

Αισθητήρες ορατής ακτινοβολίας

Γενικά, ο όρος ορατή ακτινοβολία αφορά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος στη φασματική περιοχή από 400 έως 700 nm (μπλε έως κόκκινο χρώμα). Είναι δηλαδή η φασματική περιοχή την οποία μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι, το οποίο και αποτελεί τον αρχαιότερο και απλούστερο (από πλευράς χρήσης) αισθητήρα ορατής ακτινοβολίας. Υπάρχουν όμως αρκετοί περιορισμοί στις ικανότητες του ματιού ως αισθητήρα όπως:

- i) δεν μπορεί να κάνει ποσοτικές μετρήσεις
- ii) δεν παρουσιάζει ομοιόμορφη απόδοση σε όλη την ορατή περιοχή (έχει μέγιστη απόκριση στο πράσινο, στα 500 nm δηλαδή).
- iii) Δεν βλέπει στην περιοχή του υπεριώδους (πάνω από τα 200 nm) έως και την περιοχή του κοντινού υπερύθρου (μέχρι τα 1500 nm περίπου).

Σε αυτό το σημείο αρχίζει να γίνεται απαραίτητη η χρήση αισθητήρων ορατής ακτινοβολίας ή όπως ονομάζονται φωτοανιχνευτών.

Προτού όμως δούμε δύο βασικούς εκπροσώπους των φωτοανιχνευτών, αξίζει να αναφερθούμε στα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ορατή ακτινοβολία. Τα μεγέθη αυτά προέρχονται από κλασικά μεγέθη περιγραφής της ΗΜ ακτινοβολίας, με την ταυτόχρονη επίδραση όμως της απόκρισης του ματιού.

- i) Βασικό μέγεθος είναι η φωτεινή ισχύς Φ με μονάδα το Lumen, μία τροποποιημένη ισχύς ώστε να περιέχει και την απόκριση του ματιού σε σχέση με το μήκος κύματος. Σαν παράδειγμα, 1 W στα 550 nm αντιστοιχεί σε 680 Lumen.
- ii) Άλλο μέγεθος είναι η φωτεινή ένταση I με μονάδα το Candela. Η φωτεινή ένταση ορίζεται ως η φωτεινή ισχύς ανά μονάδα στερεάς γωνίας, οπότε για ισοτροπική εκπομπή από την πηγή, ισχύει $\Phi=4\pi I$.

iii) Τέλος, υπάρχει και η ένταση φωτισμού (ή απλά φωτισμός) με μονάδα το Lux, η οποία ορίζεται ως η φωτεινή ισχύς ανά μονάδα επιφανείας ($\text{Lux}=\text{Lumen}/\text{m}^2$).

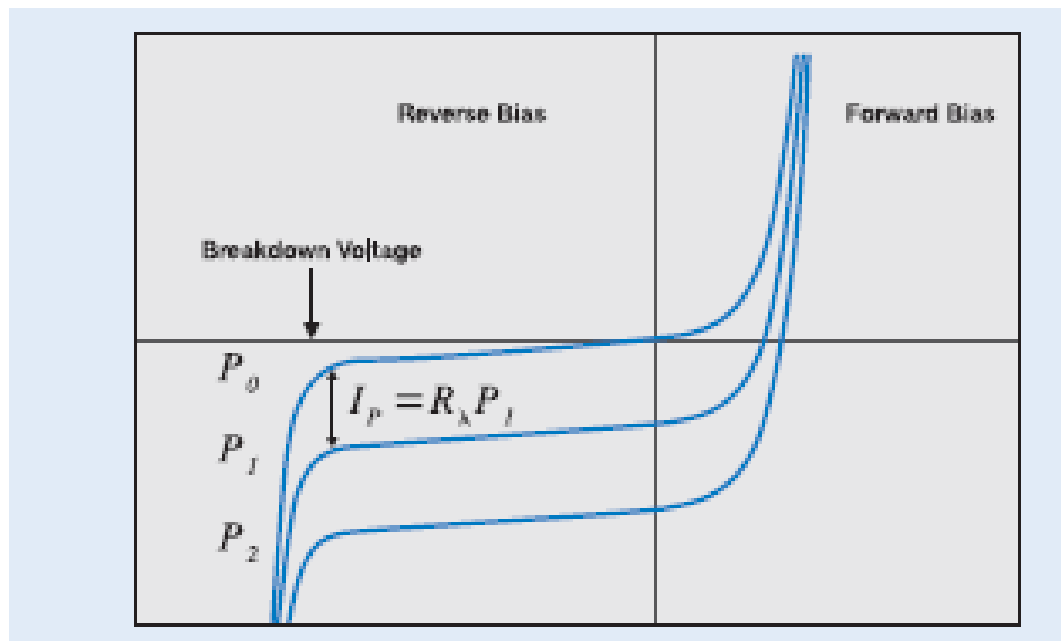
Ενδεικτικά αναφέρεται ο φωτισμός μερικών πηγών:

- φεγγάρι 0.03 Lux,
- λάμπα υπνοδωματίου 100 Lux,
- φωτισμός σπιτιού 300-500 Lux
- καλά φωτισμένο γραφείο 500-1000 Lux
- λίγο πριν την ανατολή του ήλιου στην εξοχή την άνοιξη 10000 lux
- παραλία με ήλιο 100000 Lux.

Σε σχέση τώρα με τους αισθητήρες ορατής ακτινοβολίας, υπάρχει μεγάλο πλήθος από αυτούς οι οποίοι διαφέρουν ως προς τον τρόπο ανίχνευσης, την φασματική περιοχή λειτουργίας, το αν δίνουν ενισχυμένη έξοδο ή όχι.

Η ανίχνευση μπορεί να βασίζεται σε: φωτοεκπομπή (φωτολυχνία), δημιουργία ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου από το φως (φωτοδίοδος), θερμικά φαινόμενα (ανιχνευτές υπέρυθρου)

Ο απλούστερος φωτοανιχνευτής είναι η φωτοδίοδος. Όπως λέει και το όνομα της, πρακτικά μοιάζει με μία συνηθισμένη δίοδο και κατασκευάζεται συνήθως από πυρίτιο (λειτουργία από το ορατό προς το υπέρυθρο) ή γερμάνιο (λειτουργία στο υπέρυθρο). Όταν είναι πολωμένη ανάστροφα, το ρεύμα στην έξοδο είναι σχεδόν ανάλογο του φωτισμού που προσπίπτει. Όταν δεν φωτίζεται, μπορεί να διαρρέεται από πολύ μικρό ρεύμα, το ονομαζόμενο ρεύμα σκότους.

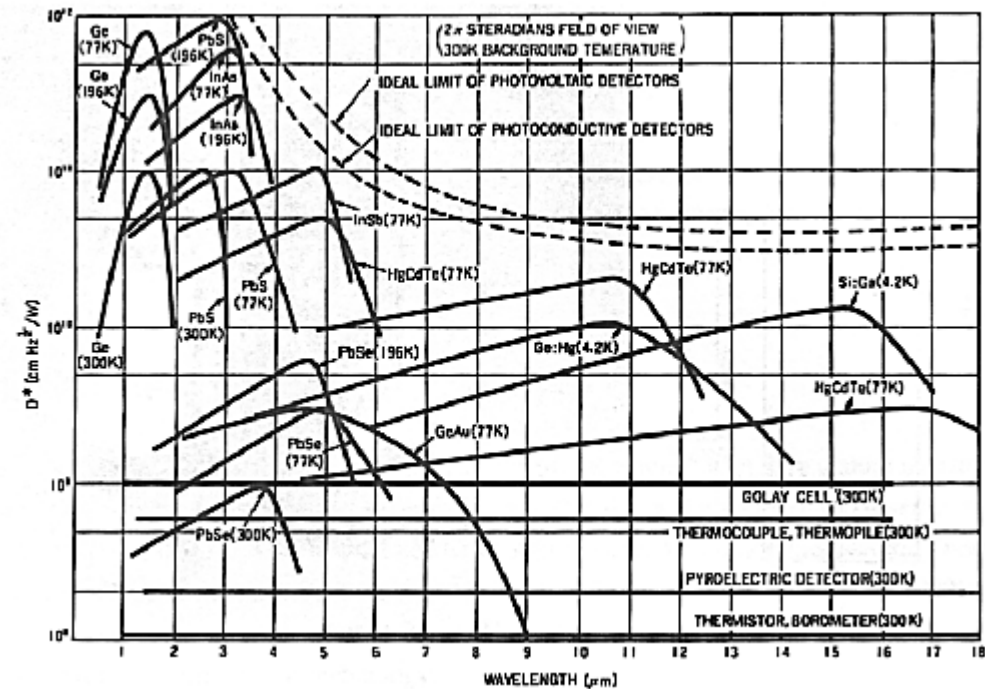
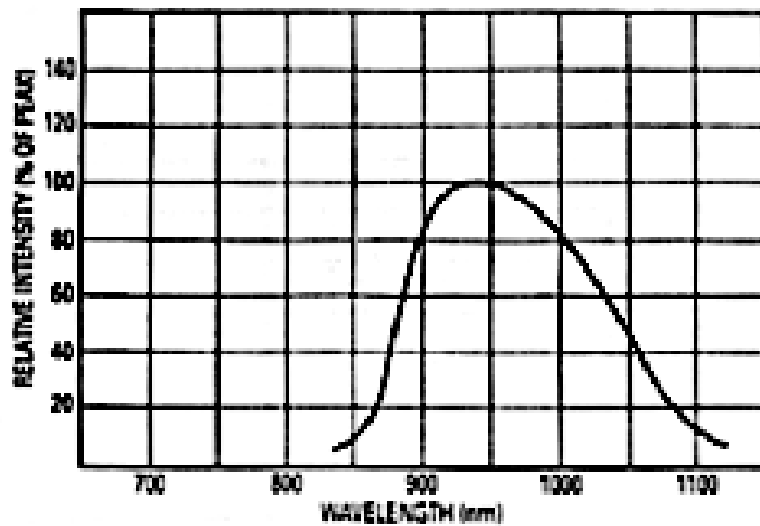


Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες φωτοδιόδων όπως PIN, Schottky κλπ, έχουν πολύ γρήγορη απόκριση (nsec) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε φωτοαγώγιμη (με πηγή) είτε σε φωτοβολταϊκή (η

φωτοδίοδος είναι η πηγή) διάταξη.

Ένας βασικός παράγοντας στην λειτουργία της φωτοδίοδου είναι η εξάρτηση της ευαισθησίας της από το μήκος κύματος, η οποία σχετίζεται με τις ενεργειακές καταστάσεις του υλικού κατασκευής. Σαν αποτέλεσμα, κάθε φωτοδίοδος είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε συγκεκριμένη φασματική περιοχή, οπότε το κριτήριο αυτό είναι βασικό για την επιλογή μας.

Σήμερα υπάρχουν διαθέσιμες στη αγορά πολλές κατηγορίες φωτοδιόδων που καλύπτουν όλες τις φασματικές περιοχές. Ταυτόχρονα, κατά τη λειτουργία της και για διαφορετικές τιμές της οπτικής ισχύος που προσπίπτει, το ρεύμα είναι διαφορετικό για την ίδια τάση πόλωσης V . Τελικά, το ρεύμα είναι ανάλογο της οπτικής ισχύος που προσπίπτει.



Ανάλογα με το υλικό τους και τις ενεργειακές του καταστάσεις, οι φωτοανιχνευτές παρουσιάζουν διαφορετική εξάρτηση της απόδοσης από το μήκος κύματος.

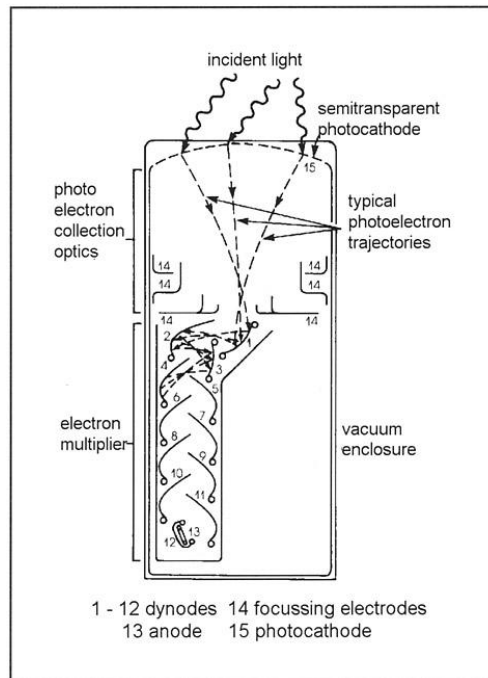


Fig. 4.1 Schematic of a photomultiplier tube.

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος με σύστημα δυνόδων (φωτοπολλαπλασιαστής).

Σε κάθε περίπτωση, ένας φωτοανιχνευτής προσδιορίζεται από την φασματική απόκριση, την ικανότητα φωτομετατροπής (A/W), την ενίσχυση, την χρονική απόκριση και το ρεύμα σκότους.

A) Ικανότητα φωτομετατροπής (responsivity) σε A/W

Στα υλικά που χρησιμοποιούνται, αν η ενέργεια του φωτονίου $h\nu$ είναι μικρότερη δεν υπάρχει ρεύμα. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} h\nu < E_g &\Rightarrow I=0 \\ h\nu \geq E_g &\Rightarrow I=I_g \end{aligned} \quad \lambda_g (\mu\text{m}) \leq \frac{1.24}{E_g (\text{eV})}$$

Χαρακτηριστικές τιμές: Si $\lambda_g=1.1 \mu\text{m}$, Ge $\lambda_g=1.85 \mu\text{m}$ και CdS $\lambda_g=0.52 \mu\text{m}$.

Αν κάθε φωτόνιο που πέφτει στο υλικό δημιουργεί ένα ηλεκτρόνιο, τότε η ιδανική ικανότητα φωτομετατροπής R_0 δίνεται από:

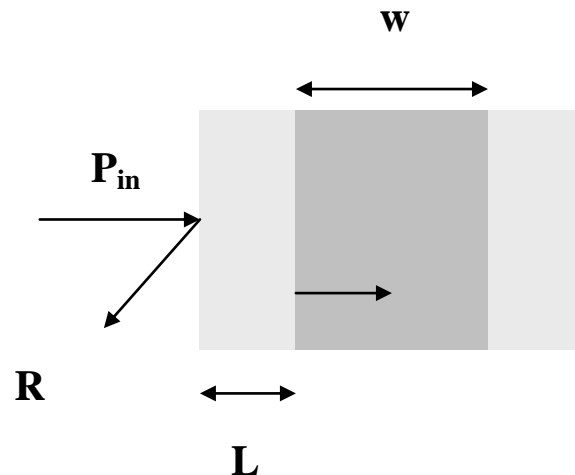
$$R_0 = \frac{I_\lambda}{P_{\text{in}}} = \frac{ne}{nh\nu} = \frac{e}{h\nu} \quad \left(\approx \frac{\lambda(\mu\text{m})}{1.24} \right)$$

I_λ το παραγόμενο ρεύμα, P_{in} η εισερχόμενη ισχύς, e το φορτίο του ηλεκτρονίου και n ο αριθμός των φωτονίων.

Στην πράξη όμως υπάρχει η κβαντική απόδοση η που επηρεάζει την ικανότητα φωτομετατροπής, καθώς η τελική τιμή της R δίνεται από:

$$R = \eta R_0$$

Έστω ότι ο ανιχνευτής έχει τη μορφή του σχήματος, όπου w το πάχος του φωτοευαίσθητου στρώματος που παρουσιάζει απορρόφηση a_0 , L το μήκος του εξωτερικού στρώματος προστασίας που παρουσιάζει απορρόφηση a και R ο συντελεστής ανάκλασης της επιφάνειας.



Η ακτινοβολία που θα απορροφάται θα δίνεται από:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{in}} \times (1 - R) \times e^{-aL} \times \left(1 - e^{-a_0 W}\right)$$

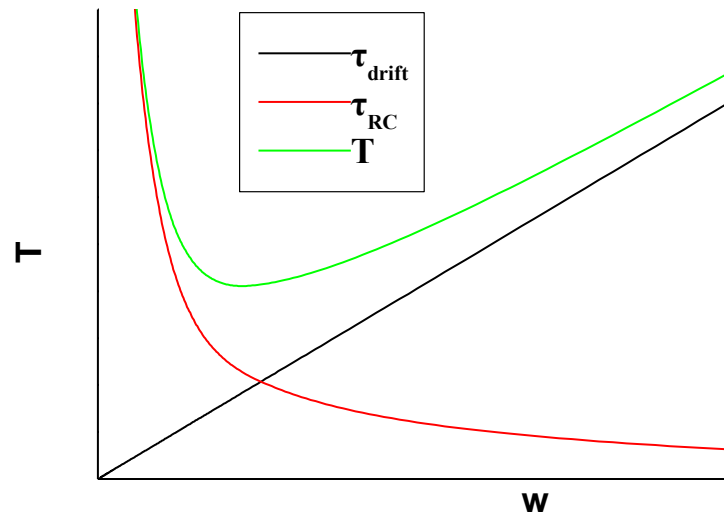
Συνήθως:

- **(1-R) έχει τιμή 0.7, εκτός αν υπάρχει αντανακλαστικό στρώμα, οπότε το (1-R) φτάνει το 0.9.**
- **e^{-aL} έχει τιμή περίπου 0.9 για εξωτερικό στρώμα πάχους 0.1 μm**
- **$(1 - e^{-a_0 W})$ έχει τιμή στην περιοχή 0.8 έως 0.99, ανάλογα με το πάχος του φωτοευαίσθητου στρώματος και το υλικό.**

Σαν αποτέλεσμα, η κβαντική απόδοση έχει τιμές από 0.5 έως 0.6 περίπου, άρα επηρεάζεται σημαντικά και η ικανότητα φωτομετατροπής.

B) Χρονική απόκριση.

Η χρονική απόκριση της απλής φωτοδιόδου επηρεάζεται από δύο παράγοντες, τον χρόνο που απαιτούν οι φορείς φορτίου για να μετακινηθούν και την απόκριση του κυκλώματος που έχει συμπεριφορά RC. Δηλαδή, ο χρόνος απόκρισης T δίνεται από: $T = \tau_{\text{trans}} + \tau_{\text{RC}}$



όπου $\tau_{\text{trans}} = w/u_{\text{drift}}$ και $\tau_{\text{RC}} = RC$, με το C να είναι αντιστρόφως ανάλογο του w . Δηλαδή, η μεταβολή του χρόνου απόκρισης με το χρόνο θα έχει μορφή και θα υπάρχει ένα ιδανικό πάχος όπου η απόκριση γίνεται πιο γρήγορη.

Η φωτοδίοδος είναι μία δίοδος p-n, η οποία είναι όμως αργή (πλάτος ζώνης μερικά GHz) Για να αυξηθεί η ταχύτητα απόκρισης φτιάχνουμε φωτοδίοδο p-i-n, όπου το πλάτος ζώνης φτάνει τα 100 GHz. Επίσης, για να αυξηθεί το φωτόρευμα, φτιάχνουμε δίοδο Avalanche (APD), η κβαντική απόδοση πολλαπλασιάζεται επί M, με το M να φτάνει την τιμή 100.

Εκτός από το φωτοδίοδο, ένας άλλος ιδιαίτερα απλός φωτοανιχνευτής είναι η φωτοαντίσταση. Η λειτουργία της βασίζεται στο φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας, δηλαδή, τα φως που προσπίπτει σε αυτή, αυξάνει την αγωγιμότητα της μέσω της παραγωγής ηλεκτρονίων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε φωτοαντιστάσεις είναι CdS, CdSe, PbS, Si κλπ. Σε σχέση με την διακριτική της ικανότητα, αξίζει να σημειωθεί ότι το CdSe έχει αντίσταση MΩ στο σκοτάδι, η οποία γίνεται μόλις 10 Ω για φωτισμό μερικών χιλιάδων Lux. Η φωτοναντίσταση χρησιμοποιείται σε μορφή διαιρέτη τάσης.