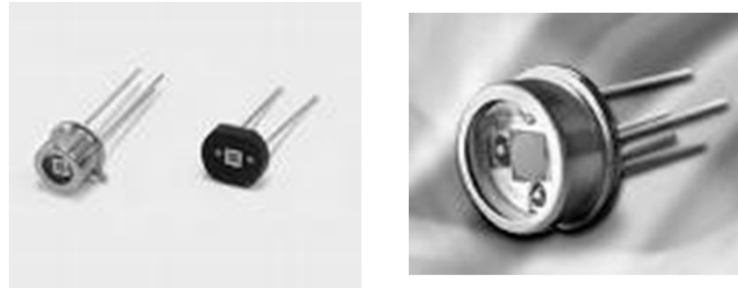


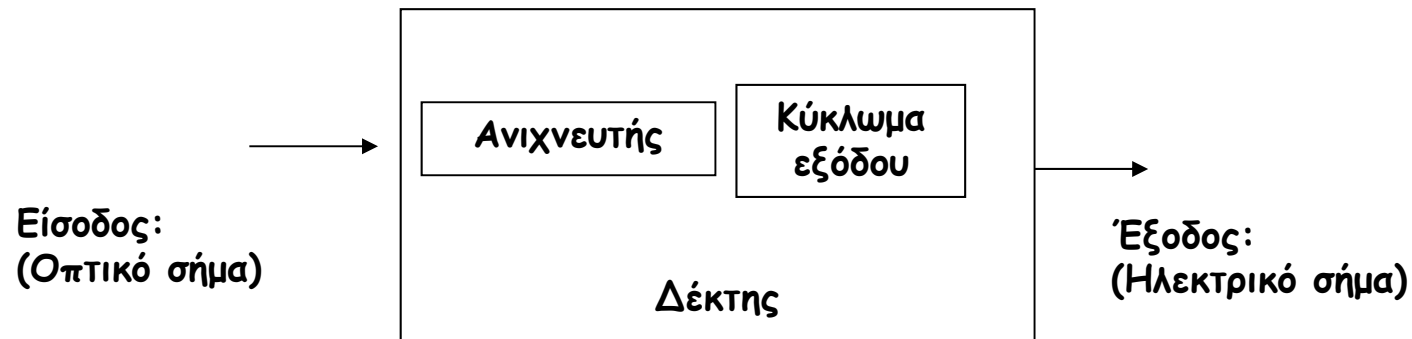
ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ, ΔΙΚΤΥΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

6^η & 7 Διάλεξη: Οπτικός δέκτης

- Φωτοανιχνευτές ημιαγωγών
- Χαρακτηριστικά φωτοανιχνευτών
- Θόρυβος ανιχνευτή
- Έλεγχος απόδοσης ζεύξης



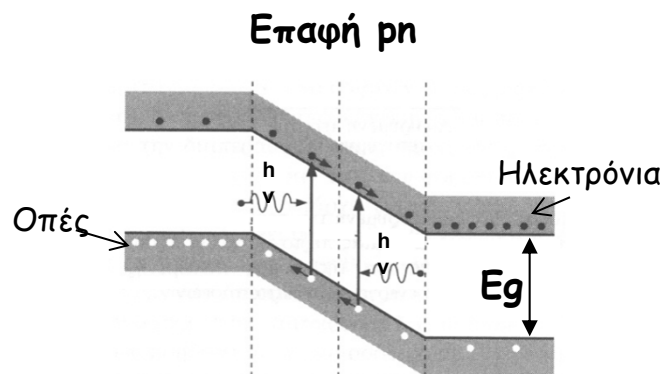
Οπτικός Δέκτης



Λειτουργίες δέκτη:

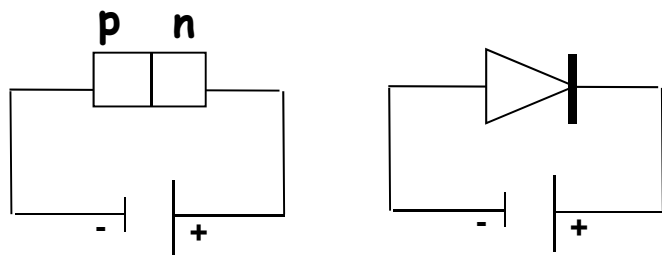
- Ανίχνευση φωτός
- Έλεγχος απόδοσης ζεύξης και ανάκτηση δεδομένων
- Ενίσχυση

Φωτοανιχνευτής ημιαγωγών (Επαφή pn)

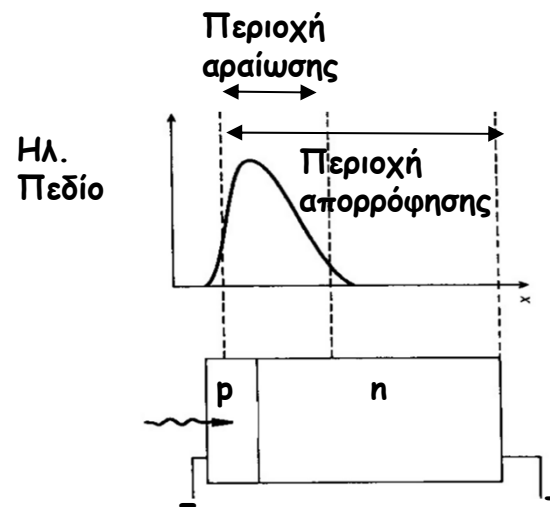


Φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια χάσματος (E_g) απορροφάται με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου - οπής.

Ανάστροφα πολωμένη επαφή pn



Αν η επαφή είναι ανάστροφα πολωμένη τα δύο φορτία δεν επανασυνδέονται αλλά κινούνται σε αντίθετες κατεύθυνσης με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος (φωτόρευμα I_Φ)



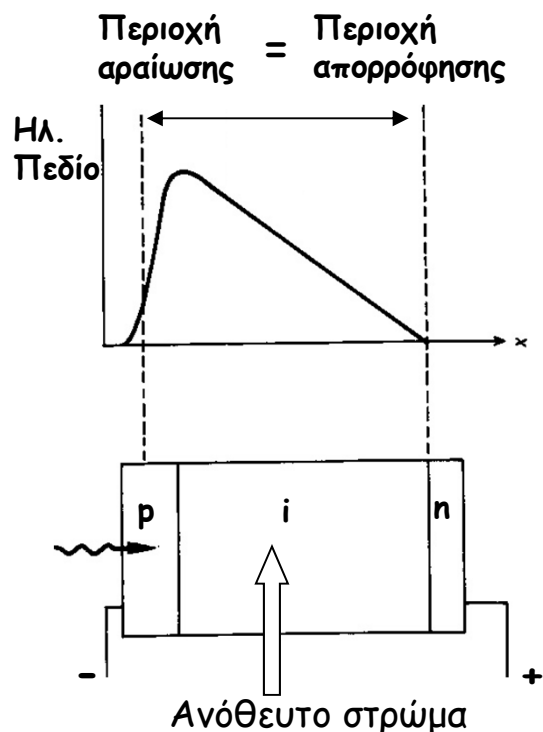
Απορρόφηση φωτονίου στην περιοχή αραίωσης
 ⇒ μετατοπιζόμενα ηλεκτρόνια

Απορρόφηση φωτονίου έξω από την περιοχή αραίωσης
 ⇒ διαχεόμενα ηλεκτρόνια

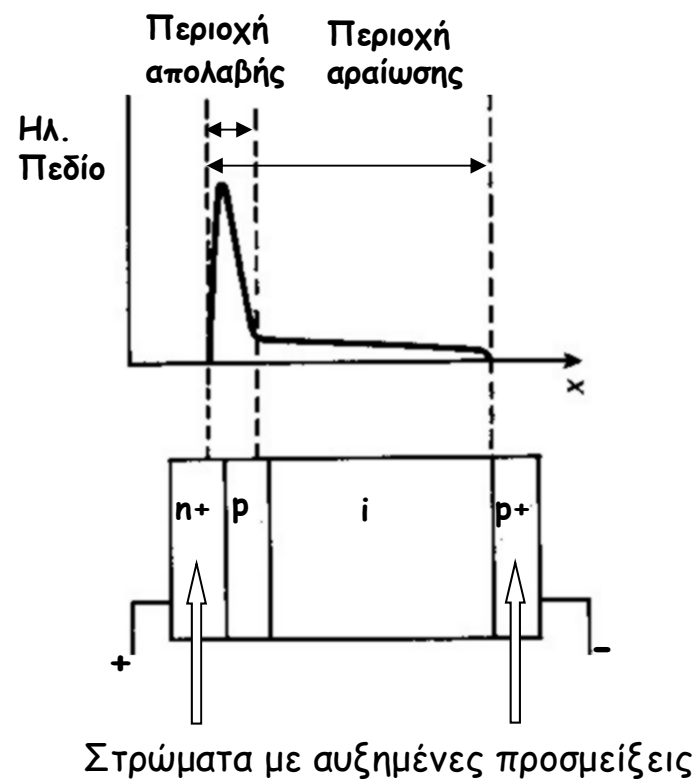
Η απορρόφηση φωτονίων έξω από την περιοχή αραίωσης μειώνει την ταχύτητα απόκρισης της

Φωτανιχνευτές pin και χιονοστιβάδας

Στο φωτοανιχνευτή pin ελαχιστοποιούνται τα φωτόνια που απορροφώνται έξω από την περιοχή αραίωσης με αποτέλεσμα ο αριθμός των διαχεόμενων ηλεκτρονίων να ελαχιστοποιείται.



Στους φωτοανιχνευτές χιονοστιβάδας (APD-Avalanche PhotoDiodes) λόγω του πολύ υψηλού πεδίου στην περιοχή απολαβής, τα παραγόμενα ηλεκτρόνια αποκτούν αυξημένη κινητική ενέργεια και μπορούν να παράγουν δευτερεύοντα ηλεκτρόνια μέσω ιονισμού με κρούση.



Χαρακτηριστικά φωτανιχνευτών Ι

Αποκρισιμότητα ρ (A/W)

$$I_{\Phi} = \rho P_A$$

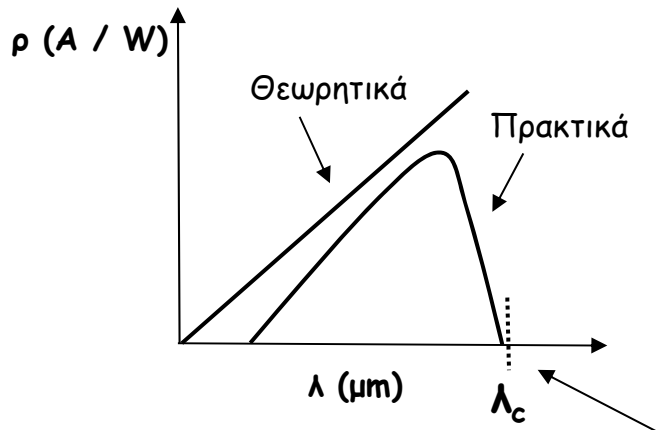
όπου I_{Φ} είναι το φωτόρευμα και P_A η οπτική ισχύς που ανιχνεύεται.

Κβαντική απόδοση η (%) $\eta = \frac{\text{αριθμός ηλεκτρονίων}}{\text{αριθμός Φωτονίων}} = \frac{I_{\Phi} / e}{P_A / h\nu} = \frac{h\nu}{e}$

Άρα η αποκρισιμότητα (Θεωρητικά)

$$\rho = \frac{\eta e \lambda}{hc} = \frac{\eta \cdot \lambda}{1240}$$

Σχέση αποκρισιμότητας - μήκους κύματος



Επιπλέον πρέπει: $E_{\text{ΦΩΤΟΝΙΟΥ}} \geq E_g \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} \geq E_g$

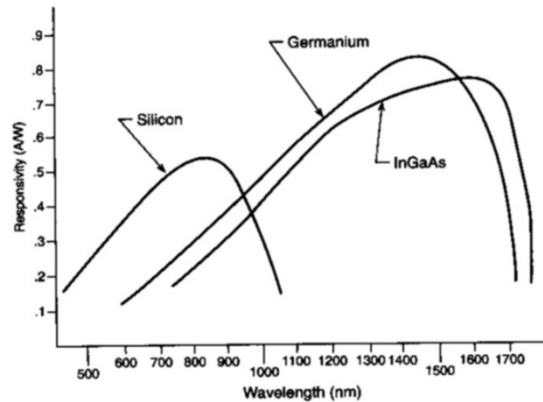
$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$$

Πρακτικά

Μήκος κύματος αποκοπής ανίχνευσης

Χαρακτηριστικά φωτανιχνευτών ΙΙ

Φασματική απόκριση



Material	Wavelength Range (μm)	Bandgap Energy (eV)
Si	0.6-1.10	1.12
Ge	0.9-1.85	0.67
GAlnP	0.64-0.68	1.82-1.94
GaAs	0.87	1.43
AlGaAs	0.8-0.9	1.4-1.55
InGaAs	1.0-1.3	0.95-1.24
InGaAsP	0.9-1.7	0.73-1.35

Εύρος ζώνης 3dB ανιχνευτή

Το εύρος ζώνης ενός ανιχνευτή καθορίζεται από την ταχύτητα με την οποία αποκρίνεται στις μεταβολές της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος

$$f_{3dB} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{0.35}{\tau} \text{ αφού } \tau = 2.2 \cdot R \cdot C$$

όπου ο χρόνος απόκρισης τ καθορίζεται από τη μετάβαση των ηλεκτρονίων (μετατόπιση / διάχυση) και το ηλεκτρονικό κύκλωμα του ανιχνευτή

Ρεύμα σκότους $I_{σκ}$

ο Παράγεται στον ανιχνευτή απουσία οπτικού σήματος.

ο Οφείλεται στο παρασιτικό φως ή στη θερμική δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου - οπής

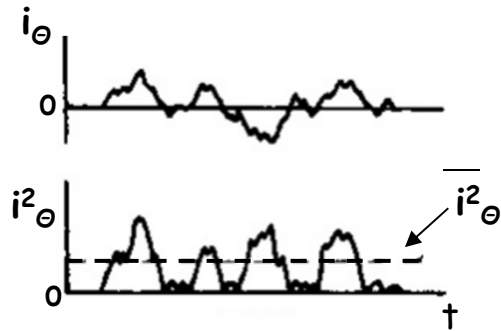
ο Πρέπει να έχει πολύ μικρή τιμή σε σχέση με το φωτόρευμα

Ασκήσεις εξάσκησης

- Όταν 3×10^{11} φωτόνια μήκους κύματος $0,85 \mu\text{m}$ προσπίπτουν σε φωτοδίοδο, περίπου 1.2×10^{11} ηλεκτρόνια συλλέγονται στα άκρα της συσκευής. Να υπολογίσετε την κβαντική απόδοση και την αποκρισσιμότητα της δίοδου σε αυτό το μήκος κύματος.
- Έστω φωτοδίοδος με κβαντική απόδοση 65% για την ανίχνευση φωτονίων ενέργειας $1.5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.
 - α) Ποιο είναι το μήκος κύματος της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας ;
 - β) Να υπολογίσετε την προσπίπτουσα οπτική ισχύ που παράγει φωτόρευμα ίσο με $2.5 \mu\text{A}$ όταν η φωτοδίοδος λειτουργεί όπως περιγράφεται παραπάνω.
- Να υπολογίσετε την ελάχιστη ανιχνεύσιμη οπτική ισχύ για δίοδο pin με αποκρισσιμότητα $0,5 \text{ A/W}$ και ρεύμα σκότους 1 nA

• Δίδεται $h=6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, $1e=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ αλλά και $1 \text{ ev}= 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Θόρυβος



\bar{i}_θ^2 : η μέση τιμή του τετραγώνου του ρεύματος θορύβου

Είδη θορύβου

➤ Θερμικός θόρυβος (ή θόρυβος Johnson) \bar{i}_J^2

$$\bar{i}_J^2 = \frac{4KT_K f_{3dB}}{R}$$

όπου:

K: σταθερά Boltzmann
 T_K : Θερμοκρασία (Kelvin)
 f_{3dB} : εύρος ζώνης 3dB ανιχνευτή
R: αντίσταση φορτίου

➤ Θόρυβος βολής \bar{i}_B^2

$$\bar{i}_B^2 = 2ef_{3dB}(I_\Phi + I_{\Sigma K})$$

όπου:

I_Φ : ρεύμα ανιχνευτή (φωτόρευμα)
 $I_{\Sigma K}$: ρεύμα σκότους
e: φορτίο ηλεκτρονίου

Έλεγχος απόδοσης ζεύξης

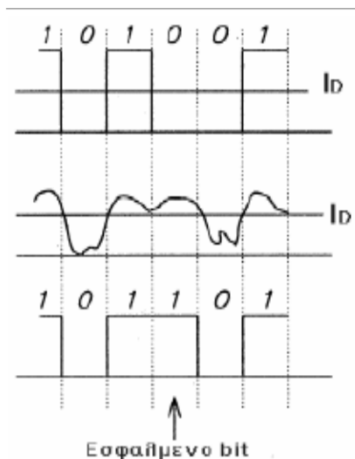
➤ Λόγος σήματος προς θόρυβο **SNR** (Signal to Noise Ratio) -για αναλογικό σήμα

$$\text{SNR} = \frac{\text{Μέση ισχ ύς σήματος}}{\text{Μέση ισχ ύς θορύβου}} = \frac{I_{\Phi}^2}{\bar{i}_J^2 + \bar{i}_B^2}$$

➤ Ρυθμός εσφαλμένων bit **BER** (Bit Error Rate)-για ψηφιακό σήμα

$$\text{BER} = \frac{\text{Αριθμος λανθασμ ένων bit}}{\text{Αριθμος συνολικ ών bit}}$$

Όριο: **BER** $\leq 10^{-9}$ δηλαδή επιτρέπεται η λανθασμένη αναγνώριση ενός bit στα 1 δισεκατομμύριο bits



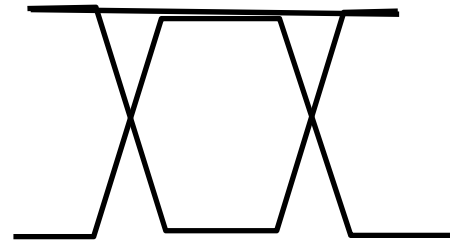
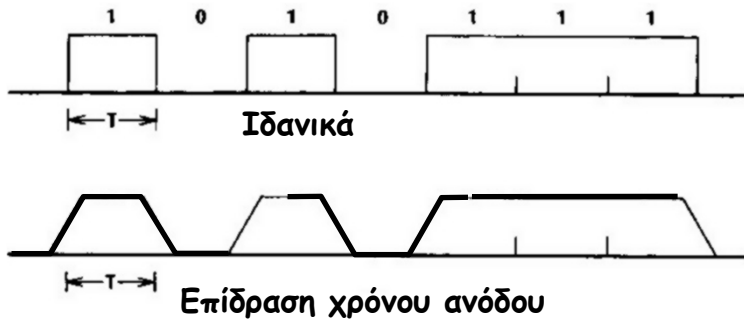
Το σήμα συγκρίνεται με μια τιμή κατωφλίου I_D για την αναγνώριση των τιμών 1 και 0

Ασκήσεις εξάσκησης

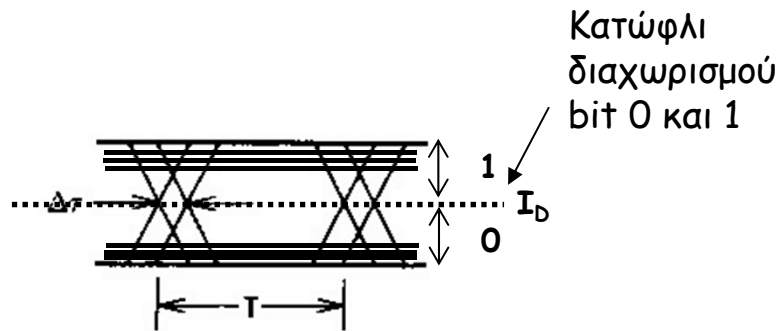
- Μία φωτοδίοδος P_{in} ενός οπτικού δέκτη έχει κβαντική απόδοση 60% σε μήκος κύματος 0.9 μm . Το ρεύμα σκότους είναι 3nA και η αντίσταση φορτίου 4K Ω . Η προσπίπτουσα φωτεινή ισχύς σε αυτό το μήκος κύματος είναι 200 nW και το εύρος ζώνης του δέκτη 5MHz. Συγκρίνετε το θόρυβο βολής στη φωτοδίοδο με το θερμικό θόρυβο στην αντίσταση φορτίου σε θερμοκρασία 20 °C.
- Για το παραπάνω παράδειγμα να υπολογίστε το λόγο σήματος προς θόρυβο θεωρώντας ότι ο οπτικός δέκτη δεν περιλαμβάνει ενισχυτή.

Διάγραμμα οφθαλμού

Οπτική απεικόνιση της επίδρασης του θορύβου, του χρόνου ανόδου και του χρονικού τρέμουλου (jitter) στην απόδοση ψηφιακής οπτικής ζεύξης



Το διάγραμμα οφθαλμού προκύπτει αν απεικονίσουμε σε υπέρθεση, στην οθόνη ενός παλμογράφου, με σταθερό διάστημα σκανδαλισμού (trigger) τους παλμούς που ανιχνεύονται.



Επίδραση θορύβου και χρονικού τρέμουλου Δt



Μάτι "ανοιχτό"



Μάτι "κλειστό"