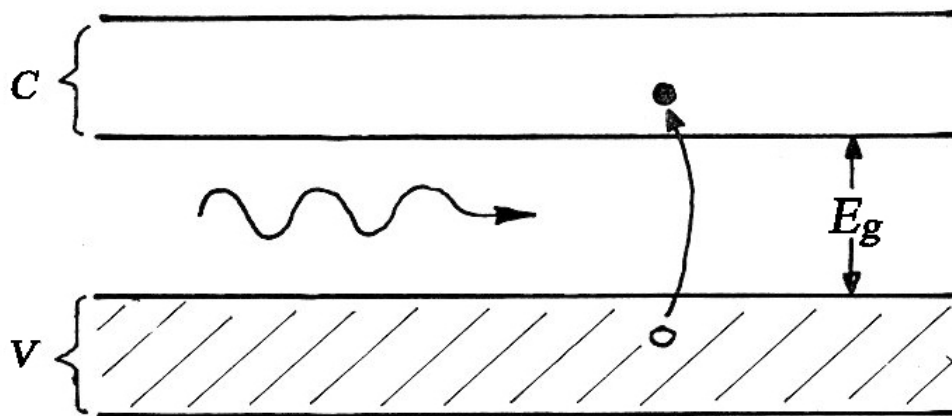
Τα υλικά κατασκευής των φωτοαγωγών είναι ημιαγωγικά ενδογενή ή εξωγενή (με προσμίξεις). Οι ανιχνευτές αυτοί διαθέτουν ορισμένα χαρακτηριστικά (χρόνο απόκρισης, φασματική επιλεκτικότητα, αποκρισιμότητα κ.λ.π.), που τους κατατάσσει σε σχέση με αντίστοιχους ανιχνευτές άλλου είδους. Για παράδειγμα ο χρόνος απόκρισης τους βρίσκεται μεταξύ των πολύ γρήγορων φωτοπολλαπλασιαστών (10 ns) και των σχετικά αργών θερμικών ανιχνευτών (50 ms). Η φασματική τους επιλεκτικότητα καθορίζεται από την τιμή του ενεργειακού χάσματος E_g του υπό χρήση υλικού, επειδή φωτοφορείς δημιουργούνται μόνο από απορροφούμενα φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη του E_g . Σε σχέση με τους φωτοβολταϊκούς, οι φωτοαγώγιμοι ανιχνευτές μειονεκτούν λόγω της

ανάπτυξης κατά τη λειτουργία τους περισσότερων θορύβων.

Ο μηχανισμός λειτουργίας των ημιαγωγικών φωτοαγωγιμων ανιχνευτών, στηρίζεται στη θεωρία των ενεργειακών ζωνών για ενδογενείς και εξωγενείς ημιαγωγούς, καθώς και στην αλληλεπίδραση των φωτονίων με τα άτομά τους. Θεωρούμε την περίπτωση ενός ενδογενούς ημιαγωγού όπως αυτή του παρακάτω σχήματος, του οποίου οι ενεργειακές στάθμες της ζώνης σθένους είναι πλήρεις ενώ της ζώνης αγωγιμότητας κενές. Οι δύο ζώνες διαχωρίζονται από το ενεργειακό χάσμα με τιμή E_g . Αυτή η ενέργεια τουλάχιστον θα πρέπει ν' απορροφηθεί από το άτομο ενός ημιαγωγού προκειμένου ένα ηλεκτρόνιο του να μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Το ηλεκτρόνιο στη θέση που εγκατέλειψε αφήνει μια οπή. Οπή και ηλεκτρόνιο είναι ευκίνητοι φορείς, οι οποίοι κάτω από την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου (εφαρμογή τάσης στα άκρα του ημιαγωγού) θα κινηθούν σε αντίθετες κατευθύνσεις ενισχύοντας την αγωγιμότητα, δηλαδή την ήδη υπάρχουσα ποσότητα κινούμενων φορέων λόγω της ύπαρξης του πεδίου. Η επιπλέον όμως αυτή φωτοαγωγιμότητα που διαμορφώνει την αρχική είναι δυνατόν να διαταραχθεί λόγω του θερμικού θορύβου. Δηλαδή οι μεταφερόμενοι επί πλέον φορείς στη ζώνη αγωγιμότητας (ηλεκτρόνια) και τη ζώνη σθένους (οπές), μπορεί να μην προέρχονται αποκλειστικά από απορρόφηση φωτός, αλλά και από θερμική διέγερση. Το γεγονός συμβαίνει επειδή τις περισσότερες φορές ισχύει $kT > E_g$ που σημαίνει ότι έχουμε ιονισμό λόγω θερμικών κινήσεων των μορίων των ημιαγωγών.

Στη περίπτωση αυτή το μετρούμενο τελικά σήμα θα περιλαμβάνει και θερμικό θόρυβο ο οποίος φυσικά είναι ανεπιθύμητος. Προκειμένου ν' αποφευχθεί, θα πρέπει οι φωτοανιχνευτές να ψύχονται σε τέτοιο βαθμό ώστε $kT \ll E_g$ οπότε οι θερμικές διεγέρσεις να μην καταλήγουν σε ιονισμό και κατ' επέκταση σε δημιουργία φορέων. Στην περίπτωση του

φωτοϊονισμού θα πρέπει τουλάχιστον να ισχύει $\nu = E_g/h$, όπου ν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Σχήμα 14.1 : Ενδογενής ημιαγωγός, του οποίου οι ενεργειακές στάθμες της ζώνης σθένους είναι πλήρεις, ενώ της ζώνης αγωγιμότητας κενές.

Επειδή $c = \lambda \cdot \nu$, το μέγιστο μήκος κύματος λ_c (μήκος κύματος αποκοπής) με το οποίο μπορεί να επιτευχθεί μια ηλεκτρονική μετάβαση θα είναι:

$$\lambda_c = 1,24/E_g \quad (\text{σχέση } 24)$$

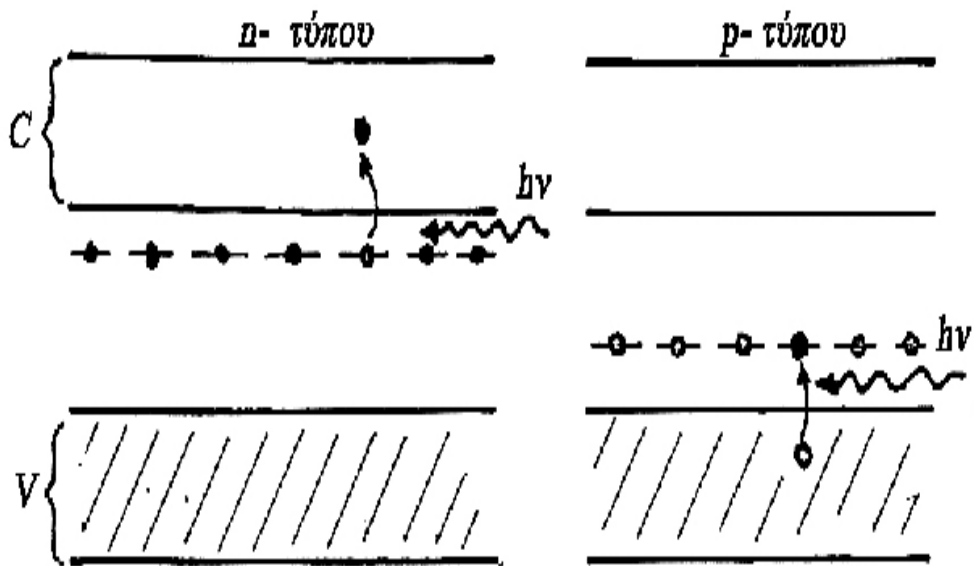
όπου λ_c μετρείται σε μm και η E_g σε eV .

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε ένα αριθμό ενδογενών ημιαγωγικών υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται σαν φωτοαγωγοί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

| α/α | Ημιαγωγός | E_g (eV) | Μήκος κύματος αποκοπής λ_c (μm) |
|------------|------------------|----------------------------------|---|
| 1 | AgAl | 3,2 | 0,39 |
| 2 | CdS | 2,42 | 0,51 |
| 3 | CdSe | 1,74 | 0,85 |
| 4 | CdTe | 1,45 | 0,71 |
| 5 | GaAs | 1,4 | 0,88 |
| 6 | GaP | 2,25 | 0,55 |
| 7 | Ge | 0,67 | 1,8 |
| 8 | InAs | 0,33 | 3,7 |
| 9 | InSb | 0,23 | 5,4 |
| 10 | Si | 1,14 | 1,1 |
| 11 | PbS | 0,35 | 3,5 |
| 12 | PbSe | 0,27 | 4,6 |
| 13 | PbTe | 0,3 | 4,1 |

Πίνακας 1 : Ενδογενείς ημιαγωγοί με τις αντίστοιχες τιμές των E_g και λ_c

Προκειμένου ν' ανιχνεύσουμε περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με μεγαλύτερα μήκη κύματος απ' ό τι μπορούμε να ανιχνεύουμε με τους ενδογενείς ημιαγωγούς, από τη σχέση που αναφέραμε πιο πάνω βλέπουμε ότι χρειάζονται ημιαγωγοί με μικρότερο E_g . Το πρόβλημα λύνεται με τη χρησιμοποίηση εξωγενών ημιαγωγικών υλικών, δηλαδή ημιαγωγών με προσμίξεις. Για τις περιπτώσεις αυτές, οι στάθμες των δοτών (για n- τύπου ημιαγωγούς) βρίσκονται κατά τα γνωστά κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας, γεγονός που ελαττώνει κατά πολύ την ενέργεια των φωτονίων που απαιτείται για τη δημιουργία των φωτοφορέων. Στο σχήμα 14.2 μπορούμε να δούμε τη μετάβαση στη ζώνη αγωγιμότητας (από τις στάθμες των δοτών) μετά την απορρόφηση ενέργειας $h \cdot \nu$, καθώς επίσης και τη δημιουργία οπής στη ζώνη σθένους κατά τη μετάβαση ηλεκτρονίου σε στάθμη αποδεκτών μετά την απορρόφηση ενέργειας $h \cdot \nu$ ενός φωτονίου.



(α) περίπτωση

(β) περίπτωση

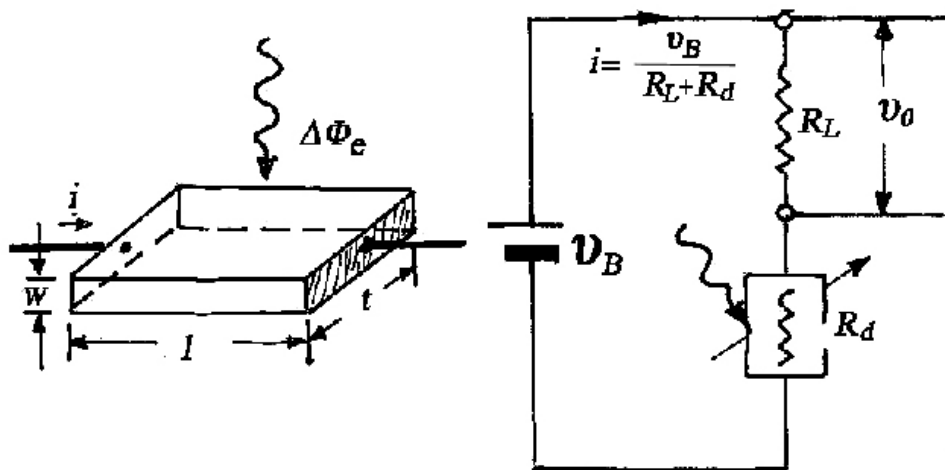
Σχήμα 14.2 : Εξωγενής ημιαγωγός, του οποίου οι ενεργειακές στάθμες της ζώνης σθένους είναι πλήρεις, ενώ της ζώνης αγωγιμότητας κενές.

Εφόσον αποκλεισθεί οποιοσδήποτε άλλος τρόπος ιονισμού, για την πρώτη περίπτωση έχουμε την δημιουργία ευκίνητων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και για τη δεύτερη ευκίνητων οπών στη ζώνη σθένους. Δηλαδή στους εξωγενείς ημιαγωγούς δημιουργούνται φορείς ενός είδους κατά πλειοψηφία. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε ένα αριθμό εξωγενών

ημιαγωγών οι οποίοι χρησιμοποιούνται σαν φωτοαγώγιμοι ανιχνευτές. Επειδή πλέον τα ενεργειακά χάσματα για τη δημιουργία φορέων στους ημιαγωγούς αυτούς είναι πολύ μικρότερα απ' ό τι στους ενδογενείς, θα πρέπει να παίρνουμε πιο αυστηρά μέτρα προκειμένου ν' αποφεύγεται ο θόρυβος λόγω θερμικών διεγέρσεων.

| α/α | Ημιαγωγός | E_g (eV) | Τύπος ημιαγωγού | Μήκος κύματος αποκοπής λ_c (μm) |
|-----------------|-----------|---------------|--------------------|--|
| 1 | GeHg | 0,09 | p | 13,78 |
| 2 | GeCu | 0,041 | p | 30,24 |
| 3 | GeCd | 0,06 | p | 20,67 |
| 4 | SiAs | 0,053 7 | n | 23,09 |
| 5 | SiBi | 0,070 6 | p | 17,56 |
| 6 | SiP | 0,045 | n | 27,56 |
| 7 | SiIn | 0,165 | p | 7,52 |
| 8 | SiMg | 0,087 | p | 14,26 |

Πίνακας 2 : Εξωγενείς ημιαγωγοί με τις αντίστοιχες τιμές των E_g και λ_c



Σχήμα 15 : Αρχή λειτουργίας φωτοαγωγιμίου ανιχνευτή.

Για να λειτουργήσει ο ανιχνευτής θα πρέπει να πολωθεί κατάλληλα. Λόγω και μόνο της πόλωσης του, η πυκνότητα του ρεύματος που τον διαρρέει θα δίνεται από τη σχέση:

$$j = \sigma_0 E \quad (\text{σχέση 25})$$

όπου j η πυκνότητα του ρεύματος (C/m^2s), E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του (V/m) και σ_0 η αγωγιμότητα σε ($ohm^{-1}cm^{-1}$). Η σ_0 εκφράζεται όπως έχουμε πει ως εξής:

$$\sigma_0 = N_0 \mu_0 q_e + P_0 \mu_h q_e \quad (\text{σχέση 26})$$

όπου N_0 , P_0 οι συγκεντρώσεις των ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών, $q_e = 1,6 \times 10^{-19}$ C το φορτίο του ηλεκτρονίου και μ_e , μ_h οι ευκινησίες των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα ($\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$) οι οποίες συνδέονται με τις ταχύτητες που αποκτούν οι φορείς λόγω του πεδίου E από τις σχέσεις:

$$u_e = -\mu_e E \text{ και } u_h = -\mu_h E \quad (\text{σχέση 27})$$

Αν τώρα ΔN και ΔP είναι οι επί πλέον συγκεντρώσεις των φορέων (ηλεκτρονίων και οπών) που παράγονται μετά την απορρόφηση των φωτονίων της δέσμης που φωτίζει τον ανιχνευτή, η αγωγιμότητα θα μεταβληθεί κατά $\Delta\sigma$, οπότε:

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \text{ και } \sigma = q_e [\mu_e (N_0 + \Delta N) + \mu_h (P_0 + \Delta P)] \quad (\text{σχέση 28})$$

Η αύξηση αυτή της αγωγιμότητας είναι που αναδεικνύει το μηχανισμό ανίχνευσης της απορροφούμενης ακτινοβολίας. Επειδή η σ_0 είναι γνωστή, για τη $\Delta\sigma$ θα έχουμε:

$$\Delta\sigma = q_e (\mu_e \Delta N + \mu_h \Delta P) \quad (\text{σχέση 29})$$

Λόγω του μηχανισμού δημιουργίας των συγκεντρώσεων ΔN , ΔP (ένα ηλεκτρόνιο – μια οπή), θα είναι: $\Delta N = \Delta P$ οπότε:

$$\Delta\sigma = q_e (\mu_e + \mu_h) \Delta N \quad (\text{σχέση 30})$$

Η μεταβολή στη συγκέντρωση των φορέων (ηλεκτρονίων) προκαλείται από την ροή φωτονίων Φ_p , που είναι ο αριθμός των προσπιπτόντων φωτονίων ανά δευτερόλεπτο στον όγκο είναι:

$$\Delta V = l \cdot t \cdot w = A \cdot w \quad (\text{σχέση 31})$$

όπου A η επιφάνεια και w το πάχος του υλικού του φωτοανιχνευτή. Εφόσον λάβουμε υπόψη μας τον χρόνο ζωής (life time) των παραγόμενων ηλεκτρονίων (μέχρι την επανασύνδεσή τους) το ΔN θα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta N = \frac{\eta \Delta \Phi_p \tau_L}{A w} \quad (\text{σχέση 32})$$

όπου “ η ” είναι η κβαντική απόδοση (αριθμός παραγόμενων ηλεκτρονίων ανά φωτόνιο) και “ τ_L ” ο χρόνος ζωής. Τότε η σχετική μεταβολή στην αγωγιμότητα ($d\sigma/\sigma$) θα είναι:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{q_e (\mu_e + \mu_h) \eta \Delta \Phi_p \tau_L}{\sigma A w} \quad (\text{σχέση 33})$$

Θέλουμε τώρα να εκφράσουμε για πρακτικούς λόγους τη σχετική μεταβολή της αγωγιμότητας των ανιχνευτών σε σχετική μεταβολή της αντίστασης του R_d . Αν ρ η ειδική του αντίσταση, επειδή $\sigma = 1/\rho$ θα έχουμε:

$$R_d = \rho \frac{l}{wt} = \frac{l}{\sigma wt} \quad (\text{σχέση 34})$$

της οποίας η διαφορική μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$dR_d = -\frac{l d\sigma}{\sigma^2 wt} = -R_d \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (\text{σχέση 35})$$

Αντικαθιστώντας στην τελευταία, έχουμε:

$$dR_d = -R_d \frac{q_e(\mu_e + \mu_h)}{\sigma} \frac{\eta \Delta \Phi_p \tau_L}{A w} \quad (\text{σχέση 36})$$

Αν αντικαταστήσουμε το φωτονικό σήμα Φ_p (lumen [lm]) σε μονάδες ροής ακτινοβολίας Φ_e (Watt [W]) από τη σχέση:

$$\Delta \Phi_p = \Delta \phi_c / (hc/\lambda) \quad (\text{σχέση 37})$$

θα έχουμε για την dR_d :

$$dR_d = -R_d \frac{q_e(\mu_e + \mu_h)}{\sigma} \frac{\eta d\Phi_c \tau_L \lambda}{hc A w} \quad (\text{σχέση 38})$$

όπου $\Delta \Phi_p$ στο όριο γίνεται $d\Phi_p$. Για να μπορέσουμε τώρα να μετρήσουμε τη φωτοπαραγόμενη αυτή μεταβολή dR_d της αντίστασης R_d θα πρέπει να την πολώσουμε μέσω μιας πηγής τάσης U_B και της αντίστασης φορτίου R_L . Τότε η διαφορά δυναμικού στα άκρα της R_L θα είναι:

$$U_0 = U_B R_L / (R_d + R_L) \quad (\text{σχέση 39})$$

Μια μεταβολή στην U_0 θα οφείλεται στη μεταβολή της R_d μετά από έκθεση του φωτοανιχνευτή, οπότε:

$$dU_0 = -U_B R_L dR_d / (R_d + R_L)^2 \quad (\text{σχέση 40})$$

όπου dU_0 είναι η χρονικά μεταβαλλόμενη τάση η οποία προστίθεται στη συνεχή τάση U_0 . Η αντικατάσταση στην τελευταία μας δίνει:

$$dU_0 = \frac{U_B R_L R_d}{(R_L + R_d)^2} \frac{q_e \lambda \eta \tau_L (\mu_e + \mu_h)}{\sigma h c A w} d\Phi_e \quad (\text{σχέση 41})$$

οπότε η αποκρισιμότητα R_U του ανιχνευτή όσον αφορά την τάση θα είναι:

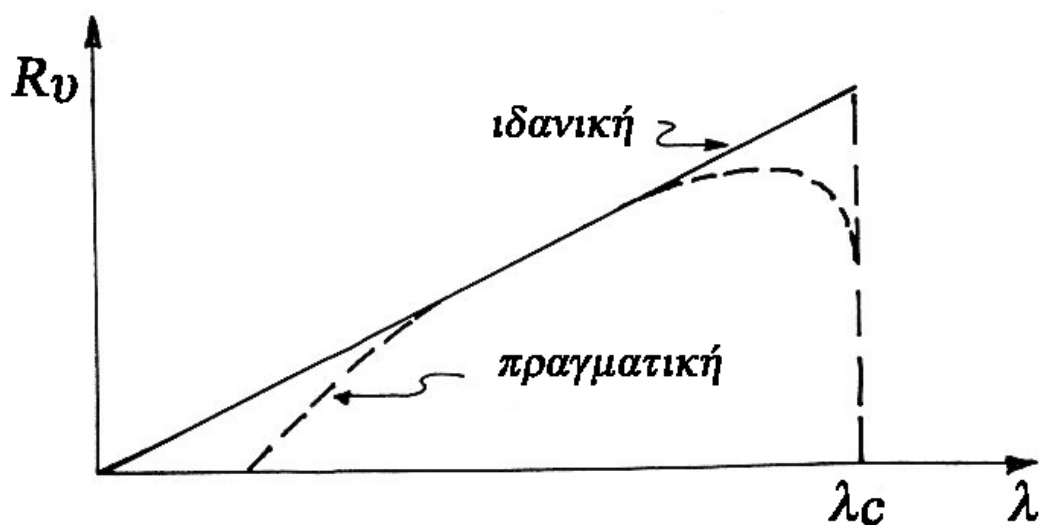
$$R_U = \frac{dU_0}{d\Phi_e} = \frac{i q_e \lambda \eta \tau_L (\mu_e + \mu_h)}{\sigma h c A w} \frac{R_L R_d}{R_L + R_d} \quad (\text{σχέση 42})$$

όπου $i = U_B / (R_L + R_d)$. Βλέπουμε ότι η R_U είναι μια γραμμική συνάρτηση του μήκους κύματος λ μέχρι το οριακό μήκος κύματος αποκοπής λ_c . Στην πραγματικότητα όμως για λόγους που οφείλονται σε πολλούς παράγοντες, η μορφή της είναι αυτή του παρακάτω σχήματος (διακεκομμένη γραμμή).

Η κάμψη της R_U για παράδειγμα για τα μικρότερα μήκη κύματος οφείλεται στην αύξηση της ανακλαστικότητας στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Το γεγονός αυτό πράγματι συμβαίνει, επειδή καθώς το μήκος κύματος λ ελαττώνεται, αυξάνεται ο δείκτης διάθλασης του υλικού, άρα και η ανακλαστικότητά του. Μια τυπική τιμή για $n = 1,5$ είναι 8%. Αυτό σημαίνει ότι το 8% της προσπίπτουσας ισχύος στην επιφάνεια του φωτοανιχνευτή ανακλάται και δεν συμμετέχει στην παραγωγή φωτοφορέων, με αποτέλεσμα την ελάττωση της αποκρισιμότητας R_U .

Σε αντίθετη περίπτωση, αν αυξάνεται το μήκος κύματος, μειώνεται ο δείκτης διάθλασης και η ανακλαστικότητα, που σημαίνει αύξηση της αποκρισιμότητας R_U .

Η αποκρισιμότητα R_U του ανιχνευτή γίνεται μηδέν για μήκη κύματος μεγαλύτερα ή ίσα με το μήκος κύματος αποκοπής.



Σχήμα 16 : Αποκρισιμότητα συναρτήσει του μήκους κύματος.

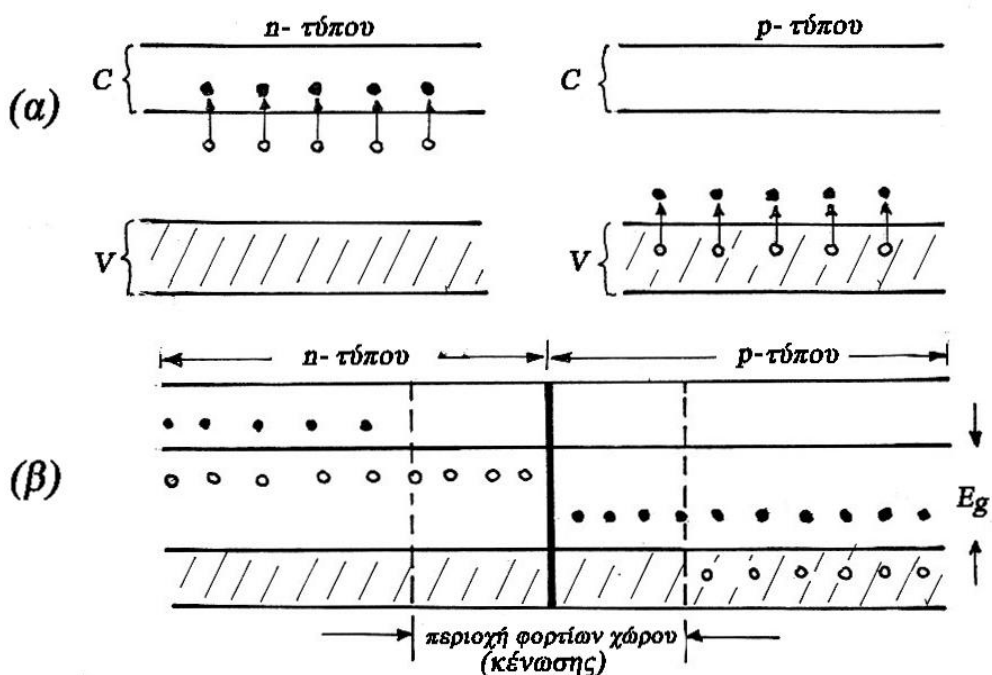
3.2.2.3 Φωτοβολταϊκοί Ανιχνευτές

Οι φωτοβολταϊκοί ανιχνευτές αποτελούνται από μια επαφή p-n και καλούνται και φωτοδίοδοι. Όταν προσπέσει επάνω τους ακτινοβολία, αναπτύσσεται στα άκρα τους πτώση τάσης και μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς εξωτερική πόλωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα ηλιακά στοιχεία, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. (Hyperphysics, 2010)

Πρόκειται για ανιχνευτές ημιαγωγικού τύπου, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ένα φωτόρρευμα (ή μια φωτόταση) χωρίς κατ' αρχήν την εφαρμογή εξωτερικής ηλεκτρικής πόλωσης (δηλαδή εφαρμογής διαφοράς δυναμικού στα άκρα τους). Στην κατηγορία αυτοί ανήκουν οι ημιαγωγικές φωτοδίοδοι ή απλά φωτοδίοδοι (photodiodes). Η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την παραγωγή

ηλεκτρικού ρεύματος όταν αυτές φωτιστούν, για το οποίο όμως απαιτείται η ύπαρξη φράγματος δυναμικού, που μπορεί να δημιουργείται από μια δίοδο p-n. (Pierre Ruterana - Martin Albrecht - Jörg Neugebauer, 2003)

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η δομή των ενεργειακών σταθμών για δύο τμήματα ημιαγωγών τύπου n και p αντίστοιχα. (Pierre Ruterana - Martin Albrecht - Jörg Neugebauer, 2003)



Σχήμα 17 : Ενεργειακές στάθμες ημιαγωγών τύπου n και p.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι στη θερμοκρασία δωματίου οι φορείς των προσμίξεων στις στάθμες των δοτών και των αποδεκτών είναι ιονισμένοι. Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια των δοτών (των οποίων οι ενεργειακές στάθμες βρίσκονται κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας) καταλαμβάνουν ενεργειακές στάθμες της ζώνης αγωγιμότητας (όπου και έχουν τη

δυνατότητα να κινούνται ελεύθερα), αφήνοντας πίσω τους δυσκίνητες οπές. Για την περίπτωση του ημιαγωγού p-τύπου τις ενεργειακές στάθμες των αποδεκτών (κοντά στη ζώνη σθένους) καταλαμβάνουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη αυτή (τα οποία πλέον είναι μη ευκίνητα), αφήνοντας πίσω τους (στη ζώνη σθένους) ευκίνητες οπές. Αυτή είναι στοιχειωδώς η διαδικασία της αύξησης της αγωγιμότητάς στους ημιαγωγούς με προσμίξεις. Αν τώρα τα δύο τμήματα των ημιαγωγών έλθουν σε επαφή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια θα διαχυθούν από τη n στην p-περιοχή, ενώ οι οπές από την p στην n. Η κίνηση αυτή θα οδηγήσει σε διαδικασία επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών, δημιουργώντας μια περιοχή (περιοχή κένωσης - depletion layer) που είναι κενή από ευκίνητους φορείς. Η ίδια ονομάζεται επίσης περιοχή φορτίων χώρου (space charge layer) επειδή στην πραγματικότητα δεν είναι ηλεκτρικά ουδέτερη αλλά περιλαμβάνει τους (δυσκίνητους) ιονισμένους δότες και αποδέκτες. Στην πραγματικότητα η περιοχή είναι ασύμμετρη σε σχέση με το επίπεδο επαφής της διόδου επειδή τα ηλεκτρόνια συνήθως διαχέονται σε μεγαλύτερο βάθος από ότι οι οπές. Η ανάπτυξη της περιοχής κένωσης σταματάει επειδή τα υπάρχοντα εκεί φορτία χώρου δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο το οποίο πλέον αντiperίθεται στη διάχυση των ελευθέρων φορτίων (ηλεκτρονίων και οπών). (Hyperphysics, 2010).

Η ύπαρξη αυτού του πεδίου, δημιουργεί μεταξύ της n και p-περιοχής μια διαφορά δυναμικού V_0 (φράγμα δυναμικού), (Σχήμα 17.α) προκαλώντας μ' αυτόν τον τρόπο μία κάμψη των ενεργειακών ζωνών. Αυτή η διαφορά δυναμικού μεταξύ των υλικών p και n είναι υπεύθυνη για τις ανορθωτικές ιδιότητες της διόδου. Πράγματι αν μεταξύ των p και n-τύπου υλικών εφαρμόσουμε μια εξωτερική διαφορά δυναμικού, η πτώση αυτή της τάσης θα εμφανιστεί κυρίως κατά μήκος της ζώνης κένωσης

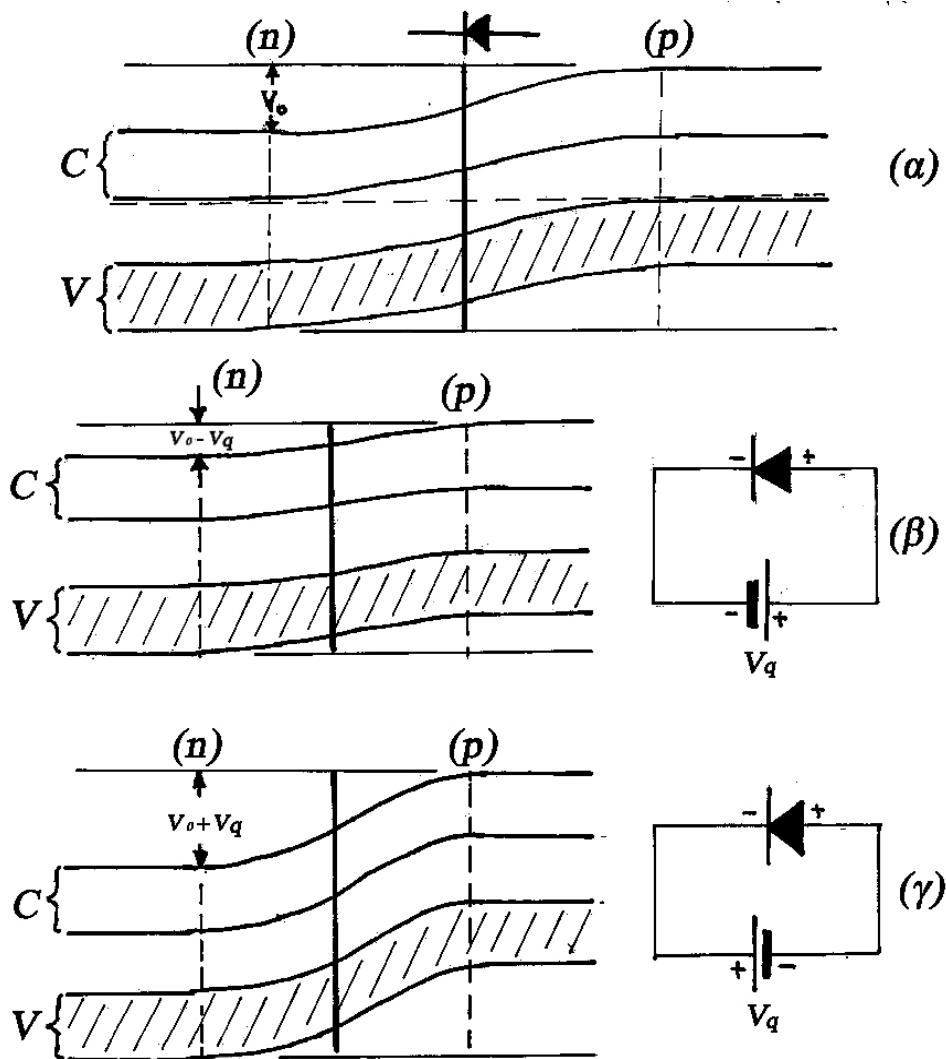
επειδή σ' εκείνη την περιοχή δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς, οπότε το τμήμα αυτό θα εμφανίζει και τη μεγαλύτερη αντίσταση. Ορθή θα είναι η ηλεκτρική πόλωση όταν το (+) της εξωτερικής πηγής εφαρμοστεί στο p-τμήμα της διόδου και το (-) στο n-τμήμα (Σχήμα 17.β). Κάτω από αυτές τις συνθήκες το φράγμα δυναμικού περιορίζεται δραστικά με συνέπεια τα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς τα δεξιά ενώ οι οπές προς τα αριστερά που σημαίνει ότι θα έχουμε ένα συνολικό ρεύμα με συμβατική φορά από την p στην n περιοχή της διόδου μέσω της περιοχής κένωσης (ορθή πόλωση της διόδου). Αν εφαρμόσουμε αντίστροφη πόλωση τότε το φράγμα δυναμικού μεταξύ των δύο τμημάτων της διόδου στην περιοχή κένωσης θ' αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό με συνέπεια οι φορείς (ηλεκτρόνια και οπές) να μην μπορούν να το διαπεράσουν, έτσι που το ρεύμα μέσω της επαφής να είναι μηδενικό (αντίστροφη πόλωση της διόδου). (Pierre Ruterana - Martin Albrecht - Jörg Neugebauer, 2003)

Προκειμένου τώρα να δούμε πώς μια δίοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φωτοανιχνευτής, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε αρχικά το ρεύμα το οποίο τη διαρρέει όταν είναι πολωμένη κατά την ορθή πόλωση V_q και δεν φωτίζεται εξωτερικά. Το ρεύμα διαμορφώνεται από τέσσερις παράγοντες όπου i_{nd} είναι το ρεύμα των ελεύθερων ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας που οφείλεται στη διάχυσή τους από την n στην p περιοχή, υπερπηδώντας το φράγμα δυναμικού (ρεύμα διάχυσης) (diffusion current). Επειδή το φράγμα αυτό ελαττώνεται με την αύξηση της V_q , το ρεύμα εκφράζεται από τη σχέση:

$$i_{nd} = i_{nd,0} \exp \frac{q_e V_q}{kT} \quad (\text{σχέση 43})$$

όπου $i_{nd,0}$ το ρεύμα διάχυσης των ηλεκτρονίων με απουσία εξωτερικής πόλωσης, q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου, T η απόλυτη θερμοκρασία και k η

σταθερά του Boltzmann. i_{ng} είναι το ρεύμα παραγωγής (generation current) και οφείλεται στα λίγα σχετικά ηλεκτρόνια τα οποία υπάρχουν στη p- περιοχή και τα οποία διεγείρονται θερμικά από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 18 : Η δίοδος ως φωτοανιχνευτής α) χωρίς εξωτερική πόλωση, β) με ορθή πόλωση, γ) με αντίστροφη πόλωση

Αν τα ηλεκτρόνια αυτά συναντήσουν την επαφή, απωθούνται προς τη n περιοχή ανεξάρτητα από την ύπαρξη του εξωτερικά εφαρμοζόμενου δυναμικού V_q . Άρα η φορά του i_{ng} είναι αντίθετη αυτής του i_{nd} . Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο βρίσκουμε:

$$i_{pd} = i_{pd,0} \exp \frac{q_e V_q}{kT} \quad (\text{σχέση 44})$$

όπου i_{pd} το ρεύμα διάχυσης των οπών και $i_{pd,0}$ το ίδιο χωρίς την επίδραση εξωτερικής τάσης. i_{pg} είναι το ρεύμα παραγωγής των οπών κατά τη μετάπτωσησή τους από τη ζώνη αγωγιμότητας της n- περιοχής στη ζώνη σθένους και την απώθησή τους προς την p- περιοχή. Άρα το συνολικό ρεύμα θα δίνεται από τη σχέση:

$$i = i_{pd} + i_{nd} - i_{pg} - i_{ng} = (i_{pd,0} + i_{nd,0}) \exp \frac{q_e V_q}{kT} - (i_{pg} + i_{ng}) \quad (\text{σχέση 45})$$

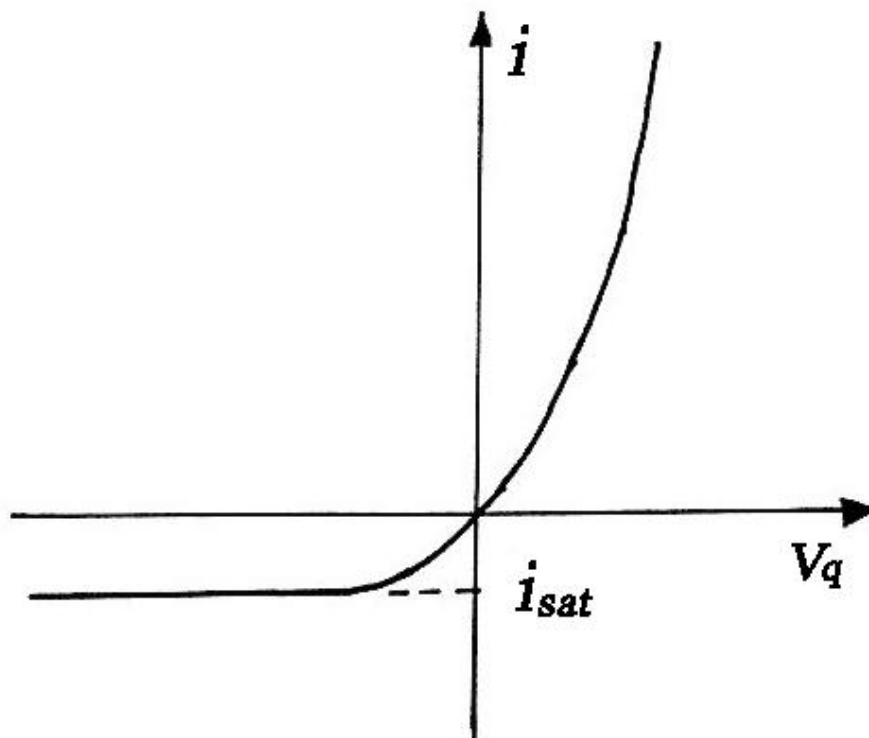
Η συνθήκη ισορροπίας επιβάλλει το συνολικό ρεύμα να είναι μηδέν για $V_q=0$, οπότε θα έχουμε:

$$i_{sat} = i_{pg} + i_{ng} = i_{pd,0} + i_{nd,0} \quad (\text{σχέση 46})$$

όπου i_{sat} είναι το ρεύμα κόρου (saturation current). Μια τυπική τιμή αυτού του ρεύματος για φωτοδίοδο πυριτίου είναι 10^{-7} με 10^{-9} A. Άρα τελικά:

$$i = i_{sat} \left(\exp \frac{q_e V_q}{kT} - 1 \right) \quad (\text{σχέση 47})$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η γραφική παράσταση του i , το οποίο ονομάζεται και ρεύμα σκότους (dark current) συναρτήσει της εξωτερικής πόλωσης V_q . (Hyperphysics, 2010)



Σχήμα 19: Διάγραμμα V_q - i

Στην κατηγορία των φωτοβολταϊκών ανιχνευτών ανήκουν και τα **φωτοτρανζίστορ**. Αυτά έχουν την ίδια κατασκευή με ένα τρανζίστορ επαφής, με τη διαφορά ότι προβλέπεται η δυνατότητα φωτισμού της επαφής βάσεως – συλλέκτη. Το φωτοτρανζίστορ μπορεί να λειτουργήσει ή με τη βάση πολωμένη με κάποια πόλωση ή ασύνδετη (στο αέρα).

Γνωρίζουμε ότι το ρεύμα συλλέκτη σε ένα τρανζίστορ επαφής δίνεται από την εξίσωση:

$$I_c = \beta I_b + (\beta + 1) I_{cbo} \quad (\text{σχέση 48})$$

Όταν η βάση είναι ασύνδετη, η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$I_c = (\beta + 1) I_{cbo} \quad (\text{σχέση 49})$$

Δηλαδή το ρεύμα I_c είναι $\beta + 1$ φορές το ανάστροφο ρεύμα βάσεως συλλέκτη. Το ρεύμα αυτό είναι ουσιαστικά το ρεύμα της επαφής J_c . Όταν φωτιστεί η επαφή αυτή, δημιουργούνται επιπλέον φορείς στην περιοχή απογυμνώσεως, με αποτέλεσμα την αύξηση του ανάστροφου ρεύματος I_{cbo} (η επαφή J_c είναι πολωμένη ανάστροφα) και συνεπώς του I_c .

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του φωτοτρανζίστορ είναι όμοιες με αυτές του διπολικού τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, με τη διαφορά ότι αντί να έχουν ως παράμετρο το ρεύμα I_b , έχουν τη φωτεινή ισχύ. Τα φωτοτρανζίστορ χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα αυτοματισμών, σε οπτικούς απομονωτές και σε κυκλώματα οπτικής σύζευξης.

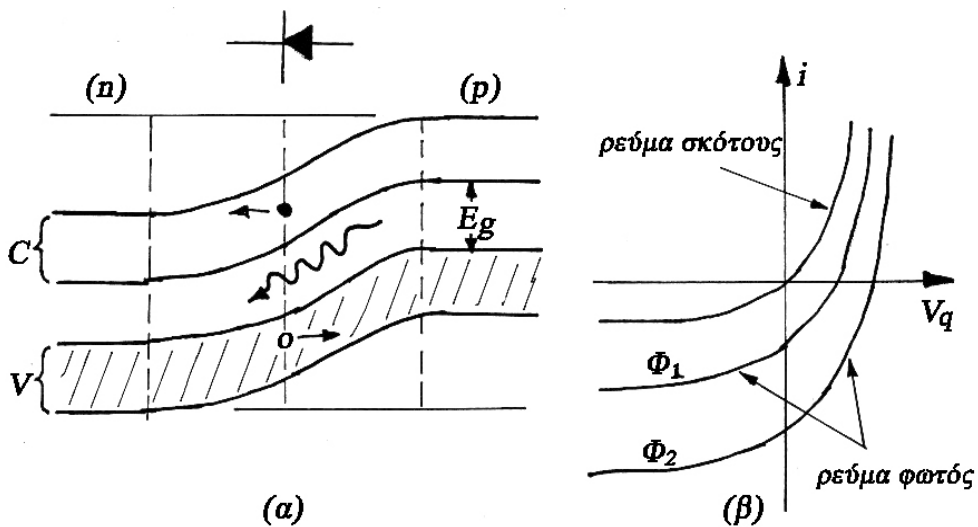
Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η συνάρτηση μεταξύ ρεύματος – τάσης μιας φωτοδιόδου τροποποιείται στην περίπτωση που φωτίσουμε την περιοχή των φορτίων χώρου. Τότε στην περιοχή αυτή θα εμφανιστούν επιπλέον φορτία που θα οφείλονται σε φωτοδιεγέρσεις και τα οποία θ' αποτελέσουν τη βάση για τη χρησιμοποίηση της διόδου σαν ανιχνευτή ακτινοβολίας. Πράγματι αν η

ενέργεια $h\nu$ ενός φωτονίου του προσπίπτοντος φωτός είναι μεγαλύτερη της ενέργειας χάσματος Eg , τότε το φωτόνιο μπορεί να απορροφηθεί. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής τα οποία με την επίδραση του υπάρχοντος στην περιοχή πεδίου επιταχύνονται προς αντίθετες διευθύνσεις. (Σχ. 20.α), προκαλώντας ένα ρεύμα με συμβατική φορά προς τα δεξιά. Αν θεωρήσουμε ότι η επιφάνεια της επαφής έχει εμβαδόν A και η ένταση του προσπίπτοντος φωτός είναι E_e (Watt/m²), τότε το φωτόρευμα θα δίνεται παρακάτω:

$$i_p = \eta q_e E_e A \frac{\lambda}{h \cdot c}$$

σχέση 50



Σχήμα 20

όπου η η κβαντική απόδοση (δηλ. ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται ανά προσπίπτον φωτόνιο), q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου, λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και h , c η σταθερά του Planck και η

ταχύτητα του φωτός. Βλέπουμε ότι το παραγόμενο φωτόρευμα για την περίπτωση που η φωτοδίοδος δεν είναι πολωμένη ($V_g = 0$) και που ονομάζεται **ρεύμα βραχυκύκλωσης (short – circuit current)** είναι γραμμική συνάρτηση της ροής ακτινοβολίας $\Phi_e = E_e \cdot A$. Το συνολικό ρεύμα για $V_g \neq 0$, $\Phi_e \neq 0$ θα είναι :

$$i = i_{sat} \left(e^{\frac{q_e V_g}{kT}} - 1 \right) - n q_e \Phi_e \frac{\lambda}{h \cdot c} \quad (\text{σχέση 51})$$

όπου κατά τα γνωστά Φ_e (Watt) η ισχύς της ακτινοβολίας που πέφτει στον ανιχνευτή. Οι νέες χαρακτηριστικές ρεύματος – τάσης πόλωσης της δίοδου για δύο περιπτώσεις, όπου οι προσπίπτουσες ισχύεις είναι Φ_1 και Φ_2 ($\Phi_2 > \Phi_1$) φαίνονται παραπάνω (σχήμα 20β).

3.2.2.4 Φωτοανιχνευτές Εξωτερικής Φωτοεκπομπής

Οι φωτοανιχνευτές εξωτερικής φωτοεκπομπής χρησιμοποιούν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όπου προσπίπτοντα φωτόνια ελευθερώνουν ηλεκτρόνια από την επιφάνεια του υλικού. Τέτοιες διατάξεις είναι για παράδειγμα, η φωτοδίοδος κενού και οι φωτοπολλαπλασιαστές.

Η λειτουργία αυτών των ανιχνευτών στηρίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το σήμα απόκρισης τους είναι ηλεκτρικό ρεύμα, αποτέλεσμα παραγωγής ηλεκτρονίων κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνειά τους. Ας θεωρήσουμε μια μεταλλική επιφάνεια από κατάλληλο υλικό στο εσωτερικό ενός αερόκενου διαφανούς σωλήνα, την οποία φωτίζουμε. Τότε από την επιφάνεια εκπέμπονται ηλεκτρόνια με την

προϋπόθεση ότι το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας είναι μικρότερο ή ίσο από μια ορισμένη τιμή. Γνωρίζοντας ότι το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται κβαντομηχανικά, το μήκος κύματος λ καθορίζει ένα συγκεκριμένο έργο (ενέργεια εξαγωγής) το οποίο χρειάζεται ν' απορροφήσει το ηλεκτρόνιο για να εγκαταλείψει την επιφάνεια. Το συγκεκριμένο έργο δίνεται από τη σχέση:

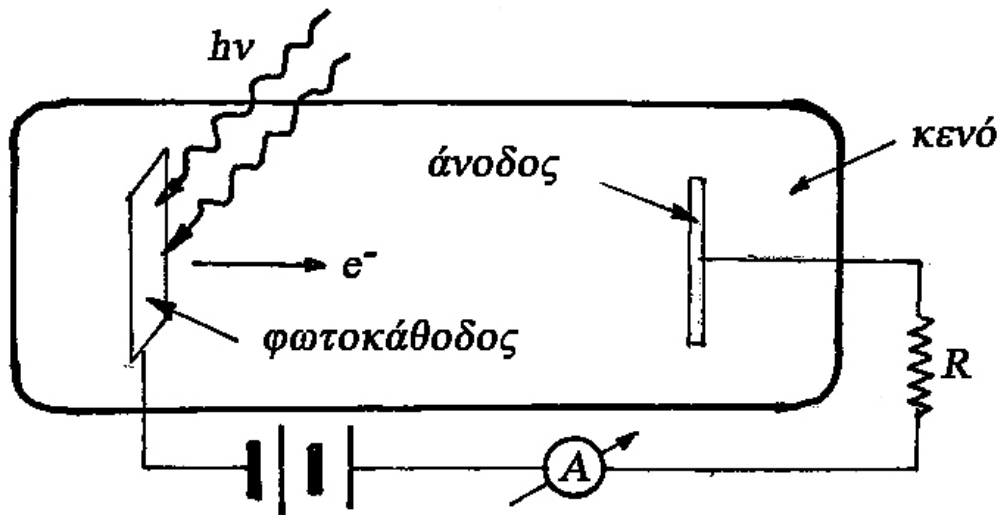
$$\Phi_0 = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{σχέση 52})$$

και κατά τα γνωστά χαρακτηρίζει την ενέργεια ενός φωτονίου συχνότητας ν . Αν τώρα η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια εξαγωγής του ηλεκτρονίου, τότε το πλεόνασμα της εμφανίζεται σαν κινητική ενέργεια του τελευταίου, δηλαδή:

$$\frac{1}{2}m_e u^2 = h\nu - \Phi_0 \quad (\text{σχέση 53})$$

όπου u η ταχύτητα του ηλεκτρονίου. Υπάρχει λοιπόν ένα μήκος κύματος $\lambda = \lambda_p$ κατωφλιού στη διαδικασία εξαγωγής των ηλεκτρονίων. Ακτινοβολία με μήκος κύματος μεγαλύτερο απ' αυτό δεν είναι δυνατόν να οδηγήσει σε παραγωγή ηλεκτρονίων ανεξάρτητα από την ισχύ της. Για μήκος κύματος κάτω του κατωφλιού, ο αριθμός των εξαγόμενων ηλεκτρονίων θα είναι ανάλογος της ισχύος της δέσμης.

Η αρχή λειτουργίας μιας διάταξης ανίχνευσης με τη διαδικασία της φωτοεκπομπής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 21 : Αρχή λειτουργίας ανιχνευτή φωτοεκπομπής

Βασικό εξάρτημά της είναι η φωτοκάθοδος, που είναι κατασκευασμένη από κατάλληλο υλικό. Αποτελεί πηγή εκπομπής των ηλεκτρονίων, όταν εκτεθεί σε κατάλληλο φωτισμό. Συνδέεται με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς τάσης. Ο άλλος πόλος της πηγής μέσω ενός αμπερομέτρου και μιας αντίστασης R ελέγχου ρεύματος, συνδέεται με το ηλεκτρόδιο της ανόδου. Υποθέτουμε ότι η κάθοδος φωτίζεται από μια δέσμη της οποίας η ροή φωτονίων (αριθμός προσπιπτόντων φωτονίων ανά δευτερόλεπτο) είναι Φ_p . Επίσης η κβαντική απόδοση της φωτοκαθόδου είναι η , όπου η ο λόγος των εξαγόμενων ηλεκτρονίων προς τον αριθμό των απορροφούμενων φωτονίων (σε μονάδες ηλεκτρόνια ανά φωτόνιο). Αν q_e το φορτίο ενός ηλεκτρονίου, τότε

το ρεύμα i που παράγεται από τη ροή Φ_p θα είναι:

$$i = qenF_p \quad (\text{σχέση 54})$$

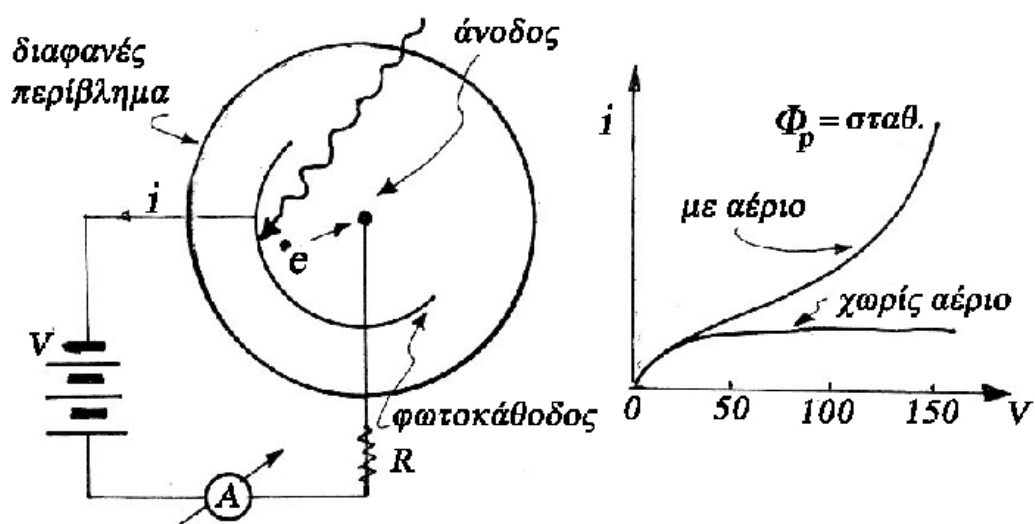
με την προϋπόθεση ότι η ενέργεια των φωτονίων είναι μεγαλύτερη από αυτή του έργου εξόδου για ένα ηλεκτρόνιο. Στην περίπτωση που η κάθοδος δεν φωτίζεται, δεν θα υπάρχει εκπομπή ηλεκτρονίων οπότε το κύκλωμα δε θα διαρρέεται από ρεύμα. Ο λόγος είναι ότι το κενό αποτελεί ένα άριστο μονωτή έτσι ώστε για να υπάρχει εκπομπή ηλεκτρονίων θα πρέπει μεταξύ ανόδου και καθόδου να εφαρμοστεί υπερυψηλή τάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εκπομπή πεδίου (field emission).

Μια μεταλλική φωτοκάθοδος συνήθως δεν αποκρίνεται για φωτόνια με λ_p μεγαλύτερο των 0,3μm, οπότε τα μέταλλα χρησιμοποιούνται για ανίχνευση στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αντίθετα για ημιαγωγικές φωτοκαθόδους, το έργο εξαγωγής είναι τέτοιο ώστε να μπορούν ν' ανιχνευτούν ακτινοβολίες με μεγαλύτερα μήκη κύματος, δηλαδή στο ορατό.

Οι ανιχνευτές φωτοεκπομπής, χαρακτηρίζονται από υψηλής ταχύτητας απόκριση έτσι ώστε ο χρόνος μεταξύ της απορρόφησης ενός φωτονίου στην κάθοδο και της άφιξης του ηλεκτρονίου στην άνοδο συνήθως είναι μικρότερος των 10^{-10} s. Όταν η προσπίπτουσα ροή στην φωτοκάθοδο είναι πολύ μικρή, τότε το ρεύμα που προκαλεί είναι τόσο μικρό, που συγχέεται με διάφορους θορύβους έτσι ώστε τελικά ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο να είναι αρκετά μικρότερος από τη μονάδα. Στην περίπτωση αυτή χρειάζονται οπωσδήποτε ενισχυτικά συστήματα προκειμένου ν' αυξηθεί ο λόγος αυτός.

Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας που στηρίζονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατηγοριοποιούνται συνήθως σε φωτοκύτταρα και

φωτοπολλαπλασιαστές. Στο φωτοκύτταρο (vacuum phototube), του οποίου μια τομή βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα, η φωτοκάθοδος είναι κυλινδρικής μορφής ορισμένου μήκους και η άνοδος του αποτελείται από ένα κατακόρυφο σύρμα που καταλαμβάνει τη θέση του άξονα του κυλίνδρου. Τα περισσότερα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στην άνοδο. Το σύστημα άνοδος – κάθοδος περικλείεται σε αερόκενο γυάλινο σωλήνα και στα άκρα του εφαρμόζεται μια σταθερή διαφορά δυναμικού μέσω της αντίστασης R . Αν τώρα φωτίσουμε την κάθοδο, το μετρούμενο ρεύμα θα είναι ανάλογο της ροής φωτονίων Φ_p . Η γραμμική αυτή σχέση αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση ανάπτυξης οργάνου μέτρησης ακτινοβολίας. Αν τώρα θεωρήσουμε ότι η προσπίπτουσα ροή είναι σταθερή και μεταβάλλουμε την τάση πόλωσης του φωτοκυττάρου θα πάρουμε τη χαρακτηριστική του καμπύλη.

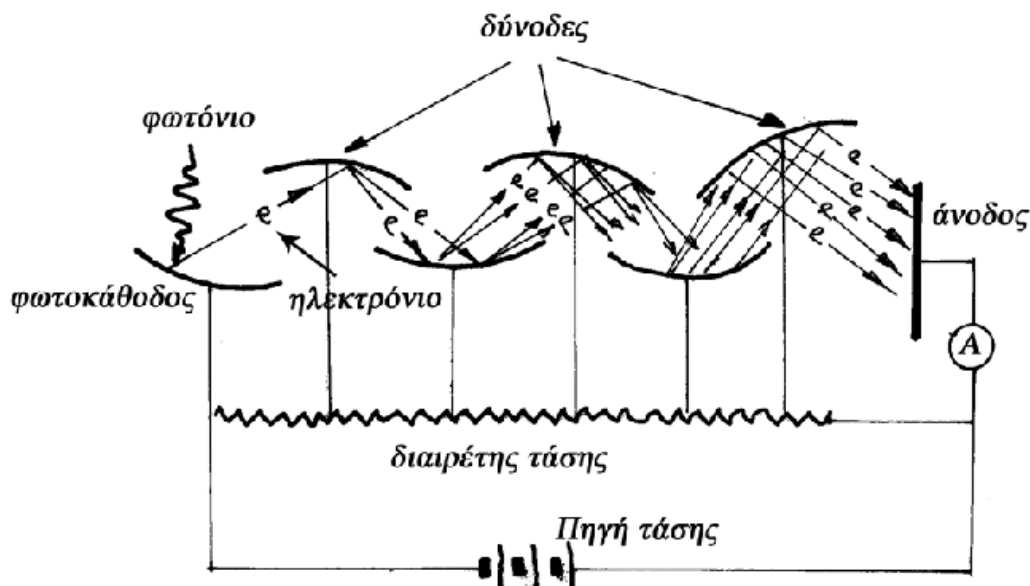


Σχήμα 22 : Ανιχνευτής φωτοεκπομπής και χαρακτηριστική καμπύλη

Από τη μορφή αυτής της καμπύλης προκύπτει ότι μετά από μια ορισμένη τιμή τάσης, η ένταση του ρεύματος δεν αυξάνεται (ρεύμα κόρου). Άρα το ρεύμα κόρου θ' αντιστοιχεί σ' εκείνη την τάση, όπου όλα τα ηλεκτρόνια από την κάθοδο να φτάνουν στην άνοδο. Είναι δυνατόν ν' αυξήσουμε την ευαισθησία του φωτοκυττάρου με την εισαγωγή στο εσωτερικό του περιβλήματος του ορισμένης ποσότητας κατάλληλου αερίου. Τότε, όπως μπορούμε να δούμε από το διάγραμμα, η χαρακτηριστική του καμπύλη ($i-V$) αλλάζει ριζικά με το ρεύμα ν' αυξάνεται συνεχώς σε σχέση με την αύξηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου.

Αυτό οφείλεται στον ιονισμό των μορίων του αερίου από τα διαφεύγοντα ηλεκτρόνια της καθόδου, γεγονός που προκαλεί επιπλέον πολλαπλασιασμό τους, με συνέπεια την αύξηση του ρεύματος. Το φαινόμενο είναι τέτοιο που αν η διαφορά δυναμικού αυξηθεί πάνω από μια ορισμένη τιμή, είναι δυνατόν να προκληθεί εκκένωση στην οποία το ρεύμα παίρνει τόσο μεγάλες τιμές που μπορεί να καταστρέψει το φωτοκύτταρο. Η οριακή αυτή τάση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη προκειμένου η λειτουργία του να βρίσκεται μέσα σε σωστά όρια. Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος τοποθέτησης της αντίστασης R σε σειρά στο κύκλωμα σαν ρυθμιστικός παράγοντας μιας ανεξέλεγκτης αύξησης του ρεύματος.

Μια άλλη κατηγορία ανιχνευτή φωτοεκπομπής είναι αυτή στην οποία γίνεται ενίσχυση του ασθενικού σε γενικές γραμμές σήματος που προέρχεται από τη φωτοκάθοδο. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. (Astroparticle, 2010)



Σχήμα 23 : Διάταξη φωτοπολλαπλασιαστή

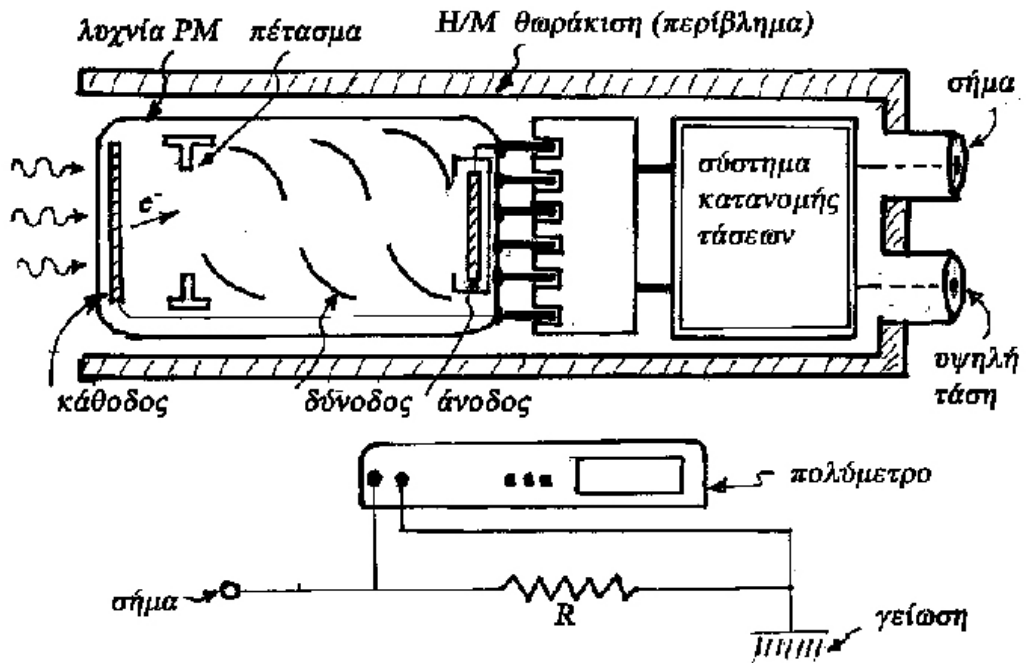
Βλέπουμε ότι η μοναδική άνοδος έχει συμπληρωθεί μ' ένα ορισμένο επιπλέον αριθμό ανόδων (ονομάζονται δύνοδοι) με κύριο χαρακτηριστικό ότι πολώνονται σε συνεχώς αυξανόμενο δυναμικό και έχουν ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έτσι ώστε τμήμα της μιας να "βλέπει" την άλλη. Μια τέτοια διάταξη προκαλεί την ενίσχυση του ρεύματος των ηλεκτρονίων που παράγονται στη φωτοκάθοδο. Πράγματι ένα ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από την τελευταία, με την επίδραση της διαφοράς δυναμικού αυτής και της πρώτης δυνόδου, αποκτά σημαντική ενέργεια ώστε κατά την

πρόπτωσης του στη δύνοδο να προκαλεί την εξαγωγή 4 με 5 δευτερογενών ηλεκτρονίων. Τα τελευταία ηλεκτρόνια, κατά την πρόπτωση τους στη δεύτερη δύνοδο εξαγουν με τον ίδιο τρόπο τριτογενή ηλεκτρόνια κ.ο.κ. Ο αριθμός των δυνόδων και η διαφορά δυναμικού μεταξύ τους είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αύξηση των ηλεκτρονίων της τάξης του 10^6 (σε σχέση με τη διάταξη μιας μοναδικής ανόδου). Το γεγονός συνεπάγεται μια πολύ σημαντική ενίσχυση ενός αρχικά πολύ ασθενικού σήματος. Η διάταξη αυτή έχει επικρατήσει να ονομάζεται φωτοπολλαπλασιαστής (photomultiplier tube – PTM ή PM), αν και στην πραγματικότητα αυτά που τελικά πολλαπλασιάζονται δεν είναι τα φωτόνια αλλά τα ηλεκτρόνια. Επειδή όσο αυξάνουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυνόδων τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια παράγονται, βλέπουμε ότι η διαφορά δυναμικού μεταξύ καθόδου και ανόδου θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλη. Πράγματι, ως μια τυπική τιμή μπορούμε να θεωρήσουμε τα 2,5 KV.

Το υλικό της καθόδου εναποτίθεται με εξάχνωση σε επίπεδη επιφάνεια και βρίσκεται στην είσοδο αερόκενου γυάλινου σωλήνα ο οποίος περιλαμβάνει το σύστημα των δυνόδων καθώς και την άνοδο. Η φωτοκάθοδος φωτίζεται μέσω του γυάλινου παραθύρου με το οποίο βρίσκεται σχεδόν σε επαφή, και τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται στο κενό από την άλλη μεριά του υμενίου της φωτοκαθόδου. Για να λειτουργεί ο φωτοπολλαπλασιαστής θα πρέπει να τροφοδοτηθούν οι δύνοδοι με συγκεκριμένες τάσεις. Αυτό γίνεται μέσω ενός κυκλώματος αντιστάσεων που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός ειδικού περιβλήματος στο οποίο προσαρμόζεται η λυχνία του PM μέσω καταλλήλων υποδοχών. Το περίβλημα του συστήματος λυχνίας PM – ηλεκτρικού κυκλώματος κατανομής τάσεων, λόγω της μεταλλικής του σύνθεσης, αποτελεί και μαγνητική θωράκιση για τον περιορισμό της διαφυγής των ηλεκτρονίων από τις προκαθορισμένες τους τροχιές μεταξύ των δυνόδων. Διαθέτει δύο

εξωτερικούς ακροδέκτες. Ο ένας συνδέεται με την άνοδο και αφορά το σήμα στην έξοδο του PM. Ο άλλος συνδέεται με κατάλληλο τροφοδοτικό υψηλής τάσης η οποία μέσω του ηλεκτρικού συστήματος, κατανέμεται στις αντιστάσεις μεταξύ των δυνόδων. Όπως γίνεται φανερό ο PM αποτελεί μια πηγή ρεύματος. Για να μετατρέψουμε το ρεύμα αυτό σε τάση, μεταξύ του ακροδέκτη της ανόδου (δηλαδή του σήματος) και του μεταλλικού περιβλήματος του PM (σαν γείωση) συνδέουμε μια αντίσταση ορισμένης τιμής. Στα άκρα αυτής της αντίστασης με τη βοήθεια ενός πολυμέτρου μετρούμε την πτώση τάσης λόγω της διέλευσης του ρεύματος του σήματος.

Η ενίσχυση του PM κατά τα γνωστά εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ των δυνόδων. Το γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα, πολύ μικρές μεταβολές της υψηλής τάσης τροφοδοσίας, να προκαλούν σημαντικές μεταβολές στο ρεύμα εξόδου (σήμα) χωρίς ουσιαστικά καμία μεταβολή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συνεπώς το τροφοδοτικό υψηλής τάσης θα πρέπει να είναι πολύ καλών προδιαγραφών έτσι ώστε οι διακυμάνσεις στην τάση τροφοδοσίας να είναι αμελητέες. Οι ανιχνευτές φωτοεκπομπής εκτός της γρήγορης τους χρονικής απόκρισης διακρίνονται και για τις πολύ χαμηλές στάθμες θορύβου. Για πάρα πολύ μικρές στάθμες φωτισμού, στην φωτοκάθοδο φθάνει πολύ μικρός αριθμός φωτονίων σε τυχαία χρονικά διαστήματα παράγοντας παλμούς ρεύματος. Για ν' ανιχνευτούν οι παλμοί αυτοί οπωσδήποτε απαιτούνται πολύ ευαίσθητα ηλεκτρονικά συστήματα. Ένα τέτοιο όργανο ονομάζεται μετρητής φωτονίων (photon counter). (Astroparticle, 2010)



Σχήμα 24 : Φωτοπολλαπλασιαστής

3.2.2.5 Διατάξεις Συζευγμένων Φορτίων (Charge Coupled Devices – CCD)

Όλα τα είδη των ανιχνευτών που ήδη περιγράψαμε θεωρούμε ότι εργάζονται ο καθένας σαν ανεξάρτητη μονάδα. Πολλές φορές όμως επιβάλλεται η ανάγκη χρησιμοποίησης ενός είδους από αυτούς σε γραμμική ή δύο διαστάσεων πολλαπλότητα. Αν για παράδειγμα θέλουμε ν' ανιχνεύσουμε ταυτόχρονα (και όχι από σημείο σε σημείο) ένα συνεχές φάσμα ακτινοβολιών (όπως π.χ. σ' ένα φασματογράφο), τότε στη θέση που τελικά σχηματίζεται η ανάλυση του φάσματος, μπορούμε να παρατάξουμε ένα μεγάλο αριθμό ομοίων ανιχνευτών με μια πυκνότητα που θα εξαρτάται από τις διαστάσεις τους και η οποία θα καθορίζει και το εύρος ζώνη διέλευσης $\Delta\lambda$ σε κάθε περιοχή ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος. Έστω επίσης ότι θέλουμε να καταγράψουμε την κατανομή ενός ειδώλου από περιοχή σε περιοχή πάνω σ' ένα επίπεδο απεικόνισης. Θα μπορούσαμε για το λόγο αυτό να παρατάξουμε σε δύο διαστάσεις, ένα μεγάλο αριθμό ομοίων ανιχνευτών που ο καθένας τους θα μας μετρούσε την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σ' εκείνη την περιοχή. Και για τις δύο περιπτώσεις που αναφέραμε προηγουμένως τα σήματα των ανιχνευτών (π.χ. τάση) προκύπτουν σε πραγματικό χρόνο (δηλαδή από στιγμή σε στιγμή μπορούν να μεταβληθούν), γεγονός το οποίο μας δίνει τη δυνατότητα να τα μεταφέρουμε, να τα επεξεργαστούμε και να τα αποθηκεύσουμε.

Οι προαναφερόμενες εφαρμογές με τη συνδυασμένη χρήση κοινών ανιχνευτών, ευσταθούν μεν θεωρητικά, στην πράξη όμως υπάρχει μια σοβαρή δυσκολία που αφορά κυρίως στον τρόπο σύνδεσης τους καθώς και τον τρόπο ενίσχυσης του σήματος που προκύπτει από τον καθένα ξεχωριστά. Ας υποθέσουμε ότι για τη σύνδεση του καθενός χρειαζόταν

μόνο ένας αγωγός και για την ενίσχυση του σήματος του ένας ενισχυτής (π.χ. ένας τελεστικός ενισχυτής). Τότε γίνεται φανερό, ότι για μια διδιάστατη κατανομή 10^3 ανιχνευτών, ο όγκος των καλωδίων και των ενισχυτικών κυκλωμάτων θα ήταν τόσο μεγάλος έτσι που η διάταξη δεν θα είχε πρακτικό ενδιαφέρον. Ο λόγος αυτός οδήγησε στην προσπάθεια να εφευρεθούν και να κατασκευαστούν συστήματα πολλαπλών ανιχνευτικών στοιχείων, όπου αφ' ενός μεν τα σήματα που θα προέκυπταν από τον καθένα θα μπορούσαν να μεταφερθούν, να μετρηθούν και να ανιχνευθούν μέσω κοινής οδού, αφ' ετέρου λόγω της εξάλειψης των περιπτώσεων εξαρτημάτων θ' αυξανόταν η ικανότητα ευαισθησίας δηλαδή ο λόγος της φωτοευαίσθητης επιφάνειας προς τη συνολική επιφάνεια απεικόνισης. Τα συστήματα αυτά αναφέρονται με τη γενική ονομασία διατάξεις μεταφοράς φορτίου (charge transfer devices).

Στην απλούστερη μορφή αποτελούνται από μια πολύ πυκνή διαδοχή (σε μια ή δύο διαστάσεις) πυκνωτών μετάλλου - μονωτή - ημιαγωγού (MIS) (Metal - Insulator - Semiconductor). Η περισσότερο σπουδαία σε εφαρμογές μορφή τους είναι οι πυκνωτές μετάλλου - οξειδίου - ημιαγωγού (MOS), όπου το μέταλλο είναι το Αλουμίνιο (Al), το οξείδιο, αυτό του SiO_2 (διοξειδίου του Πυριτίου) και ο ημιαγωγός το Πυριτίο (Si). Σ' ένα τέτοιο σύστημα μεταφοράς φορτίου, η πληροφορία μεταφέρεται μεταξύ χωρικών θέσεων (pixels) κατά "πακέτα" αρνητικού φορτίου (ηλεκτρονίων). Η θέση του φορτίου σε μια αλληλουχία πυκνωτών MOS, ελέγχεται ηλεκτροστατικά από στάθμες δυναμικού. Είναι δυνατόν όμως, κατόπιν εφαρμογής καταλλήλων σταθμών δυναμικού με συγκεκριμένη αλληλουχία φάσεων χρονικά, να μεταφέρουμε τα πακέτα των φορτίων κατά μήκος του ημιαγωγικού υποβάθρου μ' ένα πλήρως ελεγχόμενο τρόπο.

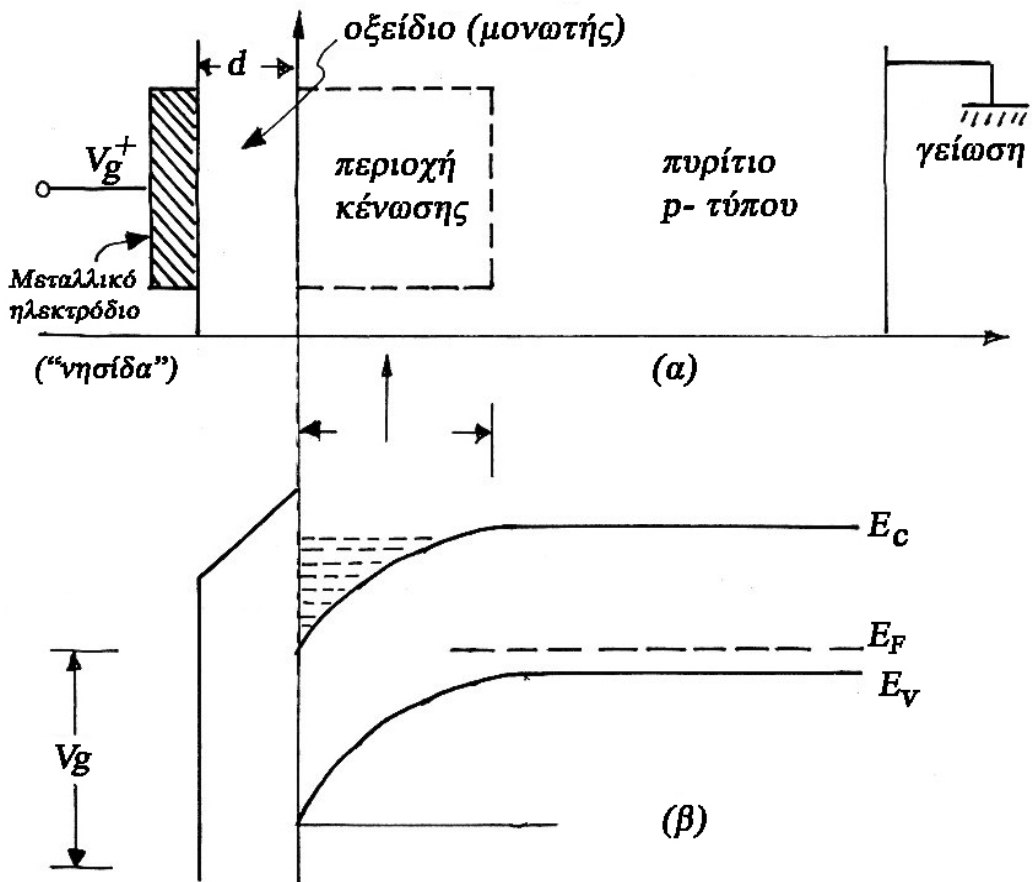
Η δομή ενός τέτοιου συστήματος πυκνωτή (MOS) φαίνεται στο

σχήμα 25α.

Το υπόβαθρο, όπως προαναφέραμε, αποτελείται από ημιαγωγικό πυρίτιο p -τύπου και είναι γειωμένο. Στην επιφάνειά του εναποτίθεται ένα λεπτό υμένιο μονωτικού υλικού από SiO_2 . Πάνω σ' αυτό το υλικό εξαχνώνονται οι μεταλλικές νησίδες από αλουμίνιο, στις οποίες εφαρμόζουμε θετικό δυναμικό, ελαττώνοντας μ' αυτόν τον τρόπο το επίπεδο των ενεργειακών σταθμών (των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους) του ημιαγωγού (σχήμα 25β) που βρίσκεται απέναντι από την κάθε μια νησίδα. Τότε, για τις περιοχές του ημιαγωγού κάτω από τις μεταλλικές νησίδες, οι θετικοί φορείς (οπές) απωθούνται και διαφεύγουν μέσω της γείωσης, αφήνοντας πίσω τους περιοχές κένωσης σε θετικό δυναμικό.

α) Αποθήκευση φορτίου (εγγραφή πληροφοριών)

Κατά τη διάρκεια της έκθεσης με φως ενός τέτοιου συστήματος, αυτό διαπερνά το (ημιδιαφανές) μέταλλο των νησίδων και το διαφανές υμένιο SiO_2 και παράγει μετά την απορρόφησή του από τον p τύπου ημιαγωγό (εφόσον $h^*v > E_g$), ζεύγη οπών – ηλεκτρονίων στην περιοχή κένωσης που βρίσκεται κατά τα γνωστά σε θετικό δυναμικό και άρα υπό την επίδραση πεδίου.



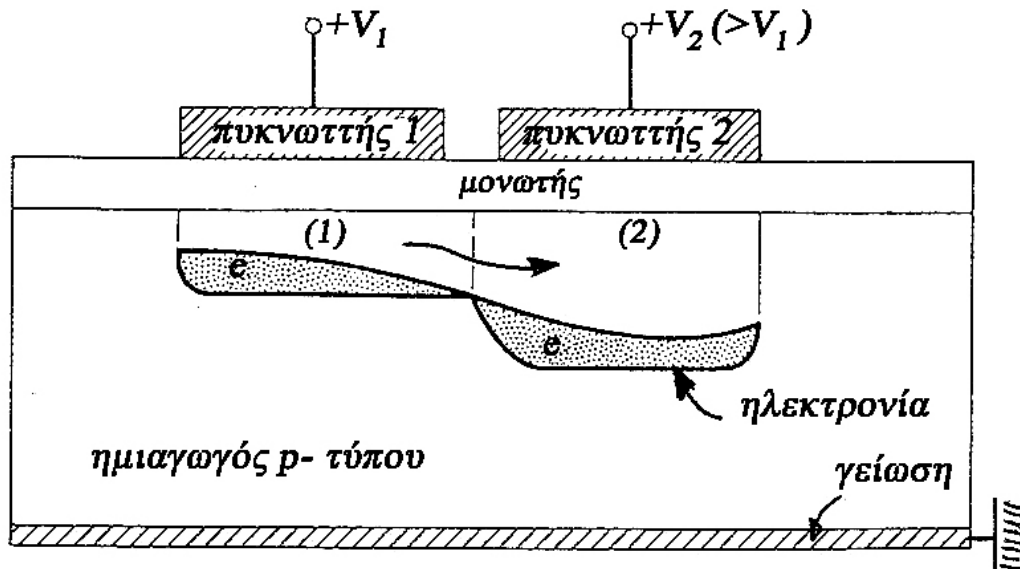
Σχήμα 25

Τότε οι οπές απωθούνται προς τη γείωση ενώ τα ηλεκτρόνια έλκονται προς το μεταλλικό ηλεκτρόδιο χωρίς όμως να μπορούν να το πλησιάσουν επειδή μεσολαβεί το μονωτικό υλικό. Τα τελευταία, συσσωρεύονται ακριβώς από κάτω του. Οπές και ηλεκτρόνια που δημιουργούνται από ακτινοβολία που απορροφάται στην περιοχή του ημιαγωγού, επανασυνδέονται στο κάτω μέρος του ενδιαμέσου μεταξύ των μεταλλικών "νησίδων". Η ποσότητα των συγκεντρωμένων ηλεκτρονίων, είναι ανάλογη με το χρόνο έκθεσης και την ένταση της ακτινοβολίας. Η

αποθήκευση φορτίου μπορεί να γίνεται (με πολύ μικρή απώλεια) για μεγάλα χρονικά διαστήματα (της τάξης των λίγων ωρών), επιτρέποντας μ' αυτό τον τρόπο την καταχώρηση πληροφοριών από πολύ ασθενικές πηγές όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην αστρονομία και τη φωτογράφιση πολύ χαμηλής έντασης ουρανίων αντικειμένων.

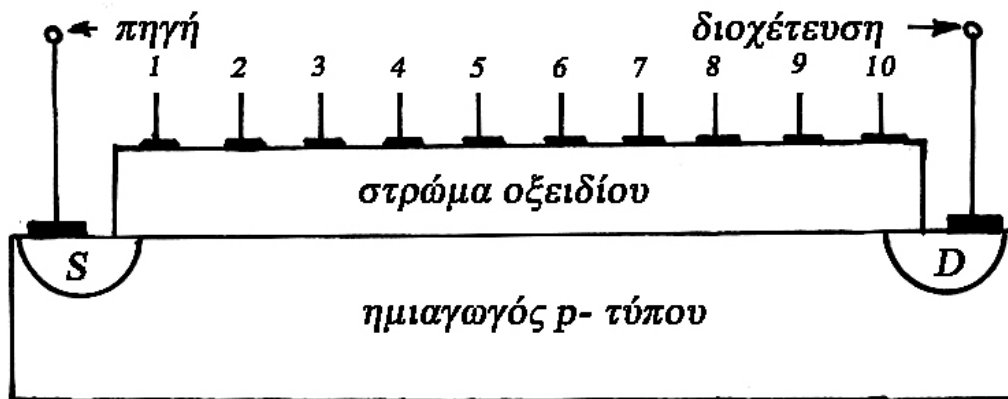
β) Μεταφορά φορτίου (ανάκτηση πληροφοριών)

Αν μια σειρά από πυκνωτές MOS πολωθούν με την εφαρμογή μιας κατάλληλης αλληλουχίας στιγμιαίων παλμών τάσης, τότε τα “πακέτα” των ηλεκτρονίων μπορούν να μεταφερθούν μ' ένα προκαθορισμένο τρόπο δια μέσου του ημιαγωγικού υποβάθρου. Η μεταφορά των “πακέτων” ηλεκτρονίων γίνεται από ένα πηγάδι δυναμικού στο επόμενο του (από τη θέση κάτω από μια νησίδα μετάλλου στην επόμενη της). Τα πηγάδια δυναμικού αναπτύσσονται ακριβώς στις περιοχές κένωσης των πυκνωτών MOS και η δυναμική τους ενέργεια (το “βάθος” τους) καθορίζεται αποκλειστικά από το εφαρμοζόμενο δυναμικό στις αντίστοιχες “νησίδες” καθώς και από το πάχος του οξειδίου που βρίσκεται κάτω από αυτές. Η ποσότητα του φορτίου των “πακέτων” των ηλεκτρονίων, εξαρτάται από την τιμή της ροής ακτινοβολίας που τα δημιούργησε καθώς και από το χρόνο έκθεσης.



Σχήμα 26

Προκειμένου λοιπόν να υπάρξει μεταφορά φορτίου από μια χωρική θέση στην επόμενη της θα πρέπει οι τιμές των σταθμών δυναμικού των φρεάτων να μεταβάλλονται κατάλληλα από θέση σε θέση. Στο Σχήμα 26 βλέπουμε ένα σύστημα που αποτελείται μόνο από δύο πυκνωτές MOS. Αν προς στιγμή το δυναμικό που εφαρμόζουμε στη νησίδα (2) ($+V_2$) είναι μεγαλύτερο αυτού που εφαρμόζεται στη νησίδα (1) ($+V_1$), δηλ. $V_1 < V_2$, τότε η ποσότητα των ηλεκτρονίων που υπάρχει στη θέση (1) θα μετακινηθεί προς τη θέση (2) (τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από ένα χαμηλότερο σ' ένα υψηλότερο δυναμικό, δηλαδή έλκονται από την (1) στην (2) περιοχή). Για να δούμε πώς εξελίσσεται το φαινόμενο της μεταφοράς φορτίου σε μια διάταξη με μεγαλύτερο αριθμό πυκνωτών MOS ας θεωρήσουμε (Σχήμα 27) ότι αποτελείται π.χ. από μια σειρά δέκα τον αριθμό "νησίδων".



Σχήμα 27

Στην αρχή και στο τέλος της βάσης του ημιαγωγού p - τύπου συνδέονται δύο ηλεκτρόδια η πηγή (S) και η διοχέτευση (D). Το σύστημα αυτό είναι γνωστό σαν *τρανζίστορ πεδίου (MOSFET)* όπου το ακρωνύμιο FET σημαίνει (Field Effect Transistor). Ας υποθέσουμε τώρα ότι στην πηγή (S) εισάγεται ένα φορτίο και θέλουμε να μεταφερθεί με κάποιο τρόπο προς το ηλεκτρόδιο της διοχέτευσης (D). Αυτό γίνεται αν πολώσουμε με κατάλληλο θετικό δυναμικό ($V_1 < V_2 < V_3 < \dots < V_{10}$) και με μια χρονική αλληλουχία τις 10 “νησίδες”. Μετά την έξοδο κάθε “πακέτου” από το ηλεκτρόδιο εξόδου D , μπορούμε με κατάλληλο σύστημα ενισχυτή να ενισχύσουμε το εκάστοτε σήμα. Επίσης τα υπάρχοντα ηλεκτρονικά συστήματα οδήγησης (χρονισμού) είναι δυνατόν να “γνωρίζουν” από ποια ακριβώς θέση της σειράς των πυκνωτών προήλθε το συγκεκριμένο σήμα (“πακέτο” φορτίου) προκειμένου π.χ. ν’ αποθηκευθεί σ’ ένα άλλο μέσον, να το επεξεργαστούμε ή να μεταφερθεί σε άλλη περιοχή.

3.2.2.6 Φωτοανιχνευτές εκτός ορατού φάσματος

3.2.2.6.1 Φωτοανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR)

Η υπέρυθρη ακτινοβολία ή οι υπέρυθρες ακτίνες είναι τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στο φάσμα ακτινοβολίας είναι προέκταση της κόκκινης ορατής ακτινοβολίας, απ' όπου προέρχεται και το όνομα "υπέρυθρες". Το μήκος κύματός τους κυμαίνεται από το 1 mm έως τα 700 nm, όπου ξεκινά το ορατό φάσμα. Συνήθως εκπέμπονται από όλα τα σώματα που έχουν κάποια θερμοκρασία.

Οι ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι ειδικές συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στην αστρονομία για την ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα ουράνια σώματα .

Οι πρώτοι ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν στις αστρονομικές παρατηρήσεις ήταν κρύσταλλοι θειούχου μολύβδου, γρήγορα όμως παραχώρησαν τη θέση τους σε ημιαγωγούς.

Οι τελευταίοι είναι πιο αποτελεσματικοί, επειδή η υπέρυθρη ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά τους προκαλεί την απελευθέρωση των ελαφρά δεσμευμένων ηλεκτρονίων που περιέχουν, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικών σημάτων που καταγράφονται εύκολα. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ημιαγωγοί γερμανίου, εμπλουτισμένου με χαλκό ή υδράργυρο και, από τα μέσα της δεκαετίας του 1970, ανιχνευτές γερμανίου-γαλλίου.

Οι ανιχνευτές αυτοί, αν και μεγάλης ευαισθησίας, ήταν σε θέση να καταγράψουν μία πολύ μικρή μόνο χωρικά περιοχή του ουράνιου θόλου.

Έτσι οι αστρονόμοι έπρεπε να στρέψουν ένα τηλεσκόπιο, εφοδιασμένο με ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας, διαδοχικά σε χιλιάδες μικρότερες περιοχές του ουρανού, να τις φωτογραφίσουν ξεχωριστά και σ' ένα επόμενο στάδιο να συνθέσουν τις διάφορες φωτογραφίες σε μία ενιαία απεικόνιση.

Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε το 1988 με την ανάπτυξη μιας νέας γενιάς ανιχνευτών υπέρυθρης ακτινοβολίας. Πρόκειται για συστοιχίες ημιαγωγών, για ένα σύνολο δηλαδή από πολλούς ανιχνευτές, που συνδυάζονται πάνω σε μία κατάλληλη πλακέτα. Καθένας από τους ανιχνευτές αυτούς παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα, όταν προσπέσει επάνω του υπέρυθρη ακτινοβολία. Στη συνέχεια, το σύνολο των ηλεκτρικών σημάτων διαβιβάζεται σ' έναν υπολογιστή, ο οποίος αναλαμβάνει την επεξεργασία τους και τη μετατροπή της ηλεκτρονικής εικόνας σε οπτική.

Μια τέτοια συστοιχία χρησιμοποιείται στο Αστεροσκοπείο Μάουνα Κέα της Χαβάης. Αποτελείται από 3.596 απλούς ανιχνευτές και δίνει συνεχώς εκπληκτικής λεπτομέρειας υπέρυθρες απεικονίσεις του ουρανού με απίστευτη ταχύτητα και ακρίβεια. (*Ηλεκτρονική Εγκυκλοπαίδεια Επιστήμη & Ζωή*)

Άλλες εφαρμογές των ανιχνευτών υπέρυθρης ακτινοβολίας βρίσκουμε στις ηλεκτρικές συσκευές (τηλεόραση, βίντεο, στερεοφωνικά, DVD players, αποκωδικοποιητές) καθώς και στα τηλεχειριστήρια αυτών των συσκευών. Μπορούμε ακόμη να μετρήσουμε τη συγκέντρωση CO και CO₂ στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον οι ανιχνευτές χρησιμοποιούνται σε συστήματα συναγερμού για εντοπισμό της κίνησης. Επίσης μια ακόμη εφαρμογή βρίσκουμε στα CD-ROM και DVD-ROM.

Στους ανιχνευτές υπέρυθρου ανήκουν ακόμη τα βολόμετρα και οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές.

Τα βολόμετρα (ή αισθητήρες θερμοκρασίας):

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού με την θερμοκρασία του, λόγω απορρόφησης της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για αυξημένη απόκριση του αισθητήρα, το υλικό του πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή απορροφητικότητα της ακτινοβολίας, σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων και να έχει μικρή θερμοχωρητικότητα.

Κατασκευάζονται από ποικιλία υλικών, τόσο σε στοιχειακή (π.χ. Si, Ge, Bi, Au), όσο και σε σύνθετη μορφή (π.χ. Bi σε συνδυασμό με ίνες από νάιλον, Ge με προσμίξεις και ίνες νάιλον). Μια πολύ σημαντική κατηγορία βολομέτρων είναι τα μεταλλικά (π.χ. λευκοχρύσου ή πλατίνας Pt) και τα θερμίστορ (ημιαγωγοί).

Θερμίστορ

Είναι ένα βολόμετρο, του οποίου το βασικό υλικό είναι μεταλλικά οξειδία (οξειδία μαγνησίου, νικελίου, κοβαλτίου, χαλκού, σιδήρου και τιτανίου). Η χρήση τους περιορίζεται σε θερμοκρασίες κάτω των 300 °C, επειδή πάνω από τη θερμοκρασία αυτή μειώνεται η σταθερότητα της δομής τους. Μπορούν να κατασκευαστούν με διάφορες μορφές (με τη μορφή δίσκου, λεπτής φέτας, ράβδου) και σε μικρό μέγεθος, για καλή απόκριση στις μετρήσεις. Χαρακτηρίζονται από υψηλή διακριτική ικανότητα και δέκα (10) φορές πιο μεγάλη ευαισθησία από τα μεταλλικά βολόμετρα.

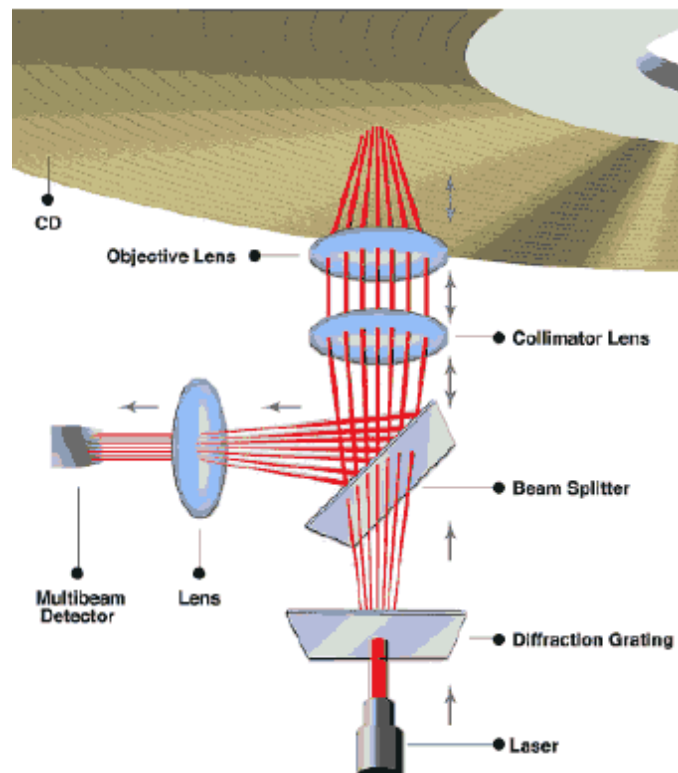
Μια ιδιαίτερη κατηγορία θερμικών ανιχνευτών στηρίζεται στο λεγόμενο **πυροηλεκτρικό φαινόμενο (Pyroelectric effect)**. Στην περίπτωση αυτή, διάφορα κρυσταλλικά υλικά έχουν την ιδιότητα να αναπτύσσουν ηλεκτρική πόλωση όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους. Αντίστροφα, αν ένας κρύσταλλος υφίσταται αυθόρμητη πόλωση

(ανεξάρτητη της δράσης ηλεκτρικού πεδίου), τότε μια μεταβολή στη θερμοκρασία του θα μπορούσε να την αναιρέσει. Στην πράξη τα φορτία πόλωσης από τη στιγμή που θ' αναπτυχθούν δεν παραμένουν, αλλά λόγω της ατελούς μόνωσης έχουμε σταδιακή εξουδετέρωσή τους. Αν προς στιγμή τοποθετήσουμε δύο ηλεκτρικές επαφές σε συγκεκριμένα σημεία του κρυστάλλου, τότε μέρος του φορτίου μπορεί να περάσει μέσω του κυκλώματος.

Επειδή το φορτίο αυτό δεν διακινείται συνεχώς αλλά μέχρις ότου αποκατασταθεί η νέα θερμοκρασία, το υλικό σαν ανιχνευτής πλέον, μπορεί ν' ανιχνεύσει μόνο μεταβολές της προσπίπτουσας ροής ακτινοβολίας. Μία δηλαδή μεταβαλλόμενη χρονικά ροή ακτινοβολίας θα προκαλέσει ένα μεταβαλλόμενο ρεύμα μέσω του κυκλώματος μέτρησης, που το πλάτος του θα είναι ανάλογο με το πλάτος της μεταβαλλόμενης ροής. Τυπικά πυροηλεκτρικά κρυσταλλικά υλικά είναι τα: Στρόντιο-Βάριο-Νιόβιο, Λίθιο-Ταντάλιο, το Φθοριούχο πολυβινίλιο και η Θειούχος τριγλυκερίνη (TGS).

Οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές χαρακτηρίζονται από δύο σπουδαίες ιδιότητες: α) Επειδή είναι θερμικοί ανιχνευτές (μετατροπή της H/M ακτινοβολίας ανεξαρτήτου μήκους κύματος σε θερμότητα) είναι δυνατόν με την πρόσθεση κατάλληλων επιστρώσεων πάνω στις επιφάνειές τους ν' αυξηθεί η απόκρισή τους (αύξηση φασματικών ορίων απόκρισης), β) Είναι δυνατόν αν ελαττώσουμε δραστικά το μέγεθός τους, η απόκριση να είναι ταχύτερη σε μια γρήγορη εξωτερική μεταβολή της ροής ακτινοβολίας, λόγω της ταχύτατα αναπτυσσόμενης ηλεκτρικής πόλωσης των μορίων του υλικού κατά την απορρόφησή της ακτινοβολίας. Η τάξη απόκρισης μπορεί να φθάσει τα GHz. Όμως, η χρονική απόκριση ελαττώνεται δραστικά όταν θέλοντας να αυξήσουμε τη φασματική απόκριση του ανιχνευτή επικαλύψουμε την επιφάνειά του με τα προαναφερόμενα απορροφητικά υμένα, αυξάνοντας έτσι τη μάζα του. Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά

των πυροηλεκτρικών ανιχνευτών, τους καθιστά άριστους ανιχνευτές για τη μέτρηση παλμικών ακτινοβολιών καθώς και συνεχών ακτινοβολιών διαμορφούμενων κατά ένταση.



Σχήμα 28: Λειτουργία ενός CD-ROM όπου φαίνεται η χρήση αισθητήρα υπερώθρου

3.2.2.6.2 Φωτοανιχνευτές υπεριώδους ακτινοβολίας

3.2.2.6.2.1 Γενικά για την υπεριώδη ακτινοβολία

Υπεριώδης ακτινοβολία ονομάζεται η περιοχή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, της οποίας το μήκος κύματος κυμαίνεται περίπου μεταξύ 10 και 400 nm. Καλύπτει την περιοχή συχνοτήτων από $8 \cdot 10^{12} \text{Hz}$ - $3 \cdot 10^{17} \text{Hz}$ και η ενέργεια των φωτονίων της είναι μεταξύ 3eV - 2000eV. Εκπέμπεται από εξαιρετικά θερμά σώματα όπως τα άστρα (το κυριότερο είναι ο ήλιος). Είναι ακτινοβολία υψηλής ενέργειας και αρκετά επιβλαβής για τους ζωντανούς ιστούς.

Υπάρχουν τρία είδη υπεριώδους ακτινοβολίας:

- UV-A: Αυτή η ακτινοβολία κυμαίνεται μεταξύ 315 και 400 nm. Είναι το πιο ακίνδυνο είδος. Αντιπροσωπεύει το 6,3 % της συνολικής ηλιακής ενέργειας και το 76 % της συνολικής υπεριώδους. Το στρώμα του όζοντος είναι σχεδόν διαφανές για την UVA και έτσι το μεγαλύτερο μέρος φτάνει στην επιφάνεια της γης. Είναι ακίνδυνη για τους ζωντανούς οργανισμούς.
- UV-B: Αυτή η ακτινοβολία κυμαίνεται μεταξύ 280 και 315 nm. Περιέχεται σε ποσοστό 1,5 % στη συνολική ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή προκαλεί το μαύρισμα, αλλά μπορεί να γίνει επικίνδυνη.
- UV-C: Αυτή η ακτινοβολία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 280 nm. Αποτελεί μόλις το 0,5 % της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας και το 6 % της υπεριώδους. Είναι το πιο επικίνδυνο είδος της υπεριώδους ακτινοβολίας, καθώς προκαλεί μεταλλάξεις στους ζωντανούς

οργανισμούς.

3.2.2.6.2.2 Φωτοανιχνευτές υπεριώδους

Η λειτουργία των ανιχνευτών υπεριώδους ακτινοβολίας βασίζεται στην ικανότητά τους να ξεχωρίζουν τις διάφορες ακτινοβολίες από το μήκος κύματός τους.

Αυτό συμβαίνει αν παρεμβάλουμε έναν μονοχρωμάτορα. Ο μονοχρωμάτορας αποτελεί το μέσο ανάλυσης ή διασποράς της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Αποτελείται από καθρέπτες και φράγματα περίθλασης, τα οποία είναι οπτικά στοιχεία που διαχωρίζουν το σκεδαζόμενο φως σε μικρές παράλληλες δέσμες διαφορετικής ενέργειας.

Μεταξύ των φραγμάτων περίθλασης και των καθρεπτών του μονοχρωμάτορα παρεμβάλλονται σχισμές, το μέγεθος των οποίων είναι μεταβλητό, καθορίζοντας έτσι την αναλυτική (διακριτική) ικανότητα του οργάνου.

Αν μετά τις σχισμές του μονοχρωμάτορα τοποθετήσουμε ένα φωτοανιχνευτή, μπορούμε να μετρήσουμε την κατανομή του φωτός μιας φωτεινής πηγής ανά τα διάφορα μήκη κύματος.

Συγκεκριμένα η ανίχνευση της υπεριώδους ακτινοβολίας πραγματοποιείται με φωτοανιχνευτές κατασκευασμένους από υλικά όπως Si, SiC, διαμάντι, ZnS, ZnO, ή ZnSe, τα οποία είναι ευαίσθητα σε μήκη κύματος μεταξύ 10 και 400 nm και αναισθητα σε όλο το υπόλοιπο φάσμα της ακτινοβολίας.

Οι φωτοανιχνευτές υπεριώδους ακτινοβολίας αποκαλύπτουν άμεσα

απώλειες (όπως μικρές διαρροές, απώλειες σε πολλά σημεία ταυτόχρονα) εκεί που οι συμβατικοί ανιχνευτές σταματούν. Για παράδειγμα, το σύστημα DTLink WDS είναι ο συνδυασμός πυρανιχνευτών για φλόγα και ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα μέσω της εκπεμπόμενης υπεριώδους ακτινοβολίας και του δικτύου αισθητήρων υπερελάχιστης κατανάλωσης DTLink Sensor Network. Ο τύπος υπεριώδους ακτινοβολίας από φλόγα απουσιάζει από το ηλιακό φως.

3.2.3 Βαθμονόμηση Φωτοανιχνευτών

Η διαδικασία αυτή αναφέρεται στην ακριβή υπολογισμό της αποκρισιμότητας R ενός ανιχνευτή σαν συνάρτηση του μήκους κύματος για την φασματική περιοχή που έχει ικανοποιητική ευαισθησία. Η βαθμονόμηση συνήθως δεν αφορά αποκλειστικά αυτόν καθ' αυτόν τον ανιχνευτή αλλά συνήθως και τις περιπτώσεις όπου ο ίδιος συνοδεύεται από διάφορα οπτικά εξαρτήματα (για παράδειγμα φίλτρα), καθώς και από τα ηλεκτρονικά συστήματα ενίσχυσης των σημάτων (δηλαδή σαν όργανο πλέον μέτρησης). Για τη βαθμονόμηση, γενικά ο ανιχνευτής φωτίζεται από μια πηγή (συνήθως πρότυπη) γνωστής φασματικής κατανομής και γίνεται μέτρηση του σήματος εξόδου. Οι αποκρισιμότητες των ανιχνευτών δεν είναι σταθερές σε συνάρτηση με το μήκος κύματος. Ακόμα και για τους θερμικούς ανιχνευτές, για τους οποίους θεωρείται αρκετά σταθερή (επίπεδη απόκριση) σε μεγάλες φασματικές περιοχές, παρατηρούνται ορισμένες διακυμάνσεις. Παρακάτω αναφέρονται δύο γνωστές μέθοδοι βαθμονόμησης.

Στην πρώτη περίπτωση η βαθμονόμηση γίνεται με τη μέτρηση της

αποκρισιμότητας από μήκος κύματος σε μήκος κύματος με τη βοήθεια μιας τυχαίας πηγής, της οποίας η ακτινοβολία αναλύεται με τη βοήθεια ενός μονοχρωμάτορα. Για τη διαδικασία αυτή, η ροή ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματος στην έξοδο του μονοχρωμάτορα θα πρέπει να είναι ακριβώς γνωστή, οπότε η αποκρισιμότητα θα είναι ο λόγος του σήματος εξόδου προς την εκάστοτε ισχύ εισόδου στον ανιχνευτή. Η δυσκολία για την προαναφερόμενη μέθοδο, είναι ο προσδιορισμός της εξόδου του μονοχρωμάτορα. Θα πρέπει η φωτίζουσα πηγή (π.χ. μια λυχνία αλογόνου) να τροφοδοτείται με άκρως σταθεροποιημένο ρεύμα, το οποίο περνά μέσα από το νήμα της, έτσι ώστε η ακτινοβολία που προσπίπτει στον μονοχρωμάτορα να είναι σταθερή.

Επίσης θα πρέπει να είναι απολύτως γνωστή και η φασματική διαπερατότητα του μονοχρωμάτορα για κάθε μήκος κύματος (για παράδειγμα εξ' αιτίας των απορροφήσεων και ανακλάσεων από κάτοπτρα, πρίσματα κ.λ.π.), γεγονός το οποίο είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί. Αντί βέβαια για μονοχρωμάτορα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια σειρά φασματικών φίλτρων (στενής ζώνης διέλευσης $\Delta\lambda$) γνωστής διαπερατότητας. Η μέθοδος στην περίπτωση αυτή είναι αξιόπιστη, αλλά η βαθμονόμηση γίνεται μόνο για συγκεκριμένα μήκη κύματος.

Στη δεύτερη περίπτωση δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε επακριβώς την ροή ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματος από την έξοδο του μονοχρωμάτορα. Η βαθμονόμηση του άγνωστου ανιχνευτή γίνεται με τη βοήθεια ενός ανιχνευτή του οποίου η αποκρισιμότητα είναι ήδη γνωστή (ανιχνευτής αναφοράς). Τότε, σαρώνοντας όλα τα μήκη κύματος στο μονοχρωμάτορα, μετρούμε τα σήματα στην έξοδο για τον άγνωστο και το γνωστό ανιχνευτή. Επειδή η απόλυτη φασματική αποκρισιμότητα του ανιχνευτή αναφοράς είναι γνωστή, η αποκρισιμότητα του αγνώστου

βρίσκεται με τη βοήθεια του λόγου των εξόδων τους. Ο περισσότερο γνωστός ανιχνευτής αναφοράς είναι η θερμοπύλη που ανήκει στους θερμικούς ανιχνευτές. (Daniela Dragoman - Mircea Dragoman, 1999)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

4.1 Εφαρμογές στον Ερευνητικό Τομέα

4.1.1 Ανιχνευτές Σωματιδίων

Οι φωτοανιχνευτικές διατάξεις βρίσκουν σπουδαία εφαρμογή σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα στον τομέα της αστρονομίας για τα οποία απαιτείται η χρήση ανιχνευτών. Σχεδόν όλα όσα γνωρίζουμε για το σύμπαν προέρχονται από παρατηρήσεις φωτονίων. Πρόκειται για φωτόνια κάθε μήκους κύματος, από τα ραδιοκύματα μέχρι τις ακτίνες Χ και γ. Λαμβάνουμε επίσης πληροφορίες για γεγονότα πέρα από το ηλιακό μας σύστημα, παρατηρώντας τις κοσμικές ακτίνες οι οποίες αποτελούνται κυρίως από ατομικούς πυρήνες ή από μεμονωμένα πρωτόνια. Τα σωματίδια όμως αυτά δεν μας δείχνουν τις πηγές που τα εξέπεμψαν γιατί κατά την πορεία τους μέσα στον γαλαξία μας δέχονται την επίδραση των μαγνητικών πεδίων του γαλαξία και εκτρέπονται από την αρχική τους πορεία.

Για μια παρατήρηση με οξεία εστίαση βαθιά μέσα στο σύμπαν, θα χρειαζόταν ένα τηλεσκόπιο που να μπορεί να ανιχνεύει κάποιο είδος σωματιδίων που θα μένουν ανεπηρέαστα καθώς θα περνούν από περιοχές με αέρια, σκόνη και μαγνητικά πεδία. Ένα τέτοιο υποψήφιο είδος σωματιδίων είναι τα νετρίνα. Τα νετρίνα αποτελούν μεγάλο μέρος του συνολικού αριθμού των στοιχειωδών σωματιδίων του σύμπαντος και αλληλεπιδρούν πολύ ασθενικά με την υπόλοιπη ύλη. Παραμένουν λοιπόν

ανεπηρέαστα κατά την πορεία τους από τις πηγές τους μέχρι τη Γη, ενώ ταξιδεύουν με ταχύτητα πολύ κοντά σ' αυτή του φωτός. Ένα νετρίνο χαμηλής ενέργειας θα περνούσε έναν τοίχο από μολύβι πάχους 50 ετών φωτός.

Επίσης οι κοσμικές ακτίνες παράγουν πολλά μόνια (σωματίδια κινούμενα με ταχύτητες που πλησιάζουν αυτές του φωτός), τα οποία διεισδύουν βαθιά μέσα στη Γη, αλλά φυσικά με διαρκώς μειούμενο αριθμό όσο αυξάνει το βάθος. Έτσι λοιπόν οι πρώτες απόπειρες για αστρονομικές μελέτες νετρίνων με υψηλές ενέργειες ξεκίνησε υποβρύχια και κάτω από πάγους. Το μεγαλύτερο πρόγραμμα είχε τα αρχικά DUMAND και καταργήθηκε το 1995, γιατί προχωρούσε αρκετά αργά ενώ συνάντησε και δυσκολίες χρηματοδότησης. Όσο διήρκεσε όμως, κατάφερε να αναπτύξει πρωτοπόρες τεχνικές, να μελετήσει το υπόβαθρο των μετρήσεων, να διερευνήσει το σχεδιασμό ανιχνευτών και ίσως το σπουδαιότερο να προκαλέσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για την αστροφυσική των νετρίνων.

Ένα άλλο μακροχρόνιο πρόγραμμα έλαβε χώρα στη λίμνη Βαϊκάλη, η οποία είναι η μεγαλύτερη και βαθύτερη λίμνη του κόσμου και βρίσκεται στη Σιβηρία. Η εγκατάσταση εκεί αποτελείται από τεράστιους ανιχνευτές φωτονίων (διαμέτρου 0,4 m) που κατέβηκαν σε βάθος κάτω από τους χειμερινούς πάγους με τη βοήθεια καλωδίων και συνδέονται με την ακτή πάλι με καλώδια. Το πείραμα στη Βαϊκάλη έχει δώσει μέτρια φυσικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν ανίχνευση ατμοσφαιρικών νετρίνων, απέχει όμως αρκετά από το να αξιοποιηθεί για αστρονομία νετρίνων, γιατί καλύπτει επιφάνεια μόνο λίγων εκατοντάδων τετραγωνικών μέτρων.

Δύο άλλα πειράματα παρόμοια με το DUMAND βρίσκονται υπό εξέλιξη στη Μεσόγειο. Το πιο ανεπτυγμένο από αυτά έχει το όνομα

NESTOR και βρίσκεται υποθαλάσσια, στο πέλαγος ανοιχτά της Πύλου.

Ένα άλλο με το όνομα ANTARES βρίσκεται ανοιχτά της Μασσαλίας στη Γαλλία και επίσης ένα άλλο πρόγραμμα συζητείται για να εγκατασταθεί στα ανοιχτά της Νότιας Ιταλίας. Τα προγράμματα αυτά διαφέρουν στον τρόπο υποστήριξης των φωτοανιχνευτών και στη γεωμετρία τοποθέτησής τους, αλλά βασικά όλα χρησιμοποιούν καλώδια που φέρουν τους φωτοανιχνευτές και είναι ποντισμένα με άγκυρες στο βυθό της θάλασσας. Οι φωτοανιχνευτές προστατεύονται μέσα σε γυάλινα σφαιρικά περιβλήματα που αντέχουν σε μεγάλες πιέσεις. (Sulak L. R., 2003)

Για τα προγράμματα στην Ελλάδα και τη Γαλλία έχουν σχεδιαστεί πρωτότυποι ανιχνευτές για την υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτοί θα έχουν ενεργό επιφάνεια για συλλογή μιονίων (τα μίονια, αντίθετα από τα ηλεκτρόνια κινούνται για μεγάλες αποστάσεις μέσα στη Γη πριν να ακινητοποιηθούν. Τα φορτισμένα αυτά σωματίδια παράγουν ακτινοβολία Τσερένκοφ, δηλαδή ένα βραχύβιο παλμό φωτός μέσα σε καθαρό νερό ή πάγο, ανιχνεύσιμο από απόσταση δεκάδων μέτρων με φωτοπολλαπλασιαστές. Ο ανιχνευτής θα μπορεί να συλλέξει τα μίονια από μια περιοχή του χώρου την οποία κατοπτρεύει, και η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη από την περιοχή που καταλαμβάνει ο ίδιος ο ανιχνευτής) της τάξης των 20 με 50 χιλιάδων τετραγωνικών μέτρων. Η επιφάνεια αυτή είναι αρκετά υπολογίσιμη αν συγκριθεί με τα μεγαλύτερα υπόγεια όργανα που υπάρχουν και είναι της τάξης των 1000 τετραγωνικών μέτρων (να πούμε βέβαια πως η απαιτούμενη επιφάνεια για την επίτευξη ουσιαστικών αστρονομικών μετρήσεων είναι της τάξης του 1 εκατομμυρίου τετραγωνικών μέτρων). Τα βάθη των ωκεανών είναι εξαιρετικά καθαρά και τα όργανα μέτρησης μπορούν να απέχουν λίγες δεκάδες μέτρα το ένα από το άλλο για να ανιχνεύουν περισσότερα μίονια που θα περνούν ανάμεσά τους. Μια δέσμη κατακόρυφων λωρίδων από

τέτοιους ανιχνευτές μπορεί να καλύψει ένα ολόκληρο κυβικό χιλιόμετρο.

Φυσικά είναι πιο δύσκολο να βάλουμε αυτούς τους ανιχνευτές σε τέτοια βάθη και κοστίζει περισσότερο, αλλά το ζήτημα είναι ότι τέτοια προγράμματα είναι μέσα στα όρια των σημερινών τεχνικών δυνατοτήτων μας και το κόστος τους είναι συγκρίσιμο με το κόστος άλλων επιστημονικών προγραμμάτων.

Ένας διαφορετικός τύπος τηλεσκοπίου νετρίνων βρίσκεται στο Νότιο Πόλο, στους πάγους, το πρόγραμμα AMANDA. Έχει αποδειχτεί ότι ο πάγος κάτω από το βάθος του 1,4 km είναι πολύ καθαρός και ελεύθερος από φυσαλίδες, αν και η σκέδαση του φωτός αποτελεί κάποιο πρόβλημα. Οι πειραματικοί έχουν επεξεργαστεί μια μέθοδο για ν' ανοίξουν τρύπες στον πάγο βάθους 2 km, μέσα στις οποίες κατεβάζουν τους φωτοπολλαπλασιαστές. Τα όργανα παγώνουν μετά από παραμονή μιας μέρας στο βάθος αυτό, αλλά στην επιφάνεια φτάνουν καλώδια για το χειρισμό τους. Έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για περίπλοκα ηλεκτρονικά που να χρειάζεται να κατεβούν στο βάθος αυτό. Τοπολογικά οι συστοιχίες των ανιχνευτών μοιάζουν μάλλον με αυτές που ποντίστηκαν υποβρύχια αλλά ανεστραμμένες. Στον έλεγχο καλής λειτουργίας της διάταξης, έχουν ήδη καταγραφεί νετρίνα που κινούνται προς τα επάνω.

Το Διαστημικό Τηλεσκόπιο ΧΑΜΠΛ (HUBBLE)

Το μεγαλύτερο και τελειότερο οπτικό τροχιακό αστεροσκοπείο είναι το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Χάμπλ (Hubble) που τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Γη τον Απρίλιο 1990 και πήρε το όνομα του αστρονόμου που μας άνοιξε νέους ορίζοντες στον κόσμο των γαλαξιών: του Έντουιν Χαμπλ. Με συνολικό κόστος 2 δισεκατομμύρια δολάρια, αποτελεί για τους αστρονόμους μια άνευ προηγουμένου ευκαιρία να δώσουν απαντήσεις σε βασικά ερωτήματα για την προέλευση και την εξέλιξη του Σύμπαντος.

Το Διαστημικό Τηλεσκόπιο έχει κεντρίσει ιδιαίτερα το ενδιαφέρον και τον ενθουσιασμό των αστρονόμων και αστροφυσικών ολόκληρου του κόσμου γιατί έχει ήδη αποδείξει την ικανότητά του να διακρίνει ουράνια αντικείμενα σε απόσταση δέκα φορές πιο μακριά απ' ό,τι βλέπαμε μέχρι το 1990. Μας δίνει δηλαδή την ευκαιρία να εξερευνήσουμε ένα χώρο 1.000 φορές μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα να βλέπουμε αντικείμενα που μέχρι σήμερα ούτε καν υποψιαζόμαστε ότι υπάρχουν.

Η επίστρωση αλουμινίου που καλύπτει τις επιφάνειες των κατόπτρων του Χάμπλ είναι 1.200 φορές λεπτότερη από μια ανθρώπινη τρίχα, ενώ η διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπίου μετά την επισκευή είναι τόσο μεγάλη ώστε μπορεί να διακρίνει τη λάμψη μίας πυγολαμπίδας σε απόσταση 16.000 χιλιομέτρων. Στον εξοπλισμό του τηλεσκοπίου περιλαμβάνεται μία ολόκληρη σειρά ψηφιακών φωτοανιχνευτών από το υπέρυθρο έως το υπεριώδες φως.

Το κύριο κάτοπτρο έχει διάμετρο πάνω από 2 μέτρα και συλλέγει το αστρικό φως και το κατευθύνει σ' ένα μικρότερο κάτοπτρο, το οποίο εστιάζει τη φωτεινή δέσμη προς τα έξι επιστημονικά όργανα που το φωτογραφίζουν και το αναλύουν.

Ένα από τα βασικά πακέτα οργάνων του Διαστημικού Τηλεσκοπίου είναι το σύμπλεγμα τριών αισθητήρων που συγκρατούν και κατευθύνουν

επακριβώς τη σκόπευση του τηλεσκόπιου στο αντικείμενο που μελετάει. Γιατί η σταθερότητα σκόπευσης που χρειάζεται το Διαστημικό Τηλεσκόπιο είναι πολύ μεγάλη. Μπορεί να παρομοιαστεί μόνο με τη σταθερότητα που χρειάζεται μια συσκευή λέιζερ στην Αθήνα, πάνω σ' ένα αυτοκίνητο που τρέχει με 100 χιλιόμετρα την ώρα, και εκτοξεύει σταθερά ολόκληρο το εικοσιτετράωρο μια ακτίνα λέιζερ πάνω σε ένα νόμισμα μιας δραχμής που βρίσκεται στο Ηράκλειο της Κρήτης!

4.1.2 Ιατρική

Πολύ Χαμηλής Ισχύος Μικρό-Οπτικοηλεκτρομηχανικό Κλισιόμετρο

Η συσκευή χρησιμοποιεί μία ημικυκλική μάζα βασισμένη σε MEMS (μικρο-ηλεκτρο-μηχανολογικά συστήματα), η οποία κινείται γύρω από μία σταθερή βάση. Ως αποτέλεσμα έχουμε την προβολή μίας σκιάς στην επιφάνεια του οπτικού αισθητήρα CMOS (complementary metal oxide semiconductor). Μια μονοδιάστατη διάταξη φωτοδιόδων που είναι ομοιόμορφα διατεταγμένη σε ένα κατατεταγμένο δακτύλιο, χρησιμοποιείται για να υπολογίζει τη γωνία κλίσης ανιχνεύοντας τη θέση της ημικυκλικής μάζας. Το συνολικό μέγεθος του αισθητήρα είναι 2.5mm*2.5mm.

Αναφορικά με την χρησιμότητα της, ένας αυξανόμενος αριθμός ιατρικών συσκευών, συμπεριλαμβανομένων των εμφυτεύσιμων προσθετικών και των βιοϊατρικών φορητών οργάνων, εντός και πέριξ του σώματος, χρησιμοποιούν αισθητήρια συστήματα. Φυσικοί περιορισμοί απαιτούν όπως τα εν λόγω συστήματα είναι συμπαγή και ελαφριά. Επίσης η ανάγκη για αυτονομία θέτει αυστηρούς περιορισμούς ισχύος σε τέτοια συστήματα. Ένας τέτοιος αισθητήρας είναι το κλισιόμετρο, το οποίο ανιχνεύει τη θέση του σε συνάρτηση με τη βαρύτητα. Η ανίχνευση της κλίσης, στην εξατομικευμένη ιατρική καθίσταται πολύ σημαντική, ειδικά όταν συνδυάζεται με άλλους αισθητήρες. Για παράδειγμα, ένα κλισιόμετρο,

ενσωματωμένο σε ένα εποπτικό σύστημα καρδίας, μπορεί να παρέχει δεδομένα σχετικά με δραστηριότητα του ασθενούς, δίνοντας άλλη διάσταση στην ερμηνεία των δεδομένων του καρδιογραφήματος. Σε άλλες βιοϊατρικές εφαρμογές, τα πραγματικού χρόνου και ακριβή δεδομένα κλίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θεραπείες όπως τη διόρθωση των διαταραχών ισορροπίας του αιθουσαίου αισθητικού συστήματος.

Η εννοιολογική σύλληψη του Μικροηλεκτρομηχανικού κλισιομέτρου, βασίζεται σε στοιβα διπλής διάταξης που συνίσταται από τη διάταξη MEMS πάνω από το πλακίδιο του CMOS. Ο οπτικός ανιχνευτής έχει 66 στοιχεία φωτοανιχνευτών διατεταγμένα σε τμήματα 5° ούτως ώστε να καλύπτουν ένα οπτικό πεδίο 330°.

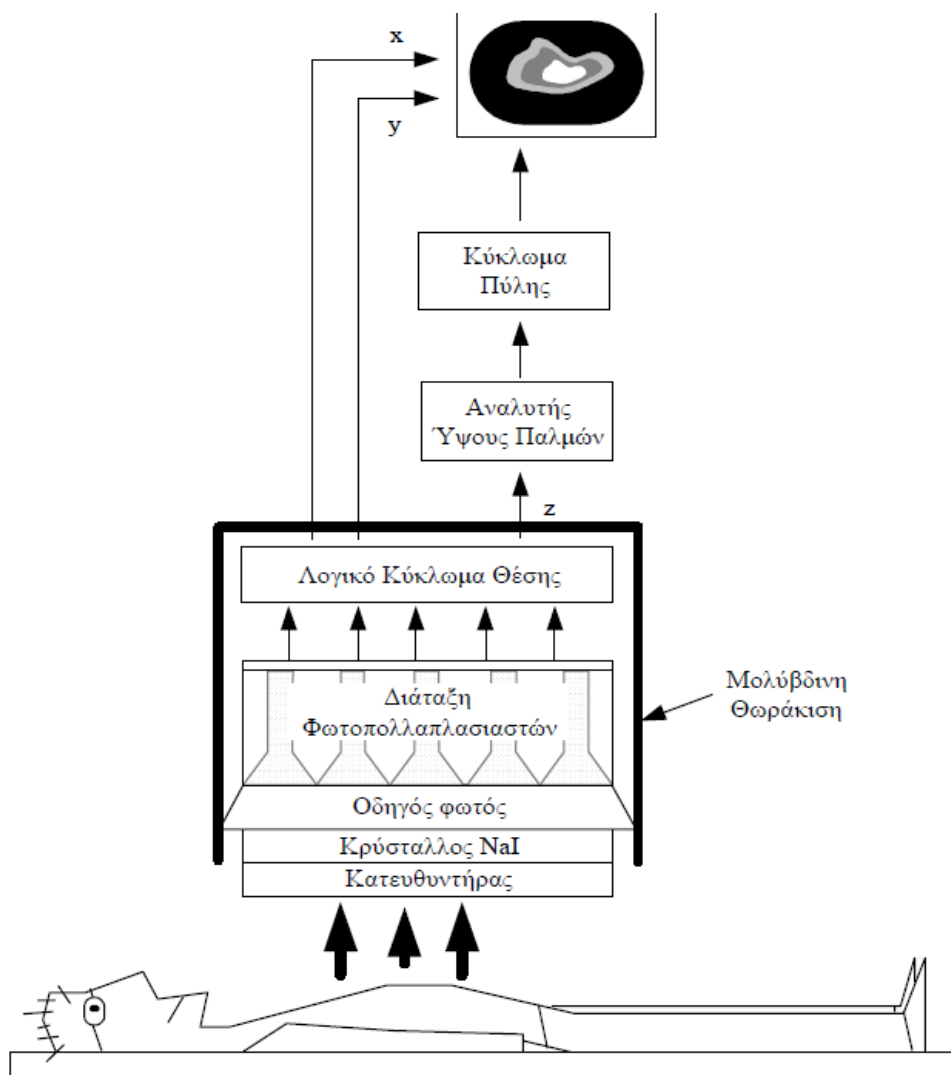
Πυρηνική Ιατρική

Στην πυρηνική ιατρική, χρησιμοποιείται μια μικρή ποσότητα ραδιοφαρμάκου (ιχνηθέτης-ραδιενεργό υλικό), που εισάγεται στο σώμα για να παρακολουθηθεί η φυσιολογική λειτουργία του ασθενούς. Αφότου το ραδιοφάρμακο εισαχθεί στον οργανισμό και συγκεντρωθεί στο προς απεικόνιση όργανο, τα φωτόνια που εκπέμπονται από αυτό, ανιχνεύονται από μια ειδική συσκευή (γ-κάμερα) και γίνεται απεικόνιση της συγκέντρωσης του ραδιοφαρμάκου μέσα στον οργανισμό. Σε ένα κλινικό περιβάλλον, οι προκύπτουσες εικόνες ραδιονουκλεϊδίου ερμηνεύονται οπτικά για να προσδιορίσουν τη φυσιολογική λειτουργία των ιστών, των οργάνων και των οργανικών συστημάτων, ή μπορούν να αξιολογηθούν ποσοτικά κατά την παρακολούθηση των βιοχημικών και των φυσιολογικών διαδικασιών, οι οποίες έχουν ιδιαίτερη σημασία στην έρευνα και τις κλινικές εφαρμογές.

Η πυρηνική ιατρική στηρίζεται στις μετρήσεις που λαμβάνονται με εξωτερικούς ανιχνευτές ακτινοβολίας, με έναν μη επεμβατικό τρόπο. Προωθεί την εφαρμογή της μοριακής διάγνωσης στην ογκολογία, τη νευρολογία, την καρδιολογία, τις μολυσματικές ασθένειες και άλλους τύπους ασθενειών. Σήμερα γίνεται προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί το

κόστος των συσκευών πυρηνικής ιατρικής απεικόνισης, ενώ συγχρόνως υπάρχει διαρκής έρευνα, ώστε να δοθούν οι ακριβέστερες διαγνωστικές απαντήσεις με την υψηλότερη πιθανή απόδοση. Είναι συνεχείς οι προσπάθειες για να αξιοποιηθούν τα πρόσφατα ερευνητικά συμπεράσματα πάνω στην ανάπτυξη ανιχνευτών, για την κατασκευή οργάνων πυρηνικής ιατρικής απεικόνισης, που θα έχουν κλινική χρήση. Σε αυτή την προσπάθεια υπάρχει στενή σύνδεση της ακαδημαϊκής κοινότητας ιατρικής απεικόνισης και της ιατρικής βιομηχανίας.

Τομογραφική Απεικόνιση (χρήση γ-κάμερας)



Στοιχεία της γ-κάμερας

- Κατευθυντήρας (collimator)
- Σπινθηριστής NaI (scintillator)
- Συστοιχία φωτοπολλαπλασιαστών (photomultipliers)
- Τα απαραίτητα ηλεκτρονικά συστήματα (καταγραφή της θέσης των σπινθηρισμών και ανάλυση του εύρους των παλμών)
- Μολύβδινη θωράκιση αρκετού πάχους (για να αποκλειστεί η επίδραση από ακτινοβολία εκτός της υπό εξέταση περιοχής)

Λειτουργία γ-κάμερας

Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μέσω κατευθυντήρα συναντά τον κρύσταλλο του σπινθηριστή, όπου απορροφώνται τα φωτόνια και παράγονται σπινθηρισμοί (ορατών φωτονίων) στο σημείο απορρόφησης. Η ένταση των σπινθηρισμών είναι ανάλογη του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στον κρύσταλλο. Η φωτοκάθοδος των φωτοπολλαπλασιαστών (οι φωτοπολλαπλασιαστές μετατρέπουν το εισερχόμενο φως σε ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό σήμα. Η εκπομπή φωτός είναι ανάλογη της ενέργειας που απορροφάται από τον σπινθηριστή και με αυτόν τον τρόπο όχι μόνο ανιχνεύονται τα παραγόμενα φωτόνια αλλά καθορίζεται και η ενέργειά τους) βρίσκεται σε οπτική επαφή με τον κρύσταλλο με τη βοήθεια του κυματοδηγού (light guide), μαζί με το λογικό κύκλωμα θέσης, δίνουν τις συντεταγμένες(x,y) της θέσης του κάθε σπινθηρισμού που παράγεται στον κρύσταλλο. Δημιουργείται έτσι ένα αποτύπωμα των σπινθηρισμών, το οποίο περιγράφει την κατανομή της ιοντίζουσας ακτινοβολίας του υπό μελέτη δείγματος.

4.2 Εφαρμογές σε άλλους Τομείς

4.2.1 CCD camera

Το σύστημα οδήγησης μιας διάταξης MOS μεταφοράς φορτίου δύο διαστάσεων, μπορεί ανά τακτά χρονικά διαστήματα να διοχετεύει τα “πακέτα” των φορτίων της κάθε σειράς του συστήματος. Δηλαδή από κάθε σειρά προκύπτει ένα αναλογικό σήμα (τάση) που το πλάτος του από θέση σε θέση εξαρτάται από την τιμή του φορτίου των “πακέτων” της κάθε θέσης. Το σήμα αυτό, είναι ένα σήμα *VIDEO*. Με κατάλληλο τρόπο μπορούν να μεταφερθούν όλα τα σήματα των διαφορετικών σειρών για σάρωση σε μια οθόνη τηλεόρασης (monitor), με συνέπεια την εμφάνιση της εικόνας που ήταν καταχωρημένη στο δισδιάστατο πλαίσιο των πυκνωτών. Το σύστημα είναι ένα είδος ανιχνευτή που μαζί με τα ηλεκτρονικά συστήματα ανίχνευσης και οδήγησης αποτελούν αυτό που σήμερα ονομάζουμε *CCD – camera*.

Για δισδιάστατες όμως διευθετήσεις CCD έχουν αναπτυχθεί πολύ εξειδικευμένες ηλεκτρονικές μέθοδοι χρονισμού μεταφοράς και ανάκτησης πληροφοριών προκειμένου να συντομεύεται ο χρόνος λήψης και να γίνεται καλύτερος έλεγχος των διακινουμένων πληροφοριών. Στο εμπόριο κυκλοφορεί μεγάλος αριθμός CCD διατάξεων με ποικιλία ευαισθησιών όπως και κατάλληλες για καταγραφή έγχρωμων πληροφοριών.

Οι φασματικές περιοχές στις οποίες είναι ευαίσθητες οι διατάξεις συζευγμένων φορτίων (CCD) μέχρι σήμερα είναι μεταξύ 0.3 – 20 μm . Μια τυπική τιμή διαστάσεων “νησίδας” είναι τα 10 μm με προοπτική περαιτέρω σμικρύνσεις τους. Οι διαστάσεις αυτές, καθορίζουν και τη διακριτική ικανότητα τέτοιου είδους ανιχνευτών, σαν συστημάτων απεικόνισης.

4.2.2 Ασύρματη Μετάδοση Δεδομένων

Οπτικός δέκτης (optical receiver)

Ο δέκτης σε ένα σύστημα οπτικών επικοινωνιών, αποτελείται κατά βάση από τον *φωτοανιχνευτή*, ο οποίος μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, κάνοντας χρήση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Καθώς οι επιδόσεις ενός συστήματος οπτικών ινών εξετάζονται στο δέκτη, ο φωτοανιχνευτής αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία του συστήματος.

Οι γενικές απαιτήσεις για τους φωτοανιχνευτές που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής:

- Υψηλή ευαισθησία στα μήκη κύματος λειτουργίας των οπτικών ινών
- Υψηλή πιστότητα, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό στην αναλογική οπτική μετάδοση, όπου η απόκριση θα πρέπει να είναι γραμμική
- Γρήγορη απόκριση
- Ο ανιχνευτής θα πρέπει να δίνει το μέγιστο δυνατό ηλεκτρικό σήμα για ένα δεδομένο επίπεδο οπτικής ισχύος
- Χαμηλή εισαγωγή θορύβου
- Λειτουργία ανεξάρτητη από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. θερμοκρασία)
- Μικρό μέγεθος, καλή σύζευξη με την οπτική ίνα και εύκολη συσκευασία με τα ηλεκτρονικά που ακολουθούν
- Υψηλή αξιοπιστία
- Χαμηλό κόστος

Όσον αφορά στις οπτικές επικοινωνίες και σύμφωνα με τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί παραπάνω, ο προτιμώμενος τύπος ανιχνευτή είναι αναμφισβήτητα η φωτοδίοδος.

Το πλεονέκτημα των ψηφιακών επικοινωνιών στηρίζεται στην ικανότητα υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (μέχρι $4 \cdot 10^{10}$ bit/s) με υπερταχείς φωτεινούς παλμούς διάρκειας μερικών ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$)

Ερευνητές των εργαστηρίων της Siemens κατάφεραν να επιτύχουν

ασύρματη μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιώντας λευκά LED αντί για ραδιοκύματα, καταφέροντας παράλληλα να ξεπεράσουν και το προηγούμενο ρεκόρ υψηλότερης ταχύτητας το οποίο ήταν τα 200 Mbps, θέτοντας αυτή τη φορά τον πήχη στα 500 Mbps. (Siemens, 2010)

Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τα λεγόμενα Ostar LED, τα πιο φωτεινά LED που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή στην αγορά. Τα LED αυτά ρυθμίζονται έτσι ώστε να λειτουργούν σε συχνότητες οι οποίες επιτρέπουν την μετάδοση δεδομένων σε ταχύτατους ρυθμούς. (Siemens, 2010)

Όπως και στις άλλες περιπτώσεις, στο άλλο άκρο του συστήματος επικοινωνιών τοποθετείται ένας φωτοανιχνευτής, ο οποίος λαμβάνει την εκπομπή φωτός που γίνεται από τα LED και τη μετατρέπει σε ηλεκτρικούς παλμούς. (Siemens, 2010)

Η τεχνολογία αυτή, την οποία η Siemens ονομάζει VLC - Visible Light Communication, μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να αυξηθούν οι επιδόσεις των ασύρματων δικτύων που διαθέτουμε σήμερα, καθώς επίσης και να τα κάνει πολύ πιο ασφαλή. (Siemens, 2010)

Η Siemens δεν ανέφερε πώς μπορεί να επηρεάζουν την ταχύτητα και την μετάδοση των δεδομένων άλλες πηγές φωτός, καθώς και τι ρόλο μπορεί να παίξει η απόσταση μεταξύ των LED και του φωτοανιχνευτή.

4.2.3 Βιομηχανία

Αισθητήρας ανίχνευσης θερμών μετάλλων

Ο HMD (ανιχνευτής θερμών μετάλλων) είναι ένας φωτοηλεκτρικός αισθητήρας ανίχνευσης ακτινοβολίας θερμού υλικού, που ανιχνεύει και την παρουσία ακτινοβολίας αλλά και εντοπίζει τη θέση απ' όπου προέρχεται, σύμφωνα με την λήψη υπέρυθρων ακτινών (θερμική ακτινοβολία) που εκπέμπεται από το θερμό υλικό.

Πρόκειται για έναν αισθητήρα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάτω

από ειδικές περιπτώσεις διάχυσης θερμότητας, ατμού και σκόνης. Κυρίως σε σιδηρουργεία και στο χώρο της βαριάς βιομηχανίας.

Αισθητήρες τρισδιάστατης όρασης

Ένα άλμα στην οπτοηλεκτρονική αποτελεί ο “efector rmd 3d”, που είναι ο πρώτος βιομηχανικός 3D αισθητήρας που μπορεί να ανιχνεύσει αντικείμενα σε τρεις διαστάσεις με μια ματιά. Ο πολύ καλός χρόνος με τον οποίο ταξιδεύει το φως για τη μέτρηση, επιτρέπει την ύπαρξη μεγάλης ποικιλίας λύσεων εφαρμογής. Στα συμβατικά συστήματα, είτε το αντικείμενο, είτε οι αισθητήρες πρέπει να είναι σε κίνηση, προκειμένου να αποκτήσουν πρόσβαση σε διάφορα σημεία μέτρησης ενός αντικειμένου. Η καινοτομία του “rmd 3d” είναι ότι όλα είναι ενσωματωμένα σε ένα τσιπ. Η τεχνολογία αυτή έχει ήδη κερδίσει πολλά διεθνή βραβεία, μεταξύ άλλων, το βραβείο EPMHS. Το τσιπ του αισθητήρα έχει 64 x 48 pixels. Εκτός από την ανακλαστικότητα, κάθε pixel του πίνακα τσιπ αξιολογεί την απόστασή του από το αντικείμενο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα 3.072 τιμές απόστασης την ίδια στιγμή.

Η εικόνα του αντικειμένου στο τσιπ και οι αντίστοιχες τιμές απόστασης ανταποκρίνονται σε μια 3D εικόνα. Αυτά τα σημεία μέτρησης της 3D εικόνας επιτρέπουν εξ αποστάσεως ανεξάρτητη αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του αντικειμένου. Αποτελούν τη βάση για τους τρεις τρόπους αξιολόγησης τον όγκο, την απόσταση και το επίπεδο, που χρησιμεύουν ως λύσεις για διαφορετικές εφαρμογές.

Υψηλής ανάλυσης αισθητήρας χρώματος

Στις βιομηχανικές διεργασίες με υψηλό βαθμό αυτοματισμού, το χρώμα αποτελεί πολλές φορές κριτήριο αναγνώρισης, ταξινόμησης ή ελέγχου διαφορετικών αγαθών και προϊόντων. Το χρώμα των ιδίων των

προϊόντων, καθώς επίσης και των συσκευασιών, ετικετών ή αποτυπωμάτων, μπορεί να ανιχνευθεί με ακρίβεια με χρήση αισθητήρων χρώματος. Ο αισθητήρας ρυθμίζεται στο υπό ανίχνευση χρώμα, με ένα πάτημα ενός μπουτόν. Με πέντε επιλεγόμενα βήματα ανοχής, μπορούν να ανιχνευθούν ακόμα και οι μικρότερες διαφορές σε χρώμα, συγκρινόμενες με το φόντο ή άλλα αντικείμενα. Η βαθμίδα εξόδου, διαθέτει λειτουργία αυτόματης ανίχνευσης για την ρύθμιση της λειτουργίας της εξόδου μεταγωγής σε PNP ή NPN, αυτόματα.

Αισθητήρας αντίθεσης:

Μπορεί να πραγματοποιηθεί μέτρηση φιαλών και γυαλιού ή αξιόπιστο έλεγχο επιστρώσεων σε σχέση με φθορές, χωρίς πρόβλημα, χρησιμοποιώντας ειδικά σχεδιασμένους αισθητήρες ανάκλασης.

Η ifm παρέχει έναν αισθητήρα ανάκλασης με μικρή υστέρηση μεταγωγής, ειδικά σχεδιασμένο για ανίχνευση διαφανών αντικειμένων. Λόγω αρχής λειτουργίας, οι αισθητήρες ανάκλασης έχουν το πλεονέκτημα ότι η φωτεινή δέσμη πρέπει να περάσει το υπό ανίχνευση αντικείμενο δύο φορές. Έτσι το φως εξασθενεί ικανοποιητικά ακόμα και κατά την ανίχνευση διάφανων αντικειμένων με ασφάλεια (μέτρηση γυάλινων μπουκαλιών).

4.2.4 Άλλες εφαρμογές

Αισθητήρες υπέρυθρου/ερυθρού φωτός

Υπάρχουν διάφοροι αισθητήρες IR που μπορούν να επιλεγούν για αξιόπιστες μετρήσεις στην παραγωγή, στο εργαστήριο και σε εμπορικές εφαρμογές. Επίσης υπάρχουν online αισθητήρες και σαρωτές θερμικών απεικονίσεων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για το συνεχή έλεγχο

της θερμοκρασίας σε κρίσιμα σημεία της γραμμής παραγωγής. Παράλληλα, ως φορητά θερμόμετρα χρησιμοποιούνται κυρίως για τακτικούς και γρήγορους προληπτικούς και περιοδικούς ελέγχους σε όλες τις πιθανές εφαρμογές.

Οι σταθεροί και σε απευθείας σύνδεση αισθητήρες IR (online έλεγχος θερμοκρασιών) έχουν ενσωματωμένους μικροεπεξεργαστές, διπλής κατεύθυνσης, ψηφιακές επικοινωνίες, αναλογικές και ψηφιακές εξόδους και λογισμικό ανάλυσης και ελέγχου για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση των προβλημάτων που ανακύπτουν στην παραγωγική διαδικασία. Τεχνικοί ή μηχανικοί μπορούν να επισημάνουν τον ακριβή χρόνο και τον εξοπλισμό όπου η διαδικασία βρέθηκε εκτός προδιαγραφών και να προσδιορίσουν τα προϊόντα που επηρεάστηκαν. Επίσης, οι αισθητήρες μπορούν να συνδεθούν εντός δικτύου, ελέγχοντας πολλά σημεία ταυτόχρονα, παρέχοντας, επίσης, τη δυνατότητα ενσωμάτωσης τους στα πιο συνήθη βιομηχανικά δίκτυα.

Η θερμική απεικόνιση ελέγχει την ποιότητα των προϊόντων. Όπου η ομοιομορφία των προϊόντων είναι απαραίτητη, σαρωτές παρέχουν θερμικές απεικονίσεις κρίσιμων επιφανειών στη διαδικασία παραγωγής σε πραγματικό χρόνο και μπορούν να εγκατασταθούν στα στρατηγικά σημεία για στιγμιαία αναγνώριση θερμών ή ψυχρών σημείων. Ο σαρωτής συλλέγει την υπέρυθη ακτινοβολία από μια επιφάνεια που περνά κάτω από το οπτικό του πεδίο και παρουσιάζει τα στοιχεία αμέσως υπό τη μορφή θερμικού χάρτη θερμοκρασιών επιφάνειας. Οι οπτικές πληροφορίες μας επιτρέπουν να καθορίσουμε εάν η παραγωγή λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές και να αντιδράσουμε γρήγορα σε περίπτωση προβλημάτων.

Εκτός από τα παραπάνω, πολύ χρήσιμα είναι και τα φορητά θερμόμετρα IR που διαθέτουν προηγμένα χαρακτηριστικά για να ελέγχουν την ποιότητα των προϊόντων ή για χρήση σε προληπτική συντήρηση, περιβαλλοντικό έλεγχο και ελέγχους ασφαλείας. Τα φορητά υπέρυθρα θερμόμετρα είναι πολύ εύκολα στη χρήση και λειτουργία-στοχεύουμε το

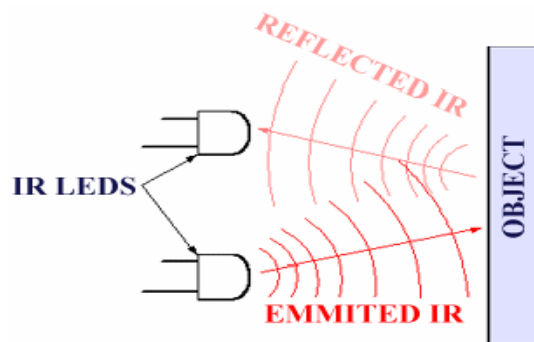
υλικό ή το αντικείμενο, φωτογραφίζουμε και διαβάζουμε τη θερμοκρασία στην οθόνη, όπως ακριβώς γίνεται και με τις συμβατικές και αναλογικές και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Ο έλεγχος μιας επιφάνειας με ένα θερμόμετρο IR μας δείχνει εύκολα τα “ψυχρά” και τα “θερμά” σημεία. Η χρήση λέιζερ βοηθά στον εντοπισμό μικρών στόχων από απόσταση, ακόμα και εκεί που ο φωτισμός είναι χαμηλός.

Μια πρωτότυπη τεχνική ανίχνευσης αντικειμένων χρησιμοποιώντας υπέρυθρο φως

Είναι η ίδια αρχή σε όλους αισθητήρες προσέγγισης υπέρυθρου. Η βασική ιδέα είναι να σταλεί φως από LED υπέρυθρων, το οποίο στη συνέχεια αντανακλάται από οποιοδήποτε αντικείμενο μπροστά από τον αισθητήρα.

Για την ανίχνευση του ανακλώμενου υπέρυθρου φωτός, χρησιμοποιείται μια πρωτότυπη τεχνική, LED υπέρυθρων ακριβώς του ίδιου τύπου με τον πομπό! Αυτό είναι ένα ηλεκτρικό χαρακτηριστικό των διόδων εκπομπής φωτός (LED), ότι δηλαδή ένα LED παράγει διαφορά τάσης στα άκρα του, όταν δέχεται φως σαν να ήταν ένα φωτοκύτταρο, αλλά με πολύ χαμηλότερο ρεύμα εξόδου. Με άλλα λόγια, η τάση που παράγεται από τα LED δεν μπορεί - με οποιονδήποτε τρόπο - να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το φως, γιατί αυτό μπορεί μετά βίας να ανιχνευθεί.

Σημείωση: Η ανίχνευση στην εφαρμογή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μία φωτοδίοδο αντί του LED υπέρυθρων για μεγαλύτερη ευαισθησία και ταχύτητα απόκρισης.



Σχήμα 29: Ανίχνευση υπέρυθρου φωτός με LED

Αισθητήρας LIDAR - 3D LIDAR

Η τεχνική LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) βασίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ στην ατμόσφαιρα και ακολούθως, στην καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας λέιζερ. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση απόστασης, ταχύτητας, ρύπανσης αλλά και για την χαρτογράφηση περιοχών.

Σε σχέση με την μέτρηση της ρύπανσης, η ατμόσφαιρα αποτελούμενη από άτομα, μόρια και αιωρούμενα σωματίδια (αερολύματα), προκαλεί εξασθένηση της διερχόμενης ακτινοβολίας λέιζερ. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από ένα οπτικό τηλεσκόπιο και οδηγείται στο σύστημα λήψης και καταγραφής των σημάτων LIDAR. Αναλύοντας τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση των συστατικών της ατμόσφαιρας με την ακτινοβολία λέιζερ, μπορεί να καθοριστεί η κατακόρυφη κατανομή των κυριότερων ρύπων και συστατικών της ατμόσφαιρας με μεγάλη χωρική (~3-7 m) και χρονική ακρίβεια (από 10-30 s έως μερικά min.).

Η τεχνική ανίχνευσης ρύπων LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging)

βασίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ στην ατμόσφαιρα και ακολούθως στην καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας λέιζερ. Η ατμόσφαιρα αποτελούμενη από άτομα, μόρια, αιωρούμενα σωματίδια (αερολύματα), κλπ. προκαλεί εξασθένηση της διερχόμενης ακτινοβολίας λέιζερ. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από ένα οπτικό τηλεσκόπιο και οδηγείται στο σύστημα λήψης και καταγραφής των σημάτων LIDAR.

Ο τρισδιάστατος ανιχνευτής φωτός και περιοχής (“3D LIDAR” → 3 dimensional light detection and ranging), περιλαμβάνει τεχνολογία που εκπέμπει παλμούς φωτός που ανακλώνται από τα αντικείμενα και επιστρέφουν στην πηγή προέλευσης.

Προγράμματα που χρησιμοποιεί η συσκευή ερμηνεύουν τα επιστρεφόμενα σήματα ως σημεία, σε μια συγκεκριμένη περιοχή του χώρου και μετατρέπουν αυτά τα σημεία σε μια 3D αναπαράσταση. Αρχικά υλοποιημένη από το στρατό, η 3D LIDAR απεικόνιση έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των χρήσεων στους τομείς της αρχαιολογίας και της γεωγραφίας.

Τα στοιχεία ενός συστήματος 3D απεικόνισης LIDAR περιλαμβάνουν συνήθως ένα λέιζερ, ένα σαρωτή, έναν φωτοανιχνευτή και ένα παγκόσμιο σύστημα πλοήγησης και εντοπισμού θέσης, ή GPS. Το λέιζερ στέλνει κάθε δευτερόλεπτο χιλιάδες παλμούς φωτός με τη βοήθεια ενός καθρέφτη προς μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Οι δέσμες φωτός που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως στο υπεριώδες, το ορατό ή κοντά στο υπέρυθρο. Όταν οι παλμοί έρθουν σε επαφή με ένα αντικείμενο, αντανακλούνται σε διάφορες κατευθύνσεις. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως σκέδαση. Πολλοί παλμοί φωτός, ή δέσμες σημείου, επιστρέφουν στη απομακρυσμένη συσκευή ανίχνευσης, που είναι ένας φωτοανιχνευτής.

Ο εξοπλισμός καταγράφει συνήθως το χρόνο που χρειάζεται κάθε παλμός να ταξιδέψει από και προς ένα αντικείμενο ή μια θέση, ως ένα

συγκεκριμένο σημείο, σε ένα 3D άξονα που αντιπροσωπεύει γεωγραφικό μήκος, πλάτος και ύψος. Ο σαρωτής χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες μαζί με προγράμματα 3D απεικόνισης για να παράγει μια εικόνα 3D. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των παλμών που εκπέμπονται, τόσο πιο πυκνή και λεπτομερής η εικόνα που αναπαράγεται. Οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν γενικά τεχνολογία 3D LIDAR για την ανίχνευση ουσιών διαφόρων μεγεθών, από σωματίδια τόσο μικρά όσο τα αέρια και τα αερολύματα, όσο σε στερεά αντικείμενα ή τεράστια εδάφη, ανάλογα με την ευαισθησία και τις ρυθμίσεις του σχετικού εξοπλισμού.

Με 3D LIDAR εξοπλισμό τοποθετημένο σε ένα αεροπλάνο, είναι δυνατόν να φτιαχτούν χάρτες 3D εικόνων και αεροφωτογραφιών. Οι δήμοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν 3D μοντελοποίηση πόλης για να αποκτήσουν ακριβείς απεικονίσεις διαφόρων περιοχών για σκοπούς όπως τον σχεδιασμό κατασκευών, για λόγους ασφαλείας ή για την ενίσχυση του τουρισμού. Προγράμματα κινουμένων εικόνων LIDAR επιτρέπουν στους χρήστες να προβάλλουν εικόνες σε διάφορες γωνίες ή με διαφορετικές εντάσεις φωτός. Όπως οι παλμοί φωτός διέρχονται από διάφορες περιοχές, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, οι τοπογραφικές εικόνες του περιβάλλοντος μπορεί να είναι πολυεπίπεδες, ξεκινώντας με το σχηματισμό της γης και συνεχίζοντας με την προσθήκη των χαρακτηριστικών του νερού και πάνω από τις κορυφές των δέντρων στα δάση.

Αν και γενικά τοποθετημένη σε ένα κινούμενο αεροπλάνο ή δορυφόρο, η συσκευή μπορεί επίσης να τοποθετηθεί σε μια στατική θέση και να περιστρέφεται, παρέχοντας εικόνα 360 μοιρών από τη συγκεκριμένη θέση. Η τεχνολογία 3D LIDAR καθορίζει και την ταχύτητα κινούμενων αντικειμένων. Οι αρχές επιβολής του νόμου χρησιμοποιούν συσκευές χειρός που καθορίζουν την ταχύτητα των διερχόμενων οχημάτων, με βάση το χρόνο που απαιτείται για τον παλμό του φωτός, να χτυπήσει το αντικείμενο και να επιστρέψει στη συσκευή.

Πλεονεκτήματα της τεχνικής LIDAR έναντι των συμβατικών

τεχνικών μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων:

- Καταλληλότητα σε μετρήσεις «εξ' αποστάσεως» στην περίπτωση καταγραφής βιομηχανικών εκπομπών (έλεγχος τήρησης περιβαλλοντικών διατάξεων) και εντοπισμού εστιών ρύπανσης (π.χ. εστίες καύσης) σε αστικές και ημιαστικές περιοχές.
- Λήψη μετρήσεων και καταγραφής ατμοσφαιρικής ρύπανσης με πολύ μεγάλη χωρική (5-1000m) και χρονική ακρίβεια (1-10s).
- Μέτρηση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (από μερικά μέτρα έως 100-120 χλμ).
- Μέτρηση σε πραγματικό χρόνο και λήψη μετρήσεων σε 1-2-3 διαστάσεις το χώρο.
- Ικανότητα μέτρησης πολλαπλών ρυπαντών ταυτόχρονα.

Η τεχνική LIDAR εφαρμόσθηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα το 1993 στο “*Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας*” του Αριστοτέλειου Πανεπιστήμιου Θεσσαλονίκης και αργότερα, το 1999 στο “*Εργαστήριο Ανάπτυξης Λέιζερ και Εφαρμογές τους*”, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου από τον αναπληρωτή καθηγητή Αλέξανδρο Παπαγιάννη. Η τεχνική LIDAR στην Ελλάδα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της κατακόρυφης κατανομής των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων, του όζοντος, αλλά και των υδρατμών, των νεφών και της θερμοκρασίας της τροπόσφαιρας. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για τη μελέτη της δομής και της χωρο-χρονικής μεταβολής του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ) και την ανίχνευση της εισροής αερολυμάτων (σωματίδια ερημικής σκόνης, καύσης βιομάζας, ηφαιστειακής τέφρας, κλπ) στον ελληνικό εναέριο χώρο από το έδαφος έως ύψος 15.000-20.000 μέτρων, πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας.

Έλεγχος της στάθμης φωτός και συστήματα αυτομάτου ελέγχου

Συστήματα ελέγχου

Τα συστήματα ελέγχου φωτισμού είναι συσκευές που ρυθμίζουν τη λειτουργία φωτισμού σε συνάρτηση με ένα εξωτερικό σήμα (π.χ. με βάση το φως από το περιβάλλον γίνεται ενεργοποίηση – απενεργοποίηση και αλλαγή της στάθμης φωτός).

Έλεγχος παρουσίας

Επιτυγχάνεται με αισθητήρες παρουσίας οι οποίοι παρακολουθούν μεταβολές της ακτινοβολίας στο ορατό (ή και στο υπέρυθρο) φάσμα και σβήνουν τα φώτα όταν δεν ανιχνεύσουν κίνηση στο χώρο για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Όταν ανιχνεύσουν κίνηση συνήθως επαναφέρουν τα φώτα σε λειτουργία.

Οι αισθητήρες παρουσίας μπορεί να είναι:

- είτε αυτόνομοι είτε συνδεδεμένοι σε σύστημα ελέγχου και μπορούν να τοποθετηθούν σε τοίχο ή σε οροφή. Αυτοί ήταν οι πρώτοι τύποι ανιχνευτών παρουσίας που χρησιμοποιήθηκαν και παραμένουν ιδιαίτερα δημοφιλείς. Η εγκατάστασή τους απαιτεί διάνοιξη της οροφής ή του τοίχου, δεδομένου ότι πρέπει να καλωδιωθούν με το σύστημα ηλεκτρική παροχής. Αυτό συνεπάγεται σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης όταν η εγκατάσταση γίνεται εκ των υστέρων (στις περιπτώσεις ανακαινίσεων),

- είτε υπάρχουν όλα τα εξαρτήματα στο ίδιο κεντρικό πίνακα–σημείο και μπορούν εύκολα να καλωδιωθούν σε υπάρχοντα κουτιά στον χώρο. Αυτή είναι πιο πρόσφατη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρούς χώρους γραφείων, σε περιπτώσεις ανακαίνισης, με αντικατάσταση των κοινών διακοπών τοίχου. Έχουν περιορισμένη

ευελιξία δεδομένου ότι η θέση του πίνακα είναι σταθερή, συνήθως σε ύψος 110 εκ. από τη στάθμη του δαπέδου. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι οι διαχωριστικοί τοίχοι και τα έπιπλα μπορεί να περιορίσουν την εμβέλεια του. Ωστόσο, σε κατάλληλους χώρους (μικρά γραφεία και αίθουσες συνεδριάσεων που έχουν επίτοιχους διακόπτες) οι πίνακες είναι πολύ οικονομικοί δεδομένης της χαμηλής τιμής τους και το κόστος εγκατάστασης είναι σχεδόν αμελητέο.

Η εξοικονόμηση ενέργειας, με την εγκατάσταση ενός αισθητήρα παρουσίας, ποικίλει αναλόγως του μεγέθους του χώρου και του τρόπου χρήσης του χώρου, αλλά συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 35% και 45%. Είναι σημαντικό να έχει προβλεφθεί κάποια χρονική υστέρηση στο σύστημα, καθώς ο χρήστης μπορεί να παραμείνει ακίνητος για μικρά χρονικά διαστήματα ενώ συνεχίζει να βρίσκεται μέσα στο χώρο και δεν επιθυμεί να σβήνουν τα φώτα πριν την έξοδό του από το χώρο. Απαιτείται προσοχή στην επιλογή των ανιχνευτών καθώς ο βαθμός ευαισθησίας τους ποικίλει. Κριτήριο για την επιλογή ενός συστήματος ελέγχου παρουσίας είναι η χρήση του χώρου. Οι ενδεικνυόμενες εφαρμογές για συστήματα ελέγχου παρουσίας είναι οι χώροι στους οποίους η χρήση είναι διακοπτόμενη ή απρόβλεπτη, π.χ. χώροι φωτοτυπικών, αποθήκες, υπηρεσιακοί διάδρομοι.

Στους αισθητήρες παρουσίας δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται λαμπτήρες εκκένωσης μεγάλης έντασης (εκτός ειδικών περιπτώσεων), καθώς λαμπτήρες αυτοί απαιτούν κάποιο χρόνο έως την πλήρη έναυσή τους και επομένως αρκετά λεπτά για να επανέλθουν σε πλήρη λειτουργία.

Σύζευξη με τον φυσικό φωτισμό

Το σύστημα λειτουργεί με φωτοκύτταρο το οποίο τοποθετείται είτε εξωτερικά είτε σε θέση που να βλέπει έξω από το παράθυρο, ώστε να δέχεται μόνο φυσικό φως.

Μπορεί να τοποθετηθεί και μέσα στο χώρο ώστε να μετρά τον

συνολικό φωτισμό (φυσικό και τεχνητό).

Σ' αυτή την περίπτωση ένας φωτοηλεκτρικός αισθητήρας μπορεί να ελέγχει ομάδα φωτιστικών ή να είναι τοποθετημένος σε μεμονωμένο φωτιστικό και να ελέγχει μόνο αυτό.

Τα πιο κοινά συστήματα σύζευξης φυσικού και τεχνητού φωτισμού είναι:

- Συστήματα έναυσης / σβέσης: ένα τέτοιο σύστημα το οποίο προκαλεί ξαφνικές και έντονες αλλαγές της στάθμης φωτισμού μπορεί να προκαλεί δυσαρέσκεια στους χρήστες. Αυτός ο τύπος ενδείκνυται για χώρους που δέχονται άπλετο φυσικό φώς και η συχνότητα έναυσης / σβέσης είναι περιορισμένη. Επίσης, είναι σημαντικό να προβλέπεται χρονική υστέρηση στο σύστημα ελέγχου ώστε να αποφεύγεται επαναλαμβανόμενη συχνή έναυση / σβέση, που μπορεί να προκαλείται π.χ. από κινούμενη νέφωση.

- Βηματικά συστήματα: είναι ίδια με τα προηγούμενα αλλά με μία ή δύο ενδιάμεσες θέσεις μεταξύ των θέσεων έναυσης και σβέσης.

- Συστήματα ρύθμισης φωτεινής ροής: Αυτά εξασφαλίζουν ότι η συνολική ποσότητα φυσικού και τεχνητού φωτισμού φτάνει πάντοτε τη στάθμη στην οποία έχει ρυθμιστεί το σύστημα. Εάν η απαιτούμενη στάθμη εξασφαλίζεται μόνο με φυσικό φώς τότε η ροή του τεχνητού συστήματος μηδενίζεται. Σε αντίθεση με το σύστημα έναυσης / σβέσης, το σύστημα ελέγχου φωτεινής ροής δεν ενοχλεί τους χρήστες και η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας είναι μεγαλύτερη. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών στραγγαλιστικών διατάξεων επέτρεψε τη χρήση των συστημάτων αυτών και στο φωτισμό φθορισμού, ιδιαίτερα σε εμπορικούς χώρους.

Γενικά, εάν ο φυσικός φωτισμός είναι επαρκής, ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις φωτισμού για μεγάλο διάστημα της ημέρας, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Έρευνες έχουν δείξει ότι η πιθανότητα έναυσης του τεχνητού συστήματος, από τους εργαζόμενους όταν

εισέρχονται στο χώρο εργασίας, έχει άμεση σχέση με την παροχή φυσικού φωτισμού και επίσης όταν οι χρήστες ανάψουν το τεχνητό σύστημα κατά την είσοδό τους στο χώρο, σπανίως το σβήνουν κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Το κριτήριο για την επιλογή συστήματος σύζευξης φυσικού/τεχνητού φωτισμού είναι η διαθεσιμότητα του φυσικού φωτισμού στο χώρο. Ενδεικνυόμενες εφαρμογές για συστήματα σύζευξης είναι οι χώροι με άπλετο φυσικό φως.

Η εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων ελέγχου του φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση της ενέργειας που καταναλώνεται. Σε κτίρια γραφείων η κατανάλωση ενέργειας, στατιστικά, μπορεί να μειωθεί κατά 30% έως 50%. Η απόσβεση του κόστους εφαρμογής μπορεί συχνά να επιτευχθεί σε 2-3 έτη.

Τόσο η αυτόματη, όσο και η χειροκίνητη έναυση και σβέση των λαμπτήρων έχει επιπτώσεις στο χρόνο ζωής των λαμπτήρων. Εντούτοις, αυτή η επίδραση είναι ελάχιστη, ενώ το ενεργειακό όφελος από το σβήσιμο των λαμπτήρων καλύπτει το κόστος μείωσης του χρόνου ζωής τους. Υπό την προϋπόθεση ότι οι λαμπτήρες πρόκειται να παραμένουν σβηστοί για χρονικό διάστημα περισσότερο των δύο ή τριών λεπτών, είναι πάντα οικονομικά αποδοτικότερο να σβήνουν.

Στα συστήματα ελέγχου φωτισμού μπορούν να συνδυαστούν διάφορες στρατηγικές. Για παράδειγμα, επιτυχείς εγκαταστάσεις για διαδρόμους γραφείων ή ξενοδοχείων μπορεί να συνδυάσουν α) κεντρικό χρονικό προγραμματισμό έναυσης/σβέσης των φωτιστικών, β) σβήσιμο των φωτιστικών σωμάτων κατά την διάρκεια του μεσημεριανού γεύματος έτσι ώστε να μειωθεί η κατανάλωση, γ) σύζευξη με τον φυσικό φωτισμό στα φωτιστικά σώματα κοντά στα παράθυρα και δ) τοποθέτηση τοπικών διακοπών, έτσι ώστε μόνο οι χώροι που χρησιμοποιούνται εκείνη τη χρονική διάρκεια να είναι φωτισμένοι. Οι ανιχνευτές παρουσίας που εγκαθίστανται σε κάθε φωτιστικό μπορούν επίσης να περιλάβουν αισθητήρες φυσικού φωτισμού. Αυτός ο τύπος ολοκληρωμένου

συστήματος ελέγχου μπορεί να λύσει το πρόβλημα που δημιουργείται σε χώρους ιδιόμορφου σχήματος ή όπου η σύνδεση με άλλο σύστημα ελέγχου είναι δύσκολη.

Οι μόνιμοι χρήστες ενός χώρου πρέπει να είναι ενήμεροι για την ύπαρξη του συστήματος ελέγχου φωτισμού, τον τρόπο λειτουργίας του και πώς μπορούν να αλληλεπιδράσουν με αυτό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις ανακαινίσεις εγκαταστάσεων, όπου μπορεί να παρουσιαστεί αντίδραση στην εγκατάσταση των συστημάτων ελέγχου φωτισμού εάν οι χρήστες του κτιρίου δεν ενημερωθούν πλήρως για το νέο σύστημα.

Εφαρμογές στην καθημερινότητα

Σαρωτής (scanner)

Ο σαρωτής (scanner) χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα φωτός, για να μετατρέψει μια εικόνα, φωτογραφία ή έγγραφο σε δεδομένα, τα οποία μπορούν εφεξής να μεταφερθούν με τη χρήση λογισμικού στον υπολογιστή.

Η χρησιμότητα του έγκειται στο γεγονός ότι μερικές φορές πρέπει να εισάγουμε ένα προϋπάρχον κείμενο μεγάλου μεγέθους χωρίς να χρειάζεται να το πληκτρολογήσουμε. Απλώς σαρώνουμε το κείμενο και με την βοήθεια ενός λογισμικού αναγνώρισης οπτικού χαρακτήρα (optical character recognition software) αναπαριστούμε το κείμενο χαρακτήρα προς χαρακτήρα. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομούμε χρόνο και φυσικά αποφεύγουμε τα λάθη πληκτρολόγησης.

Συστήματα συναγερμού

Οι παθητικοί ανιχνευτές υπέρυθρων που έχει επικρατήσει να αποκαλούνται PIR (Passive InfraRed detectors) έχουν ευρύτατη χρήση σε συστήματα ασφαλείας. Όπως υποδηλώνει το όνομά τους, οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι παθητικοί, το οποίο σημαίνει ότι δεν εκπέμπουν κανενός είδους σήμα, αλλά δέχονται σήματα. Αναλυτικότερα, η κεφαλή του αισθητήρα είναι διαχωρισμένη σε τομείς, με τον κάθε τομέα να καθορίζεται από συγκεκριμένα όρια. Η ανίχνευση πραγματοποιείται όταν μια πηγή θερμότητας διασχίζει δύο γειτονικούς τομείς ή ένα συγκεκριμένο τομέα δύο φορές, μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι αισθητήρες τύπου PIR ανιχνεύουν την εκπεμπόμενη υπέρυθη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που παράγεται από πηγές με θερμοκρασίες χαμηλότερες του ορατού φωτός. Ουσιαστικά, δεν μετρούν την ποσότητα της υπέρυθρης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, αλλά τις μεταβολές της. Δηλαδή, εντοπίζουν μια υπέρυθη εικόνα, ανιχνεύοντας την αντίθεση που υπάρχει μεταξύ αυτής και του ψυχρότερου περιβάλλοντος. Η εκπεμπόμενη ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα κυμαίνεται μεταξύ των 7 έως 14 microns.

Οι περισσότεροι ανιχνευτές PIR λειτουργούν ανάμεσα σε αυτά τα όρια. Για να αποφεύγονται τυχούσες θερμικές παρεμβολές από μη σχετικές πηγές που πιθανόν να βρίσκονται στο περιβάλλον, χρησιμοποιείται είτε ένα κύκλωμα μέτρησης του ρυθμού μεταβολής είτε ένα κύκλωμα μέτρησης παλμού δύο διευθύνσεων. Όταν η ανίχνευση του σήματος γίνεται βάσει του ρυθμού μεταβολής, ο αισθητήρας αξιολογεί την ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η ποσότητα της ενέργειας στον υπό έλεγχο χώρο. Στην άλλη κατηγορία του παλμού μέτρησης δύο διευθύνσεων, σήματα από διαφορετικούς θερμικούς αισθητήρες συντελούν στην εμφάνιση αντίθετης πολικότητας. Ένας άνθρωπος που θα δεισδύσει στον ελεγχόμενο χώρο με μια φυσιολογική ταχύτητα, θα προκαλέσει φυσιολογικά, διαφορετικά σήματα που θα συμβάλλουν στην ανίχνευση του.

Αναισθησία σε ψευδείς συναγερμούς από οικόσιτα και άλλα ζώα

Ο ανιχνευτής (συνήθως για ανίχνευση κίνησης σε εξωτερικούς χώρους) μπορεί να διακρίνει μεταξύ των σημάτων που προκαλούνται από ανθρώπους και των σημάτων που προκαλούνται από ζώα (ένας άνθρωπος έχοντας μεγαλύτερο όγκο από ένα ζώο, γίνεται αντιληπτός από περισσότερους από έναν αισθητήρες του ίδιου ανιχνευτή). Αυτό παρέχει αναισθησία σε ψευδείς συναγερμούς, ενώ παράλληλα διατηρείται η απόδοση σύλληψης ανθρώπινων στόχων.

Ο σφραγισμένος οπτικός θάλαμος του ανιχνευτή παρέχει αναισθησία σε ρεύματα αέρα και έντομα. Ο ανιχνευτής παρακολουθεί αυτομάτως τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και προσαρμόζει την επεξεργασία του σήματος με τρόπο ώστε να διατηρεί σταθερή την απόδοσή του στον εντοπισμό εισβολέων σε κρίσιμες περιοχές τιμών θερμοκρασίας. Πιο εξειδικευμένοι ανιχνευτές κίνησης είναι οι μικροκυματικοί (ή αυτοί με συνδυασμό υπέρυθρης και μικροκυματικής ανίχνευσης) για περαιτέρω αποφυγή λανθασμένων συναγερμών.

Έρευνα - εξέλιξη

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας στα συστήματα ασφάλειας οδήγησε τις εταιρείες στην κατασκευή έξυπνων ανιχνευτών οι οποίοι έχουν την ιδιότητα να αναγνωρίζουν μέχρι και 3 συγκεκριμένα άτομα, έτσι ώστε να μην δίνουν εντολές συναγερμού στην κεντρική μονάδα. Με τα σημερινά δεδομένα οι υπέρυθροι και μικροκυματικοί ανιχνευτές κίνησης των συστημάτων συναγερμού, έχουν την ιδιότητα να ανιχνεύουν κίνηση σε ανθρώπους και ζώα. Τα υπέρυθρα ραντάρ βασίζονται στην ανίχνευση μεταβολής της θερμοκρασίας σε ανθρώπους και ζώα, ενώ τα μικροκυματικά ραντάρ βασίζονται στο φαινόμενο Doppler. Τα "έξυπνα" ραντάρ έχουν την ιδιότητα να ξεχωρίζουν τους ιδιοκτήτες τους και να μην δίνουν εντολές συναγερμού όταν ανιχνεύονται. Το γεγονός αυτό δίνει την δυνατότητα παρουσίας ζώων μέσα σε συγκεκριμένο χώρο ανίχνευσης, χωρίς τον κίνδυνο ψευδοσυναγερμών.

Ηλιοστάτης ή Φωτοβολταϊκό με εντοπιστή τροχιάς του ήλιου (photovoltaic solar tracking system)

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Είναι προφανές ότι σε συστήματα που δεν έχουν τη δυνατότητα μετακίνησης ώστε να παρακολουθούν την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, η απόδοση δεν είναι η βέλτιστη δυνατή. Ο ηλιοστάτης είναι μια μηχανολογική διάταξη, πάνω στην οποία τοποθετείται η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ώστε το σύστημα να μπορεί να περιστρέφεται μέσω ενός σερβοκινητήρα και να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου. Με τον τρόπο αυτό γίνεται η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, ενώ εξοικονομείται χρήμα.

Η κίνηση του φωτοβολταϊκού βασίζεται σε φωτοανιχνευτή, η κατασκευή του οποίου βασίζεται σε 2 φωτοαντιστάσεις (CdS ή GaAs), οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα, με κοινή τροφοδοσία. Το δεύτερο άκρο της μιας φωτοαντίστασης συνδέεται στην αναστρέφουσα είσοδο ενός τελεστικού ενισχυτή (T.E) και το δεύτερο άκρο της άλλης φωτοαντίστασης στη μη αναστρέφουσα είσοδο του ίδιου T.E. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει σύγκριση των δύο εισόδων, με αποτέλεσμα την οδήγηση ενός σερβοκινητήρα (αριστερόστροφα ή δεξιόστροφα ανάλογα με την έξοδο του T.E). Με αυτού του είδους τεχνικές η ημερήσια ενεργειακή απολαβή μπορεί να αυξηθεί 25-40% .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ – ΕΞΕΛΙΞΗΣ

Έλεγχος διάρκειας ζωής φωτοανιχνευτή (επιταχυνόμενη γήρανση).

Για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ή του μέσου χρόνου έως την καταστροφή (MTTF- mean-time-to-failure), πραγματοποιούνται δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης σε ομάδες διόδων σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, ο MTTF για φωτοδιόδους InGaAs με διάμετρο 300 μm καθορίστηκε με ομάδες των 20 σε θερμοκρασίες 200, 230, και 250°C. Το κριτήριο της αποτυχίας ήταν 25% αύξηση της τιμής του ρεύματος σκότους (μέτρηση σε θερμοκρασία δωματίου). Το συνολικό τεστ επεκτάθηκε σε χρονική περίοδο αρκετών ετών, και κάθε εβδομάδα τα δείγματα ψύχονταν σε θερμοκρασία δωματίου για να ελέγχεται το ρεύμα σκότους τους. Οι αποτυχημένες συσκευές αφαιρούνταν από το δείγμα και οι υπόλοιπες καλές εκτίθονταν εκ νέου σε υψηλή θερμοκρασία. Από τα δεδομένα, διαπιστώθηκε ότι ο μηχανισμός της αποτυχίας είναι θερμικά ενεργοποιούμενος.

Οργανικά Ηλεκτρονικά

Εδώ και σαράντα χρόνια, οι ανόργανοι ημιαγωγοί (π.χ. Si, GaAs), μονωτές (π.χ. SiO₂) και μέταλλα (π.χ. Al, Cu) αποτελούσαν τη ραχοκοκαλιά της βιομηχανίας των ημιαγωγών και της μικροηλεκτρονικής. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται ταχύτατα ένας νέος τομέας της σύγχρονης τεχνολογίας, ο τομέας των Οργανικών Ηλεκτρονικών (Organic Electronics-OE). Κύριο χαρακτηριστικό των OE

είναι ο συνδυασμός νέων καινοτόμων υλικών με διεργασίες ευρείας κλίμακας (large area production processes) που χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος, με στόχο την ανάπτυξη πολυστρωματικών λεπτών υμενίων πάνω σε εύκαμπτα πολυμερικά υποστρώματα τα οποία έχουν την μορφή ρολών (roll-to-roll). Με τον τρόπο αυτό, ανοίγονται νέα πεδία εφαρμογών τα οποία θα βελτιώσουν σημαντικά την καθημερινή μας ζωή και θα αλλάξουν τους τρόπους επικοινωνίας, ενημέρωσης, εκπαίδευσης, και παραγωγής ενέργειας. Οι χαμηλού κόστους εύκαμπτες οθόνες, εύκαμπτα φωτοβολταϊκά συστήματα, εύκαμπτοι φωτοανιχνευτές, εκτυπώσιμες μπαταρίες, βιο-διαγνωστικές συσκευές μιας χρήσης, και εξελιγμένα συστήματα αναγνώρισης είναι μόνο μερικά παραδείγματα των πολλά υποσχόμενων πεδίων εφαρμογών των Οργανικών Ηλεκτρονικών που θα βασίζονται στα νέα οργανικά ημιαγωγικά υλικά.

Ολογραφικές μνήμες

Η ολογραφική μνήμη είναι μια τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιεί τρισδιάστατα μέσα για την αποθήκευση των πληροφοριών και γράφει σελίδες δεδομένων (οι οποίες περιέχουν εκατομμύρια bit) αντί να τα γράφει διαδοχικά, γεγονός που αυξάνει την χωρητικότητα καθώς και την ταχύτητα προσπέλασης. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω χρησιμοποιούνται φωτοευαίσθητα κρυσταλλικά υλικά και φωτοπολυμερή, πάνω στα οποία αποθηκεύονται τα δεδομένα ως μοτίβα, με τη χρήση δύο ακτινών laser (παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα CD-ROM). Οι ακτίνες προκαλούν φυσικές ή χημικές μεταβολές στο υλικό, και η πληροφορία αποθηκεύεται ως μεταβολές στη διαθλαστική ικανότητα, την ικανότητα απορρόφησης του φωτός ή το πάχος του φωτοευαίσθητου υλικού.

Αρχή λειτουργίας των ολογραφικών μνημών

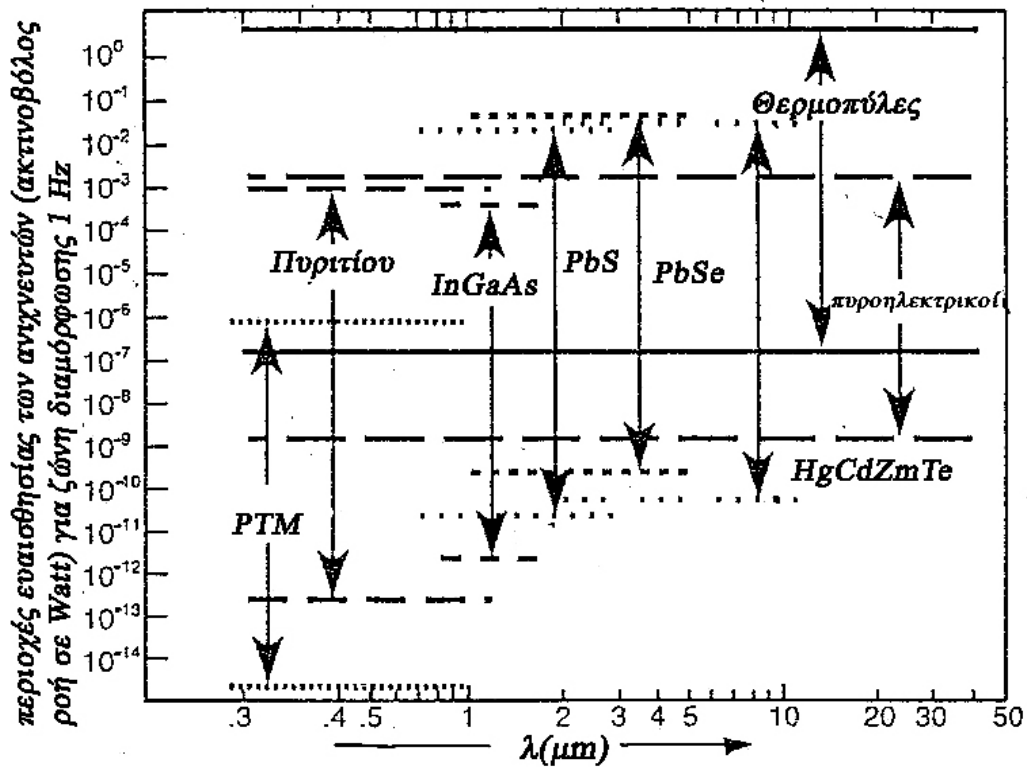
Ένα σύστημα ολογραφικής αποθήκευσης δεδομένων αποτελείται από ένα μέσο αποθήκευσης, από σύστημα οπτικής καταγραφής και ένα πλέγμα φωτοανιχνευτών. Μια ακτίνα φωτός (από blue-green argon laser) διαχωρίζεται σε μια ακτίνα αναφοράς (reference beam) και σε μια ακτίνα σήματος (ή ακτίνα αντικειμένου) (object/signal beam) οι οποίες χρησιμοποιούνται για να εγγράψουν το ολόγραμμα στο μέσο. Το μέσο εγγραφής είναι συνήθως ένας φωτοδιαθλαστικός κρύσταλλος όπως το LiNbO_3 και το BaTiO_3 που έχει συγκεκριμένα οπτικά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι μεγάλη περιθλαστική αποτελεσματικότητα, υψηλή ανάλυση, μόνιμη αποθήκευση (με δυνατότητα διαγραφής) και γρήγορη διαγραφή με την εφαρμογή εξωτερικής διέγερσης, όπως από υπεριώδες φως. Η ολογραφική αποθήκευση αποτελεί μια από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες αποθήκευσης δεδομένων. Οι δυνατότητες εφαρμογής της είναι διευρυμένες χάρη στις μεγάλες χωρητικότητες και τις μεγάλες ταχύτητες που μπορούν να επιτευχθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

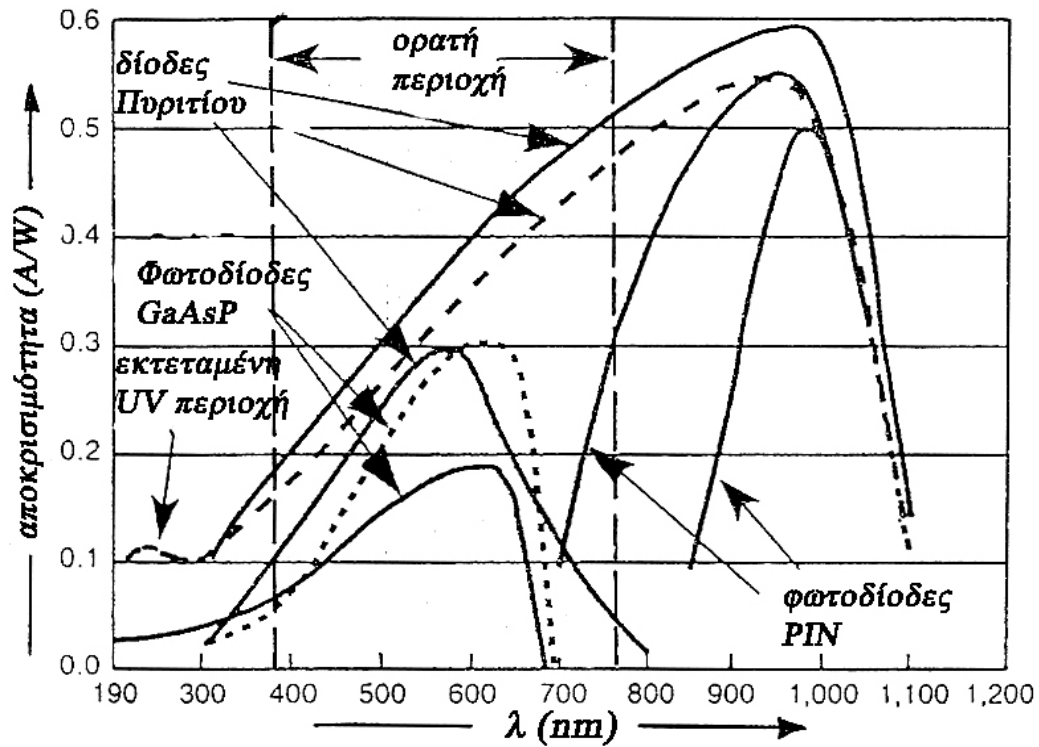
Οι φωτοανιχνευτικές διατάξεις αποτελούν στοιχεία που βρίσκουν ένα πλήθος εφαρμογών σε πολλούς τομείς. Η ποικιλομορφία που παρουσιάζουν όσον αφορά τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους, καθιστά αναγκαία τη διαδικασία σύγκρισης και επιλογής της κατάλληλης διάταξης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.

Μια από τις βασικές παραμέτρους επιλογής συγκεκριμένου ανιχνευτή είναι τα **φασματικά όρια** των ακτινοβολιών στην περιοχή των οποίων θέλουμε να μετρήσουμε. Στο σχήμα 30 παρατίθεται ένας μεγάλος αριθμός θερμικών, ημιαγωγικών και ανιχνευτών εκπομπής, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό για ανίχνευση στη φασματική περιοχή μεταξύ 0.1 – 50 μm . Χαρακτηριστικά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι θερμικοί ανιχνευτές που η λειτουργία τους στηρίζεται στο πυροηλεκτρικό φαινόμενο, είναι δυνατόν ν' ανιχνεύσουν όλη την παραπάνω περιοχή (ανάλογα με τις προσμίξεις και τον τύπο θερμικού ανιχνευτή που θα χρησιμοποιηθεί), τα όρια όμως της ευαισθησίας τους είναι για προσπίπτουσα ροή ακτινοβολίας μεταξύ 10^{-9} και 10^{-3} Watt (για ζώνη διαμόρφωσης $\Delta f = 1$ Hz). Για μεγαλύτερη ευαισθησία θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ανιχνευτές φωτοεκπομπής των οποίων η ευαισθησία κυμαίνεται μεταξύ 10^{-6} και κάτω των 10^{-14} Watt, όμως το φασματικό εύρος που μπορούν ν' ανιχνεύσουν είναι μεταξύ 0.3 – 1 μm . Για μετρήσεις σε περιοχές του εγγύς υπέρυθρου π.χ. μεταξύ περίπου 1 μm και 5 μm χρησιμοποιούμε τους ημιαγωγικούς φωτοαγώγιμους ανιχνευτές (PbS, PbSe) οι οποίοι έχουν και μια μέση ευαισθησία μεταξύ 10^{-10} – 10^{-2} Watt.



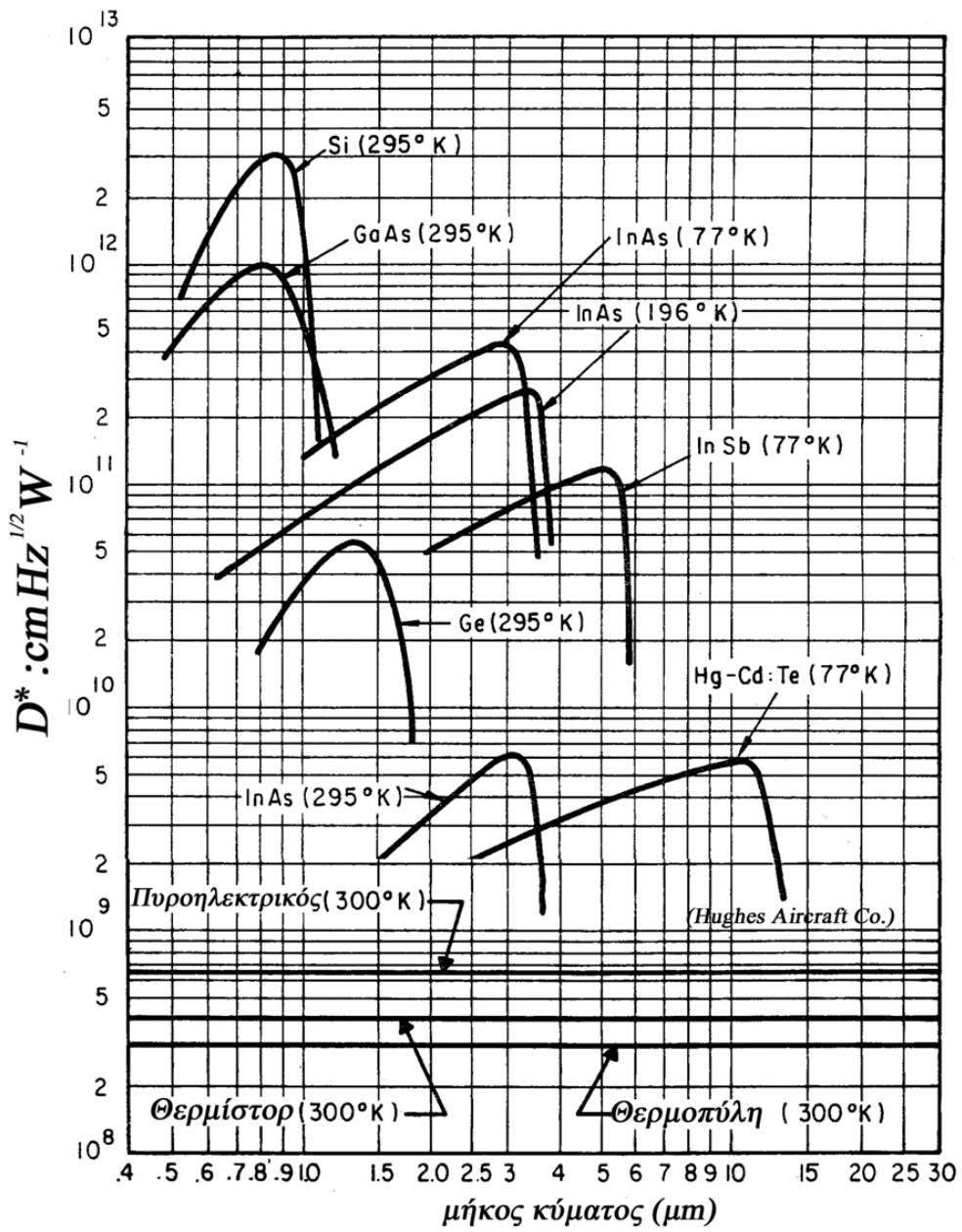
Σχήμα 30

Μια δεύτερη παράμετρο που πρέπει να επιλέξουμε είναι η **ευαισθησία** (ή **αποκρισιμότητα**) του συγκεκριμένου ανιχνευτή. Καμπύλες της R_i σε (A/W) για ένα ορισμένο αριθμό φωτοβολταϊκών ημιαγωγικών ανιχνευτών (φωτοдиодων) δίνεται στο (Σχ. 31). Βλέπουμε ότι οι φωτοдиодοι πυριτίου χρησιμοποιούνται για ανίχνευση της ορατής κυρίως περιοχής με αρκετά μεγάλη τιμή ανιχνευσιμότητας ενώ αυτοί του GaAsP με σαφώς μικρότερη ανιχνευσιμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις στην υπεριώδη περιοχή μέχρι τα 190 nm.

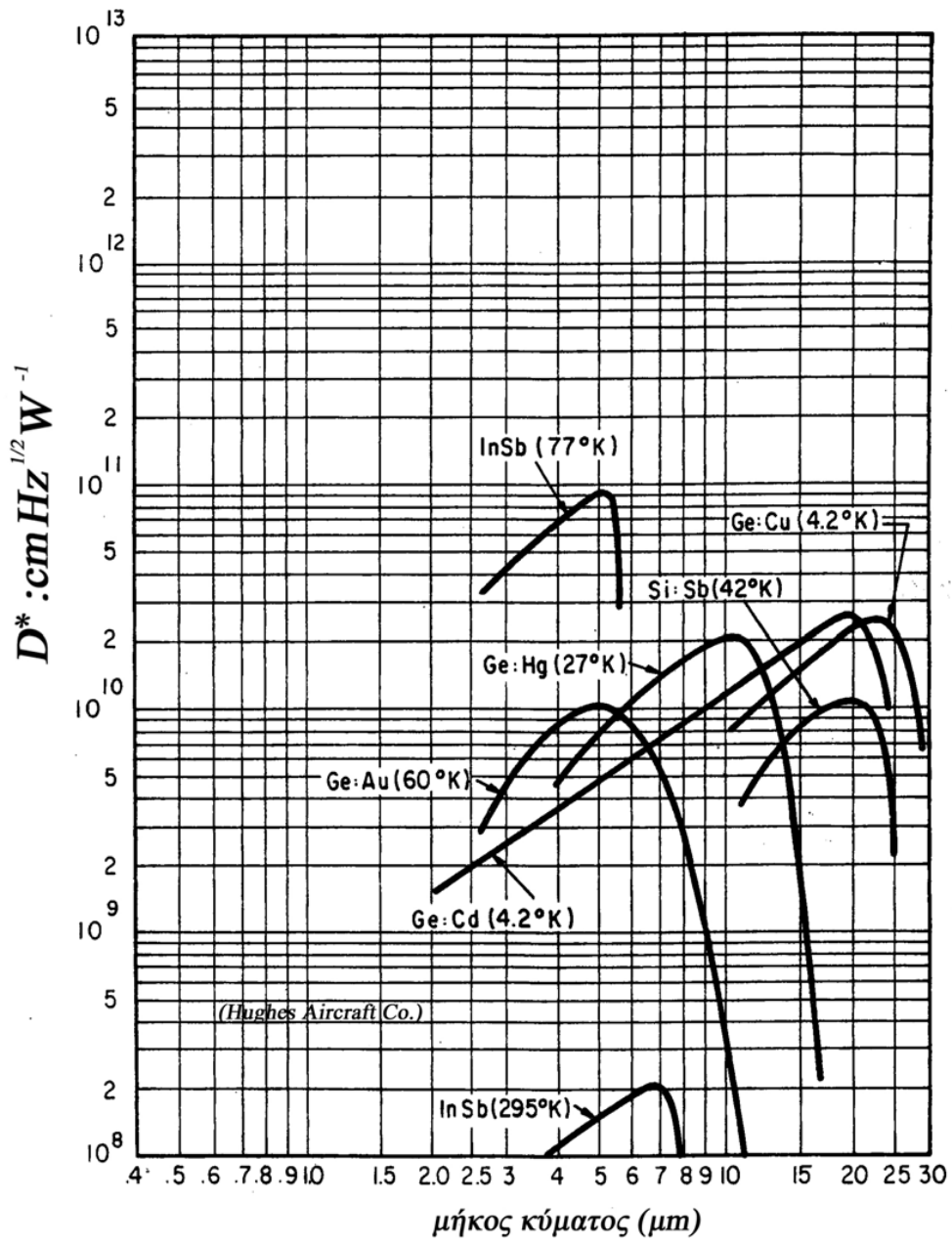


Σχήμα 31

Μια τρίτη παράμετρος είναι η **κανονικοποιημένη ανιχνευσιμότητα D^*** συναρτήσει του μήκους κύματος την οποία βλέπουμε για διάφορους ανιχνευτές στο (Σχ. 32 α) (για φωτοβολταϊκούς και θερμικούς) και στο (Σχ. 32 β) (για φωτοαγωγίμους). Το μέγεθος αυτό μας δίνει κατά τα γνωστά το λόγο S/N ανά τετραγωνικό εκατοστό επιφάνειας ανιχνευτή, για την περίπτωση που σ' αυτή πέφτει ροή ακτινοβολίας 1 Watt. Η παράμετρος D^* όπως βλέπουμε έχει υψηλή τιμή για τους φωτοπολλαπλασιαστές, ενώ είναι σχετικά χαμηλή για τις θερμοπύλες.



Σχήμα 32 (α)



Σχήμα 32 (β)

Μια τέταρτη παράμετρος είναι η **αξιοπιστία**. Αξιοπιστία είναι η διαβεβαίωση ότι μια συσκευή θα εκτελέσει τις λειτουργίες της για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και υπό δεδομένες συνθήκες, και σημαντική έρευνα έχει γίνει για να βελτιωθεί η αξιοπιστία των φωτοανιχνευτών. Τα δύο μεγάλα βιομηχανικά πρότυπα για την δοκιμή αξιοπιστίας των ημιαγωγών είναι (1) "MIL. STD. 883C", και (2) η Bellcore (TA-TSY-00468). Το πρώτο πρότυπο είναι γενικής εφαρμογής για τη βιομηχανία ημιαγωγών, ενώ το δεύτερο έχει αναπτυχθεί ειδικά για τις οπτικές ίνες και τις οπτοηλεκτρονικές συσκευές. Οι δοκιμές που πραγματοποιούνται σύμφωνα με το "MIL. STD. 883C" περιλαμβάνουν τις ακόλουθες κύριες ομάδες: (1) περιβαλλοντικές δοκιμές (π.χ., αντοχή στην υγρασία, κάψιμο, στεγανοποίηση, σημείο δρόσου, θερμικό σοκ), (2) μηχανικών δοκιμών (π.χ., σταθερή επιτάχυνση, μηχανικό σοκ, δονήσεις, συγκολλητικότητα, και αντοχή δεσμών υλικού) και (3) ηλεκτρικές δοκιμές (π.χ., τάση διάσπασης, μετρήσεις του χρόνου μετάβασης, ρεύματα εισόδου, χωρητικότητα και ταξινόμηση ευαισθησίας στην ηλεκτροστατική εκκένωση (ESD)).

Σύμφωνα με την Bellcore, κάθε παρτίδα φωτοανιχνευτή υποβάλλεται σε οπτική επιθεώρηση, οπτικό και ηλεκτρικό χαρακτηρισμό, και στη συνέχεια γίνεται διαλογή (δηλαδή αν ανταποκρίνεται στα προκαθορισμένα πρότυπα) . Ο οπτικός έλεγχος αφαιρεί οποιαδήποτε φωτοδίοδο με ελαττωματικούς δεσμούς υλικού ή ρωγμές στο γυάλινο παράθυρο ή στο μονωτικό φιλμ. Εκτός από τις ηλεκτρικές και οπτικές δοκιμασίες που γίνονται σε κάθε φωτοδίοδο, αυτές θερμαίνονται στους 200°C για 20 ώρες στα -20V (ανάστροφη τάση).

Τέλος δε θα πρέπει να παραμελείται η εξέταση κι άλλων κριτηρίων είτε αναφορικά με τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως ο θόρυβος, η ταχύτητα απόκρισης, είτε ακόμα και με άλλα δεδομένα, όπως είναι το κόστος. Η γνώση όλων των παραπάνω και η συνεχής ενημέρωση σχετικά με τις νέες εξελίξεις στον τομέα αυτό αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για την όσο το δυνατόν επιτυχέστερη εφαρμογή των διατάξεων αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 Έντυπες Πηγές

- Mark Johnson, “Photodetection and measurement: maximizing performance in optical systems”, Mc Graw Hill, United States of America 2003
- Hari Singh Nalwa, “Photodetectors and fiber optics”, Academic Press, United States of America 2001
- Victor Ryzhii, “Intersubband infrared photodetectors”, World Scientific Publishing, Singapore 2003
- Józef Piotrowski - Antoni Rogalski, “High-operating-temperature infrared photodetectors”, SPIE Press, United States of America 2007
- Govind P. Agrawal, “Lightwave technology: components and devices, Volume 1”, John Wiley & Sons, Canada 2004
- Daniela Dragoman - Mircea Dragoman, “Advanced optoelectronic devices”, Springer Publications, Germany 1999
- Pierre Ruterana - Martin Albrecht - Jörg Neugebauer, “Nitride

semiconductors: handbook on materials and devices”, John Wiley & Sons, Germany 2003

- Hans-Georg Weber - Masataka Nakazawa, “Ultrahigh-speed optical transmission technology”, Springer Publications, New York 2007
- Shun Lien Chuang, “Physics of photonic devices”, John Wiley & Sons, Canada 2009
- M. Razeghi - Mohamed Henini, “Optoelectronic devices: III-nitrides”, Elsevier Ltd., Netherlands 2004
- S. M. Sze - Kwok Kwok Ng, “Physics of semiconductor devices”, John Wiley & Sons, Canada 2007
- Jia-Ming Liu, “Photonic devices”, Cambridge University Press, United Kingdom 2005
- K. K. Choi, “The physics of quantum well infrared photodetectors”, World Scientific Publishing, Singapore 1997
- Horst Zimmermann, “Silicon optoelectronic integrated circuits”, Springer Publications, Germany 2004
- Sudhanshu Shekhar Jha, “Perspectives in optoelectronics”, World Scientific Publishing, Singapore 1995
- Bishnu P. Pal, “Fundamentals of fibre optics in telecommunication and sensor systems”, Bohem Press, India 2005

- Stephen B. Alexander, “Optical communication receiver design”, IET, Washington 1997
- Information Gatekeepers Inc, “Fiber Optics User's Manual & Design Series”, Boston 1981
- Εγκυκλοπαίδεια “ Άλφα ” , Α' Έκδοση (1993) – Εκδόσεις Άλφα
- Εγκυκλοπαίδεια “ Μαθηματική Υδρία ” , (1992) – Εκδόσεις Γ.Αξιωτελλης & ΣΙΑ ΕΠΕ
- Εγκυκλοπαίδεια “ Γνωρίζω ” , (1988) – Εκδόσεις Κ. Κουμουνδουρέας
- Εγκυκλοπαίδεια “Τεχνική Εγκυκλοπαίδεια ” , (1982) – Εκδόσεις Αλκυών
- Εγκυκλοπαίδεια “ Πάπυρος Λαρούς Μπριτανικά ” , (1994) – Εκδόσεις Πάπυρος Γραφικές Τέχνες ΑΕ

7.2 Ηλεκτρονικές Πηγές

- Fordham University, 2010, ανάκτηση από:
http://www.fordham.edu/academics/programs_at_fordham/_chemistry/courses/fall_2010/physical_chemistry_i/lectures/photoelectric_6309.asp
 στις: 7/9/2010
- Brigham Young University, Department of Electrical & Computer Engineering, 2009, ανάκτηση από:
<http://www.cleanroom.byu.edu/OpticalCalc.phtml>
 στις: 6/9/2010

- Aigen Li, “Interaction of Nanoparticles with Radiation”, 2004, ανάκτηση από:
<http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Sept03/Li/Li4.html>
στις: 6/9/2010
- Encyclopedia of Laser Physics and Technology, 2010, ανάκτηση από:
<http://www.rp-photonics.com/photodetectors.html>
στις: 6/9/2010
- Hyperphysics, 2010, ανάκτηση από:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electronic/photdet.html>
στις: 7/9/2010
- Astroparticle, 2010, ανάκτηση από:
<http://astroparticle.aspera-eu.org>
στις: 7/9/2010
- Sulak L. R., “Antares: Pursuing a Path of Discovery”, 2003, ανάκτηση από:
<http://antares.in2p3.fr>
στις: 6/9/2010
- University of Hawaii, 2003, ανάκτηση από:
<http://www.phys.hawaii.edu/~dumand/>
στις: 6/9/2010

- Fowler M., “The Photoelectric Effect”, University of Virginia, 1986, ανάκτηση από:
http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric_effect.html
στις: 7/9/2010
- Siemens, 2010, ανάκτηση από:
<http://www.siemens-home.gr/>
στις: 7/9/2010
- Photonics, 2010, ανάκτηση από:
<http://www.photonics.com/>
στις: 7/9/2010
- Εφαρμογές φωτοανιχνευτών, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.diagramma.gr>
http://www.microplanet.gr/tutorials/sensors/object_rec/uvtron
στις: 14/5/2011
- Υπεριώδης- υπέρυθη ακτινοβολία, 2011, ανάκτηση από:
<http://el.wikipedia.org>
στις: 14/5/2011
- Photodetector and Optical Receiver, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.cnu.ac.kr>
στις: 15/10/2011
- Silicon photomultiplier as an alternative for APD in PET-MRI applications, 2008, ανάκτηση από:
<http://www.ieee.org>
στις: 21/10/2011

- Encyclopedia of Laser Physics and Technology - photodetectors, photodiodes, phototransistors, pyroelectric photodetectors, array, powermeter, noise, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.rp-photonics.com>
στις: 23/10/2011
- Photodetectors, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.alrad.co.uk>
στις: 24/10/2011
- Optical Communication Photodiodes and Receivers, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.osioptoelectronics.com>
στις: 25/10/2011
- Photodiode-Parameters-Characteristics, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.osioptoelectronics.com>
στις: 1/11/2011
- Photonic Devices and Systems, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.seu.edu.cn>
στις: 2/11/2011
- INF, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.ifm.com>
στις: 3/11/2011
- Lidar, 2011, ανάκτηση από:
<http://el.wikipedia.org>
στις: 5/11/2011

- Φωτοαντοστάσεις, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.anagnosg.gr>
στις: 20/11/2011
- Φωτοτρανζίστορ, 2011, ανάκτηση από:
<http://users.auth.gr/>
<http://www.electroniccircuits.gr/>
στις: 20/11/2011
- Πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές, 2011, ανάκτηση από:
<http://users.auth.gr>
στις: 21/11/2011
- Υπεριώδεις ανιχνευτές, 2011, ανάκτηση από:
<http://www.chromatography-online.org>
στις: 23/11/2011
- Ολογραφικές μνήμες, 2011, ανάκτηση από:
magmat.physics.auth.gr
στις: 9/12/2011

- Organic Electronics, 2011, ανάκτηση από:
<http://nn.physics.auth.gr>
στις: 9/12/2011
- Κλισιόμετρο, 2011, ανάκτηση από:
sfhmmmy3.sfhmmy.gr/cd/data/p13.pdf
στις: 9/12/2011
- Αρχές λειτουργίας και εφαρμογές αισθητήρων θερμοκρασίας, 2011, ανάκτηση από:
nefeli.lib.teicrete.gr
στις: 9/12/2011
- Εφαρμογές αισθητήρων, 2011, ανάκτηση από:
<http://ifm.com>
στις: 9/12/2011
- Τηλεσκόπιο Hubble, 2011, ανάκτηση από:
lyk.gl-neron.att.sch.gr
στις: 16/12/2011

- Οπτικοί συζεύκτες, 2011, ανάκτηση από:

www.jaycar.com

στις: 17/12/2011

- Ανιχνευτές UV, 2011, ανάκτηση από:

www.wat.edu.pl

στις: 17/12/2011