



# ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

## Μάθημα 10ο

## Φωτοφωρατές

Αρ. Τσίπουρας, Phd  
Email: [aris@di.uoa.gr](mailto:aris@di.uoa.gr)



# Περιεχόμενα

- **Φωτοδέκτες- φωτοφωρατές**
- **Υλικά φωτοφωρατών**
- **Χαρακτηριστικές παράμετροι φωτοφωρατών**
- **Τύποι φωτοφωρατών**
- **Τυπο φωτοφωρατών για τηλεπικοινωνίες**
  - Φωτοδίοδος PIN
  - Φωτοδίοδος APD
  - Φωτοδιόδοι εμπορίου
- **Ο οπτικός δέκτης**



# Φωτοφωρατές

- Φωτοφωρατές (photodetector PD): κάθε διάταξη που στην είσοδο της λαμβάνει φως και στην έξοδό της δίνει ένα ηλεκτρικό μέγεθος (τάση , ρεύμα, αντίσταση) με τιμη που εξαρτάται από κάποιο χαρ. Μέγεθος της φωτοδέσμης ( $I$ ,  $\varphi$ ,  $\lambda$  )
- Φωτοφωρατές = Ο/Ε μετατροπείς ή Ο/Θερμικοί μετατροπείς δηλ. Μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων σε θερμότητα και δευτερογενώς σε ηλεκτρικό μέγεθος
- Συνεπώς υπάρχουν δυο είδη φωτοφωρατών:
  - **Κβαντικοί**
  - **Θερμικοί**



# Κβαντικοί φωτοφωρατές

- Οι κβαντικοί φωτοφωρατές βασίζονται στην αλληλεπίδραση των φωτονίων (κβάντων φωτός) και των επίσης κβαντισμένων ηλεκτρονίων
    - **Φωτοφωρατές εσωτερικής δράσης:** Η αλληλεπίδραση γίνεται στο εσωτερικό της μαζας των PD (φωτοβολταικοί – φωτοστοιχεία φωτοδίοδοι, φωτοτρανζίστορ, φωτοαντιστάσεις)
    - **Φωτοφωρατές εξωτερικής δράσης:** Η αλληλεπίδραση γίνεται στην επιφάνεια του υλικού των PD (φωτοκύτταρα – φωτοπολλασιαστές)
- Οι παραπάνω φωτονικές διαδικασίες θέλουν μια συγκεκριμένη ελάχιστη ενέργεια φωτονίων για να ενεργοποιηθούν. Συνεπώς δεν λειτουργούν πάνω από ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος ( $\lambda$  αποκοπής)



# Θερμικοί φωτοφωρατές

- Η απορρόφηση του φωτός αυξάνει τη θερμοκρασία της συσκευής και η μεταβολή αυτή οδηγεί στη μεταβολή παραμέτρου που εξαρτάται από τη θερμοκρασία
- Η έξοδος των θερμικών φωτοφωρατών είναι ανάλογη του ποσού ενέργειας που απορροφούν
- Βασίζονται στο φαινόμενα:
  - Seebeck: θέρμανση επαφής δυο μετάλλων προκαλεί ροή ρεύματος - Θερμοζεύγη
  - Αλλαγή της ηλ. Αντίστασης ενός υλικού με την μεταβολή της θερμοκρασίας - βολόμετρα
  - Μεταβολή των μαγνητικών ιδιοτήτων συγκεκριμένων υλικών (TGS) – πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές
- Έχουν χαμηλή ταχύτητα απόκρισης και χρησιμοποιούνται σε συστήματα υψηλής ισχύος (laser CO<sub>2</sub>)



## Χαρακτηριστικά μεγέθη και παραμέτροι

- Ο θόρυβος
- Στις ραδιοηλεκτρικές συχνότητες κυριαρχεί ο θερμικός θόρυβος:  $N_t \sim KTRB$
- Στην οπτική περιοχή επειδή  $h\nu \gg kT$  και για δεδομένο ποσό ενέργειας σε δεδομένο χρόνο τα φωτόνια που φτάνουν σε ένα φ-φωρατή είναι πολύ λιγότερα από τα αντίστοιχα κβαντα που φτάνουν σε ένα ραδιοηλεκτρικό φωρατή. Ο μικρός αριθμός των λαμβανομένων φωτονίων έχει σαν αποτέλεσμα η άφιξη τους στον PD να παρουσιάζει τυχαιότητα  $\rightarrow$  Κβαντικός θόρυβος που οδηγεί στο αντίστοιχο ηλ. Μέγεθος να παρουσιάζει θόρυβο βολής
- ο κβαντικός θόρυβος είναι λευκός:  $N_q = eMBI_p$



## Χαρακτηριστικά μεγέθη και παραμέτροι

- Φωτοαποκρισιμότητα  $R$ : αποτελεί μέτρο της απόκρισης ενός φωτοφωρατή στο λαμβανόμενο φως. Μετρά την ικανότητα του φωτοφωρατή να μετατρέπει την φωτεινή ισχύ σε ηλεκτρική έξοδο.

$$R = s/P_{\phi}$$

- Εξαρτάται από το μήκος κύματος
- Εξαρτάται από τη συχνότητα διαμόρφωσης της φωτοδέσμης δεδομένου ότι οι φορείς έχουν περιορισμένους χρόνους ζωής

$$R = R_0 / 1 + (f_m \tau)^2$$

$f_m$  η συχνότητα διαμόρφωσης,  $\tau$  η σταθερά χρόνου του φωτοφωρατή



## Χαρακτηριστικά μεγέθη και παραμέτροι

- Ισοδύναμη ισχύς θορύβου NEP
- Μεγάλη σημασία έχει η ευαισθησία του φωτοφωρατή, δηλαδή ποσο μικρό οπτικό σήμα μπορεί να αντιληφθεί και να αποκριθεί δίνοντας αναγνωρίσιμη έξοδο
- Το ελάχιστο φωράσιμο σήμα εξαρτάται από τους περιορισμούς που θέτει ο εσωτερικός θόρυβος του φ-φωρατή
- Η NEP ορίζεται ως το ελάχιστο σήμα που δίνει στην έξοδο του φ-φωρατή  $SNR=1$ :

$$NEP = \frac{N_B}{\sqrt{B}} \quad [WHz^{-1/2}], \quad B \text{ το ευρος ζώνης του οπτ. σήματος}$$





# Χαρακτηριστικά μεγέθη και παραμέτροι

- εύκολα αποδεικνύεται:

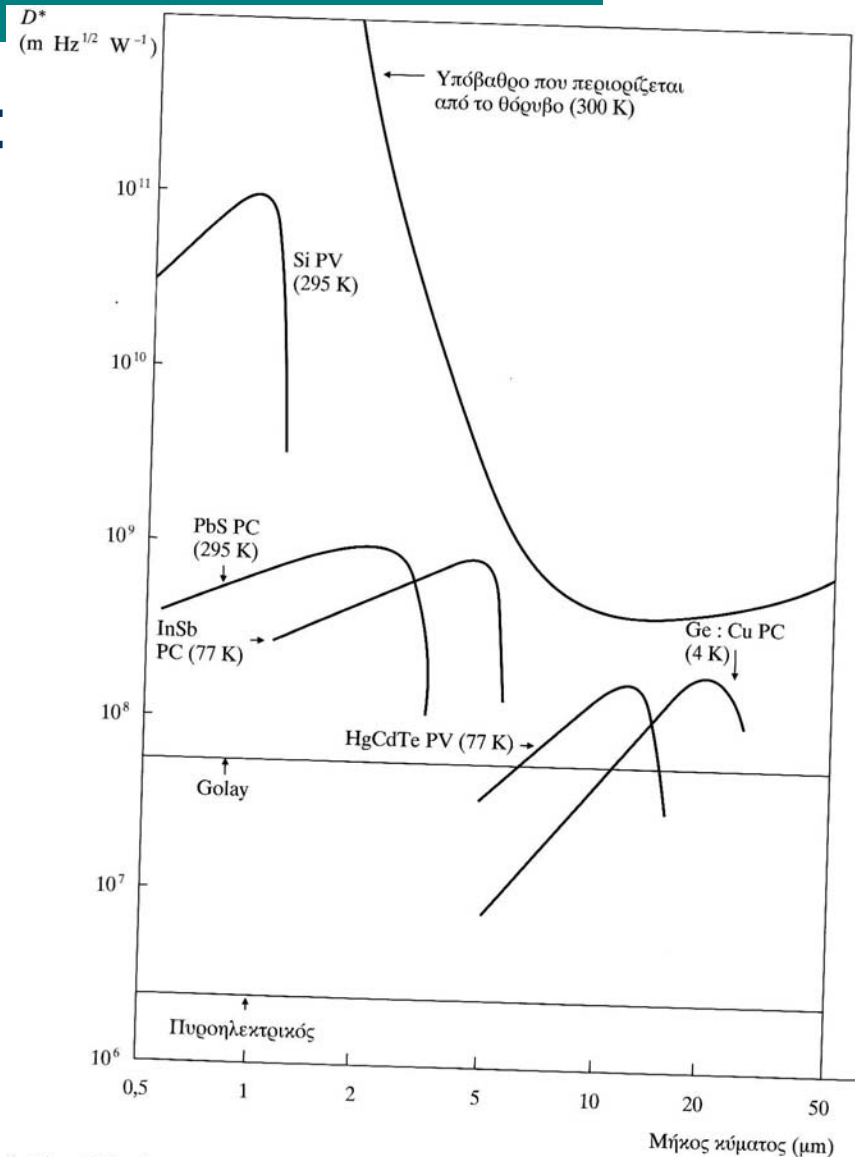
$$NEP = \frac{I_d}{\sqrt{BR}}$$

- Συνήθως χρησιμοποιείται η παράμετρος:  $D^* \sim 1/NEP$

## ειδική ανιχνευτική ικανότητα

- που λαμβάνει υπόψη της και την ενεργό επιφάνεια του φ-φωρατή

$$D^* = \frac{\sqrt{ABR}}{I_d}$$



Κ. 7.1 Ειδική ανιχνευτική ικανότητα  $D^*$  ως συνάρτηση του μήκους κύματος για έναν αριθμό τιπροσωπευτικών ανιχνευτών (φωτοαγώγιμος - PC, φωτοβολταϊκός - PV).



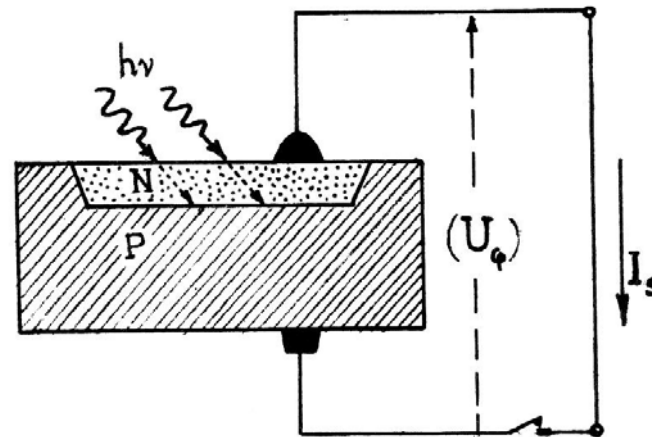
# Κβαντικοί φ- φωρατές

- **Φωτοβολταϊκοί φωρατές**
- Το φωτοενεργό σώμα βρίσκεται στην περιοχή απογύμνωσης μιας επαφής PN και τα προσπίπτοντα φωτόνια παράγουν ζεύγη e-h που τροποποιούν το φράγμα δυναμικού της επαφής. Η τάση ανοικτού κυκλώματος της επαφής  $V_{\phi}$  αποτελεί μετρό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας



# Κβαντικοί φ-φωρατές

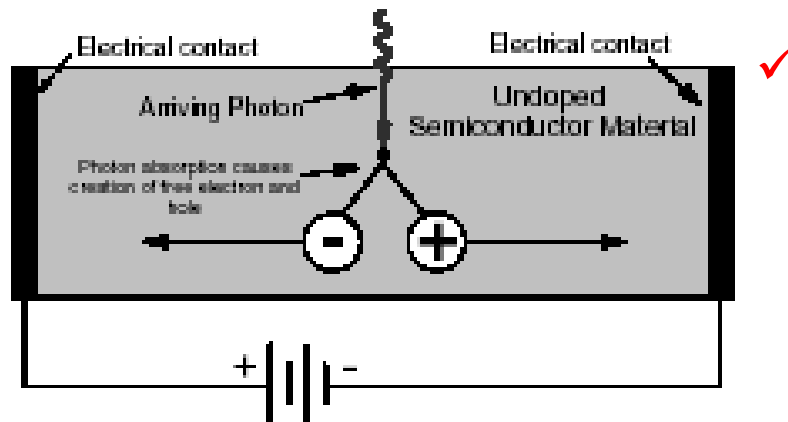
- Φωτοστοιχεία
- Ηλιακά στοιχεία [ $10 \text{ A/m}^2$  και  $V_{\text{cell}}=0,6 \text{ V}$ ]



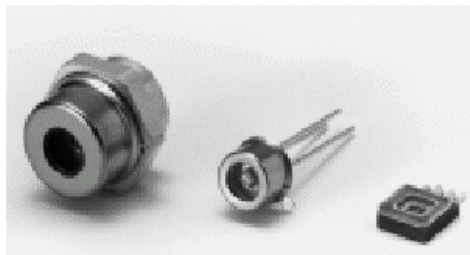
Σχ.70. Σχηματική τοπολογία φωτοστοιχείου.



# ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΙ PN



Ημιαγωγικοί φωτοδιόδοι εμπορίου



➤ Είναι ουσιαστικά μια LED  
**Πολωμένη ανάστροφα**

➤ Βασίζεται στο φαινόμενο της απορρόφησης φωτονίων

➤  $h\nu > E_g$

➤ This means that semiconductor materials are exclusively used in lightwave systems. In these, photons are absorbed to generate electron-hole (e-h) pairs producing a photo-current



# Υλικά φωτοφωρατών

Ενέργεια χάσματος  $E_g$  [eV] διαφόρων ημιαγωγών στους 300 °K

## GaAs

Gallium arsenide 1.43

## Ge

Germanium 0.67

## InAs

Indium arsenide 0.35

## InP

Indium phosphide 1.35

## $\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$

Indium gallium arsenide 0.75

## $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$

Indium gallium arsenide 1.15

## $\text{In}_{1-0.45y}\text{Ga}_{0.45y}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$

Indium gallium arsenic phosphide 0.75 – 1.65

## Si

Silicon 1.14



## ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΦΩΡΑΤΩΝ για Τηλεπικοινωνίες

- ✓ Αποκρισιμότητα όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σε συνδυασμό με ικανοποιητικά χαρακτηριστικά θορύβου.
- ✓ Ταχύτητα απόκρισης ικανή για να καλύψει το ρυθμό μετάδοσης.
- ✓ Χαμηλό κόστος



## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΦΩΤΟΦΩΡΑΤΩΝ

□ Η κβαντική απόδοση (quantum efficiency)  $\eta$  που ορίζεται ως το πηλίκο του αριθμού των παραγόμενων ηλεκτρονίων ( $N_e$ ) προς τον αριθμό των προσπιπτόντων φωτονίων ( $N_p$ ).

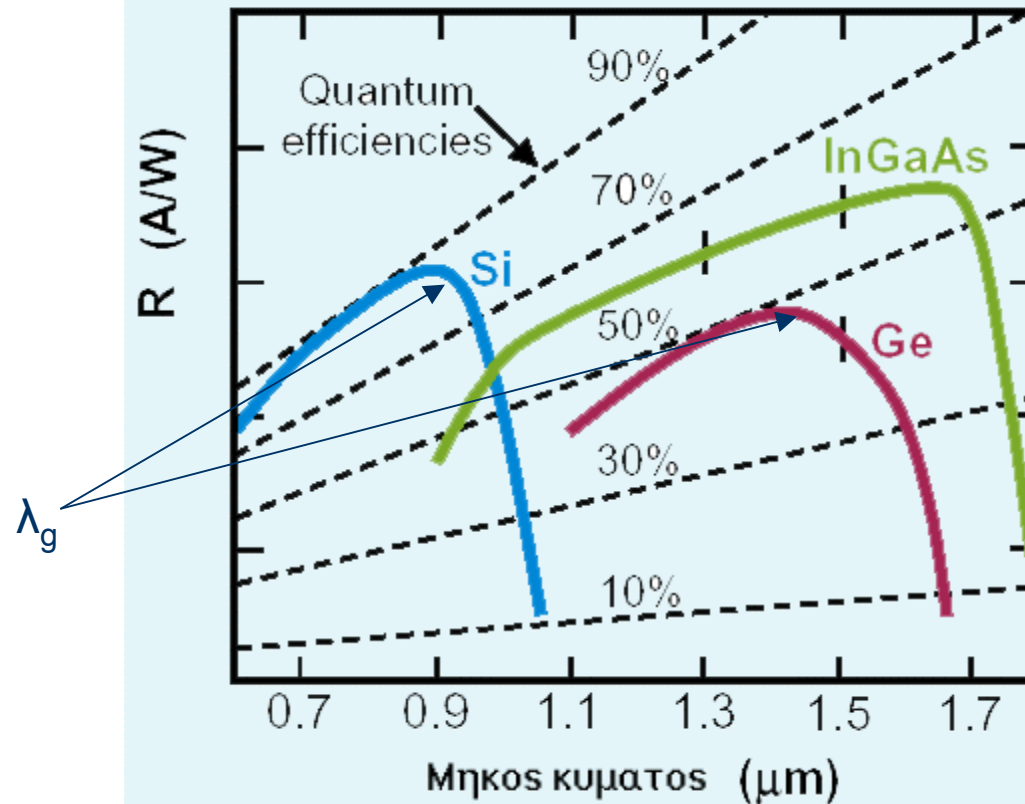
□ Η αποκρισιμότητα  $R$  που ορίζεται από τη σχέση:  $R = \mu \frac{i_{ph}}{P_{ph}}$  [W/A] όπου  $i$  το φωτόρευμα,  $P$  η προσπίπτουσα στην επαφή φωτεινή ισχύς και  $\mu$  ο συντελεστής ενίσχυσης ( $\ll 1$ ). Η αποκρισιμότητα του φωτοφωρατή εξαρτάται ισχυρά από το μήκος κύματος. Ακόμη:

$$R = \eta \frac{q}{h\nu} = \eta \frac{\lambda}{1.24} \text{ [where } \lambda \text{ in } \mu\text{m}]$$

□ Ο χρόνος που χρειάζονται οι ηλεκτρικοί φορείς για να διασχίσουν την περιοχή απογύμνωσης, που ουσιαστικά καθορίζει την ταχύτητα απόκρισης της διάταξης, δηλαδή το εύρος ζώνης του φωτοφωρατή. Τυπικές τιμές της είναι από 100 ps έως μερικές δεκάδες ns.



# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΦΩΤΟΦΩΡΑΤΩΝ

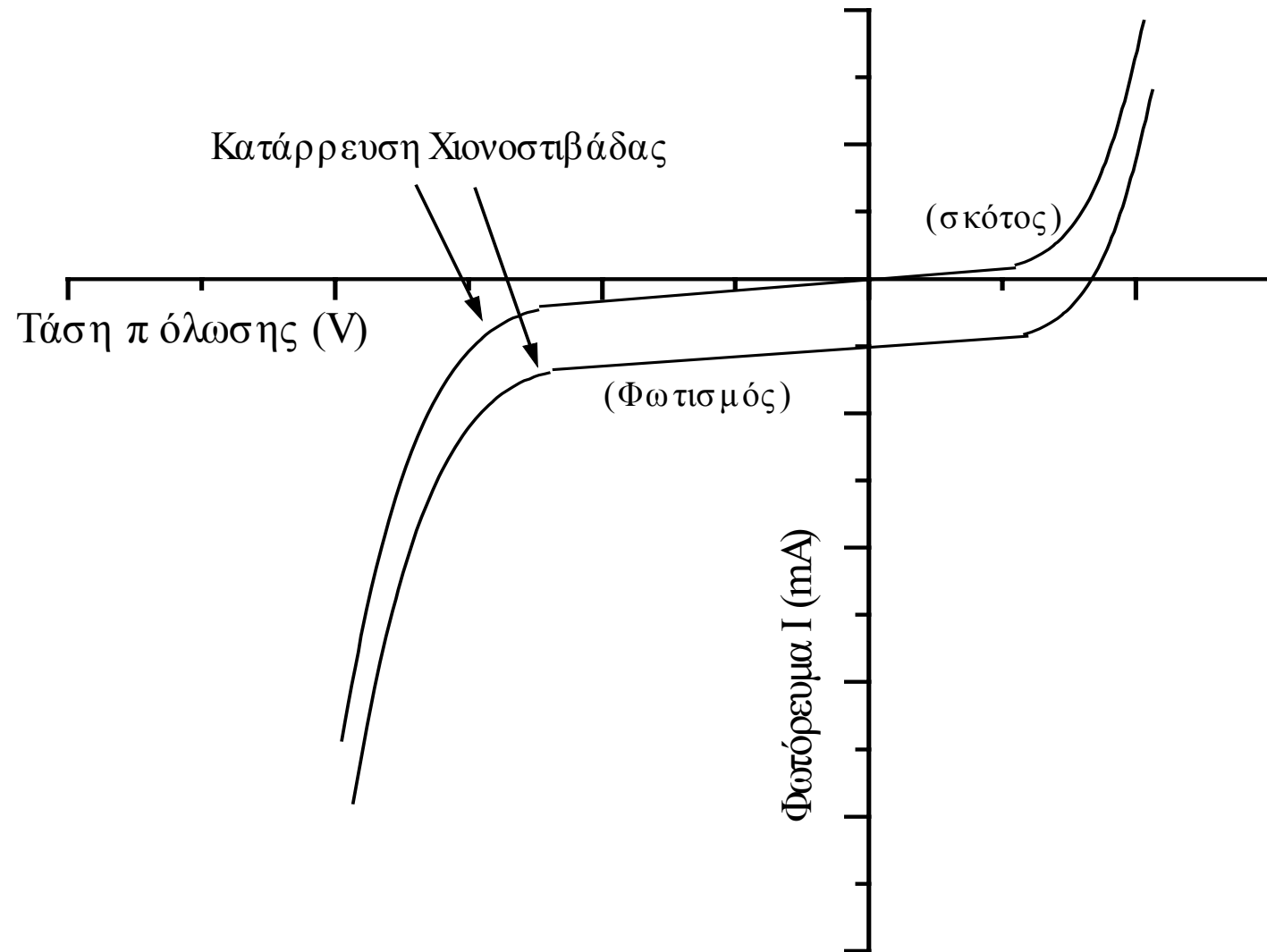


- ❑  $R$  increases with  $\lambda$  until  $h\nu = E_g$
- ❑ For short wavelength systems ( $\lambda < 900$  nm) Si or GaAs material can be used
- ❑ At 1.3 and 1.55  $\mu\text{m}$ , InGaAs is the most common material.



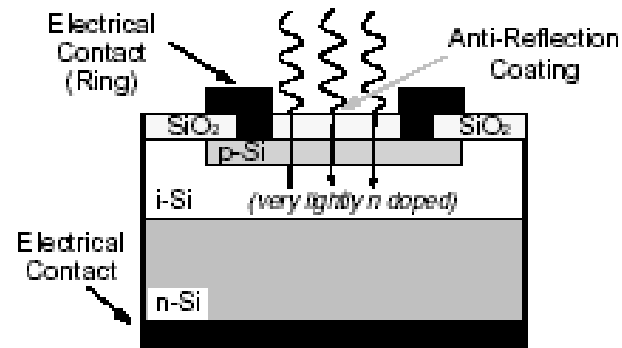
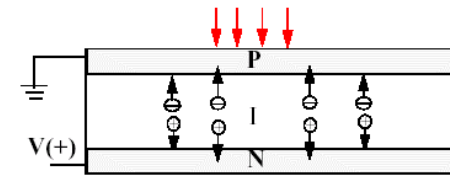
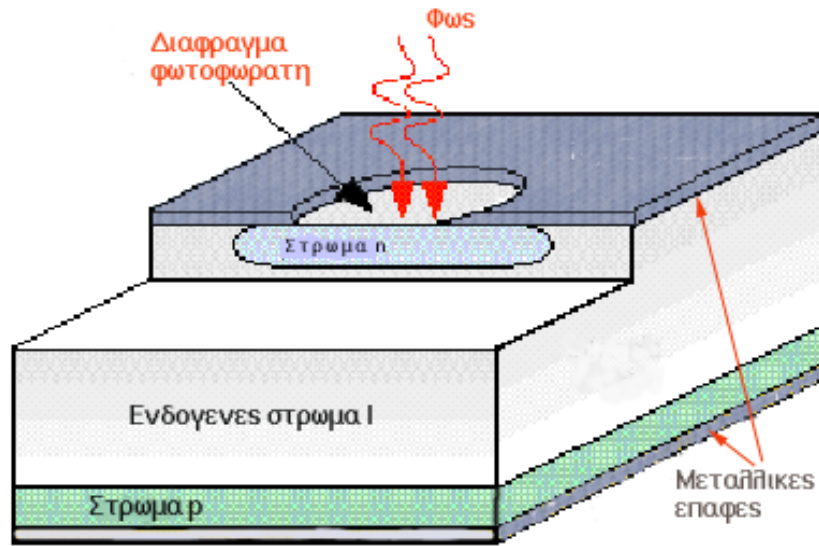


# Πόλωση Φωτοφωρατών



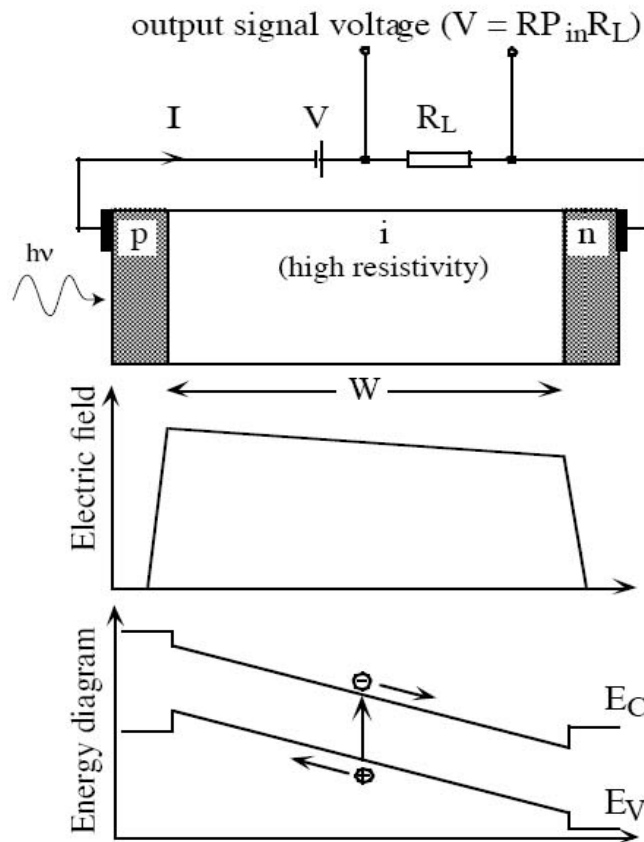


# ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ PIN





# ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ PIN



absorbption of photon  
↓  
e-h pair generation  
↓  
carriers drift due to built-in and applied field  
↓  
induced current in the external curcuit

A p-i-n diode is a p-n junction with an intrinsic (undoped) layer.

Response time is limited by transit time through the i-region:

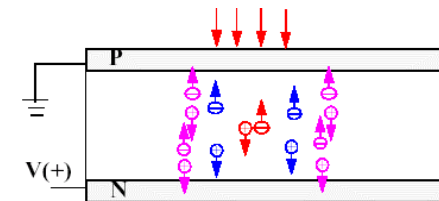
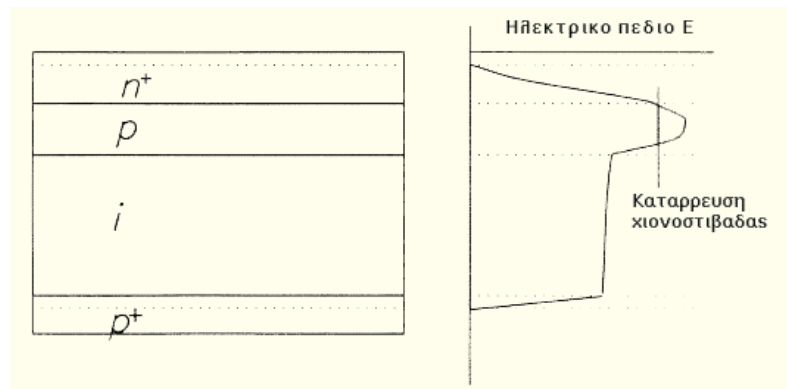
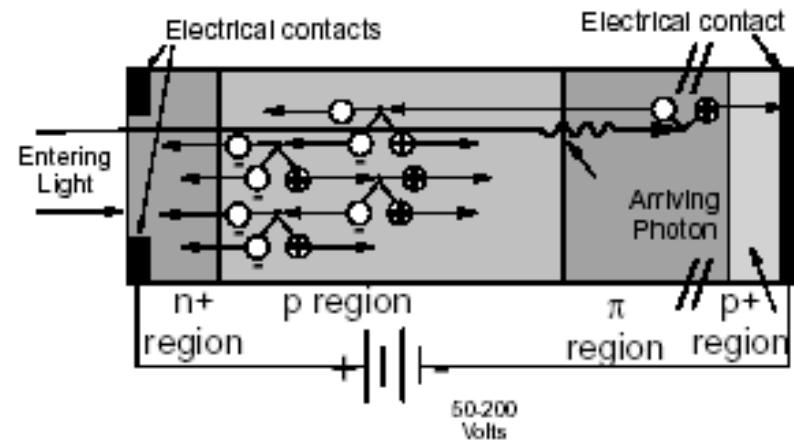
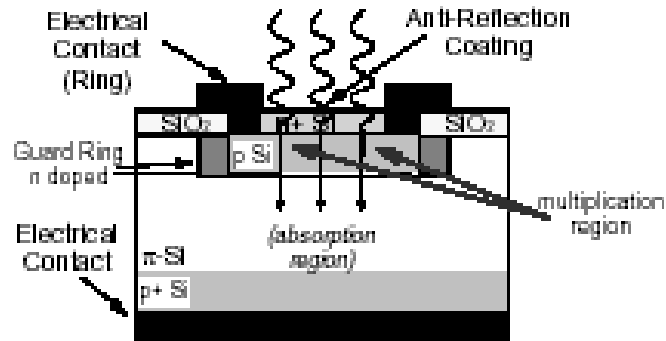
$$\tau_{tr} = \frac{W}{v_s}$$

Responsivity increases with W, thus a trade off between responsivity and speed.

High speed (>10GHz) diodes with  $\eta=100\%$  is available.



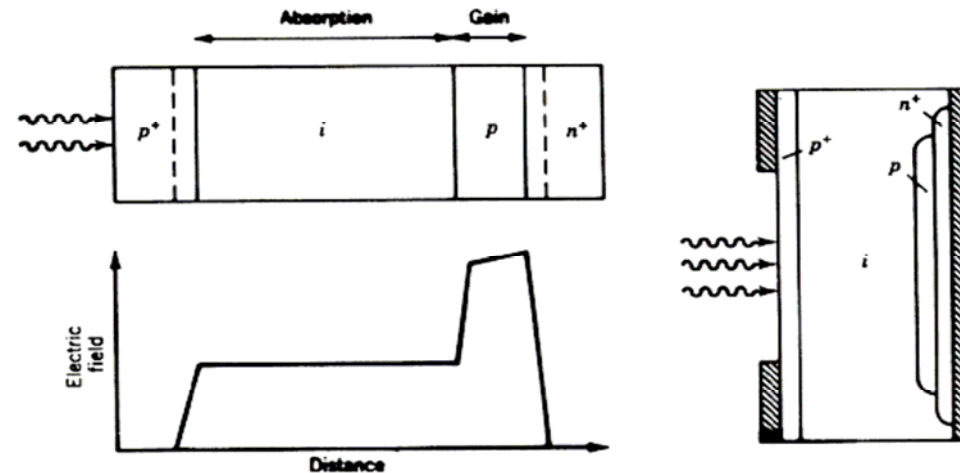
# ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ APD





# ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ APD

APDs is a p-i-n diode with an extra layer next to the i-region which gives gain and amplifies the signal further. The responsivity can thus be larger than  $q/h\nu$ .

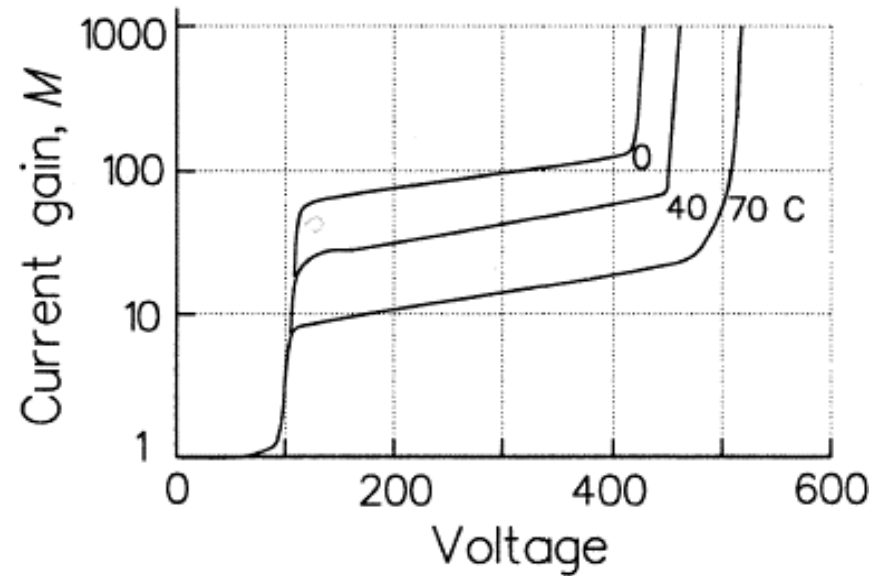


The responsivity of an APD is  $R_{APD} = M \frac{\eta q}{h\nu}$  where  $M$  is the multiplication factor.

The increased responsivity comes at the expense of enhanced noise and reduced bandwidth (speed).



# ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ ΦΩΤΟΔΙΟΔΩΝ APD



The multiplication factor M depends on the geometry of the APD the electric field etc. It falls off with frequency according to:

$$M(\omega) = \frac{M(0)}{\sqrt{1 + \omega\tau_e M(0)^2}}$$

where  $\tau_e$  is the effective transit time for the multiplication process. There is thus a trade-off between multiplication and bandwidth.



# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΜΠΟΡΙΚΩΝ ΦΩΤΟΔΙΟΔΩΝ

| Υλικό ημιαγωγού | Τύπος φωτοδιόδου | Χρόνος μετάβασης [ns] | μήκος κύματος [μm] | Αποκρισιμότητα $\alpha R$ [A/W] | Ρεύμα σκότους [nA] | Συντελεστής ενίσχυσης $\mu$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Si              | PIN              | 0.5                   | 0.3 - 1.1          | 0.5                             | 1                  | 1                           |
| Ge              | PIN              | 0.1                   | 0.5 - 1.8          | 0.7                             | 200                | 1                           |
| InGaAs          | PIN              | 0.3                   | 1.0 - 1.7          | 0.6                             | 10                 | 1                           |
| Si              | APD              | 0.5                   | 0.4 - 1.0          | 77                              | 15                 | 150                         |
| Ge              | APD              | 0.1                   | 1.0 - 1.6          | 30                              | 700                | 50                          |



# ΘΟΡΥΒΟΣ ΦΩΤΟΦΩΡΑΤΩΝ

$$\frac{S}{N} = \frac{\langle i_s^2 \rangle R / 4}{\langle i_N^2 \rangle R / 4} = \frac{\langle i_s^2 \rangle}{\langle i_N^2 \rangle}$$

## Βασικοί μηχανισμοί Θορύβου:

- ✓ ΘΟΡΥΒΟΣ ΒΟΛΗΣ (shot noise)
- ✓ ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ





# ΘΟΡΥΒΟΣ ΒΟΛΗΣ (PIN)

$$\langle i_N^2 \rangle_{sh} = 2q_e IB$$

Τυπικές τιμές ρεύματος  
σκότους στις φωτοδιόδους

$$I = I_L + I_{\text{υπόβαθρου}} + I_{\text{σκότους}}$$

|        |                     |
|--------|---------------------|
| Si     | $10^{-6} - 10^{-7}$ |
| Ge     | $10^{-3}$           |
| InGaAs | $10^{-4} - 10^{-6}$ |

**B:** Το ηλεκτρικό εύρος ζώνης

**I:** Το ολικό ρεύμα



# ΘΟΡΥΒΟΣ ΒΟΛΗΣ (APD)

$$\langle i_N^2 \rangle_{sh} = 2q_e I \mu^2 B F(\mu)$$

$$F(\mu) = \mu^x$$

$x = 0.3-0.5$  για το Si,  $x=1$  για το Ge και  $x = 0.5-0.8$  για το InGaAs.

**B:** Το ηλεκτρικό εύρος ζώνης

**I:** Το ολικό ρεύμα



# ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

$$\langle i_N^2 \rangle_{th} = \frac{4KT B}{R_L}$$

$$B = \frac{1}{2\pi R_L C_T}$$

**B:** Το ηλεκτρικό εύρος ζώνης

**C<sub>T</sub>:** Η ολική χωρητικότητα του φωτοφωρατή

**R<sub>L</sub>:** Η αντίσταση φορτίου



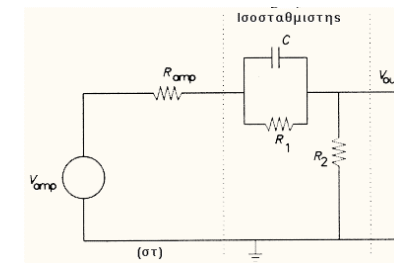
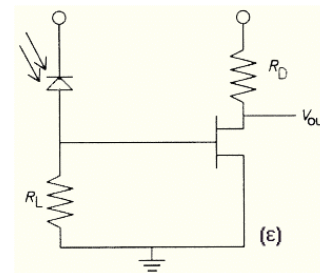
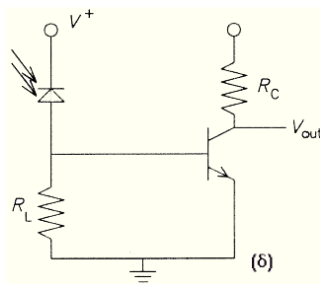
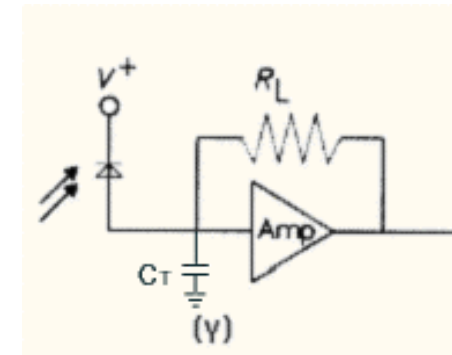
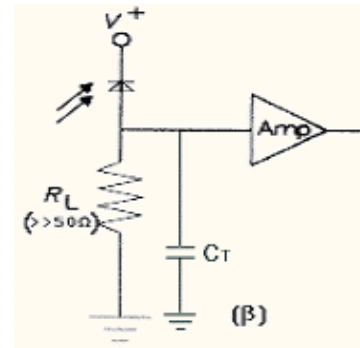
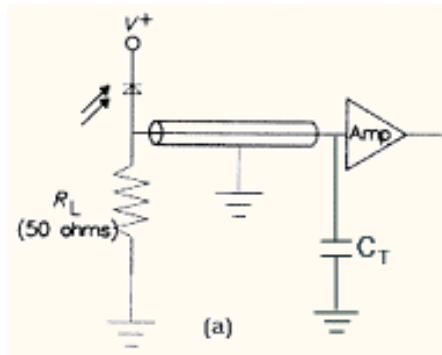
# ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ

$$\frac{S}{N} = \frac{\langle i_s^2 \rangle \mu^2}{2q_e I \mu^2 BF(\mu) + 4KT B / R_L}$$



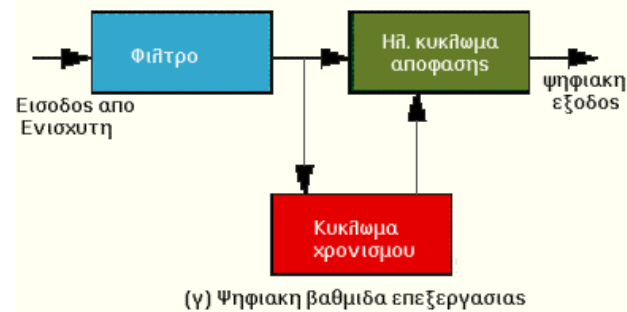
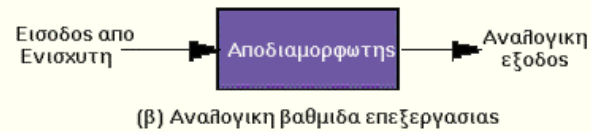
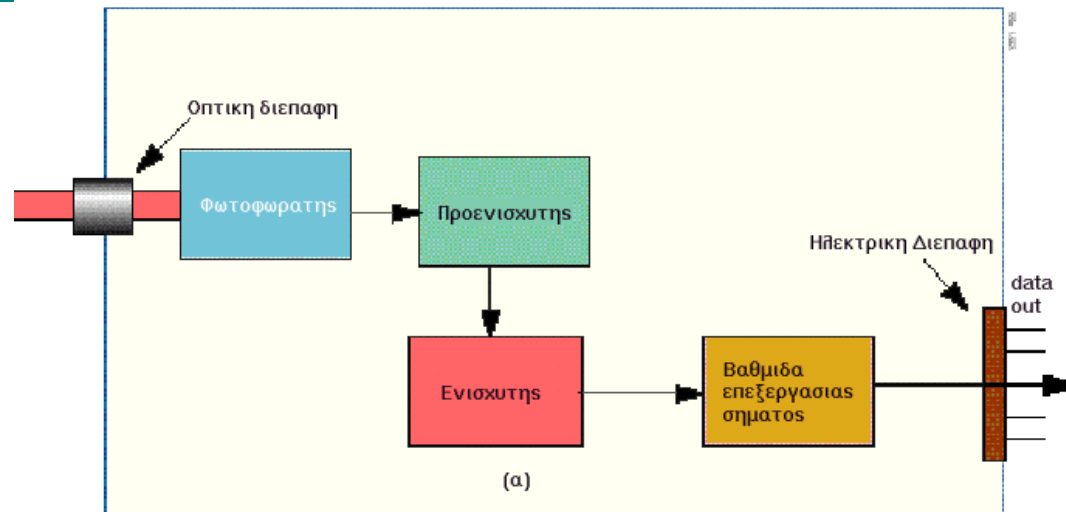
# Ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης φωτοφωρατών

Συνδεσμολογία χαμηλής αντίστασης    Συνδεσμολογία υψηλής αντίστασης.    Συνδεσμολογία μετατροπής αντίστασης.





# Ο ΔΕΚΤΗΣ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ





# Ο ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΤΑ ΟΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Σε ένα οπτικό σύστημα τηλεπικοινωνιών εμφανίζονται στο δέκτη και επηρεάζουν τις επιδόσεις του διάφορα είδη θορύβου (noise), που διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τον προσθετικό θόρυβο και τον πολλαπλασιαστικό θόρυβο. Ο προσθετικός θόρυβος αφορά σε όλα τα είδη θορύβου που υπάρχουν ακόμα και όταν δεν υπάρχει σήμα. Αντίθετα ο πολλαπλασιαστικός θόρυβος αφορά στα είδη του θορύβου που είτε ενυπάρχουν στο σήμα είτε παράγονται σε κάποια διάταξη μόνον παρουσία του σήματος.

Οι βασικές πηγές προσθετικού θορύβου είναι:

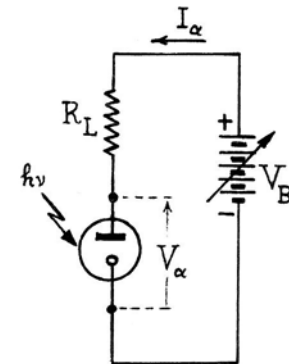
- Θόρυβος βολής και ο Θερμικός θόρυβος.
- Θόρυβος που οφείλεται στους ηλεκτρικούς ενισχυτές
- Θόρυβος που οφείλεται στους οπτικούς ενισχυτές (Ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή ASE)
- Διαφωνία από γειτονικά κανάλια ή από διακυμάνσεις της

Η σπουδαιότερη πηγή πολλαπλασιαστικού θορύβου στους φωτοδέκτες είναι ο θόρυβος συντελεστή απολαβής που εμφανίζεται στις APD φωτοδιόδους.



# Κβαντικοί φωρατές επιφανείας

- Εδώ η ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων χρησιμεύει στο να επιτρέπει στα  $e$  των επιφανειακών στρωμάτων του φωτοενεργού υλικού ( Cs-Sb, Cs-Te φωτοκάθοδος) να περνούν σε ελεύθερη κατάσταση  $h\nu > E_g + E_A$  (έργο εξαγωγής)
- Φωτοηλεκτρικά κύτταρα-φωτοκύτταρα



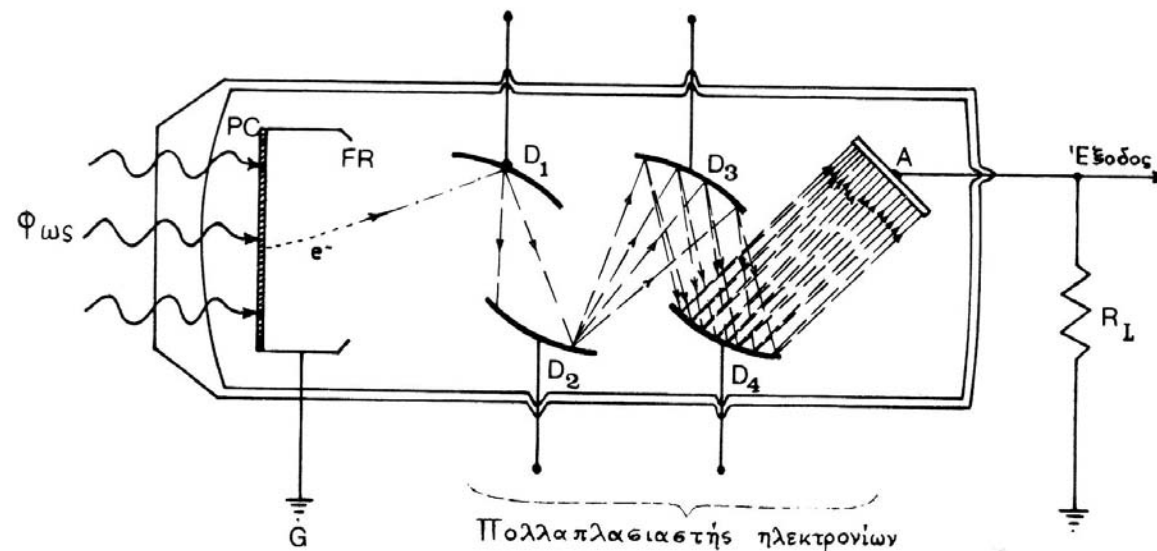
Εχ.96. Συμβολισμός και κυκλωμά-  
τωση φωτοκυττάρου κενού.





# Φωτοπολλαπλασιαστές

- Είναι διατάξεις που όπως τα φωτοκύτταρα περιλαμβάνουν φωτοκάθοδο που ακολουθείται από διάταξη πολλαπλασιασμού των φωτοηλεκτρονίων (δευτερογενής εκπομπή)

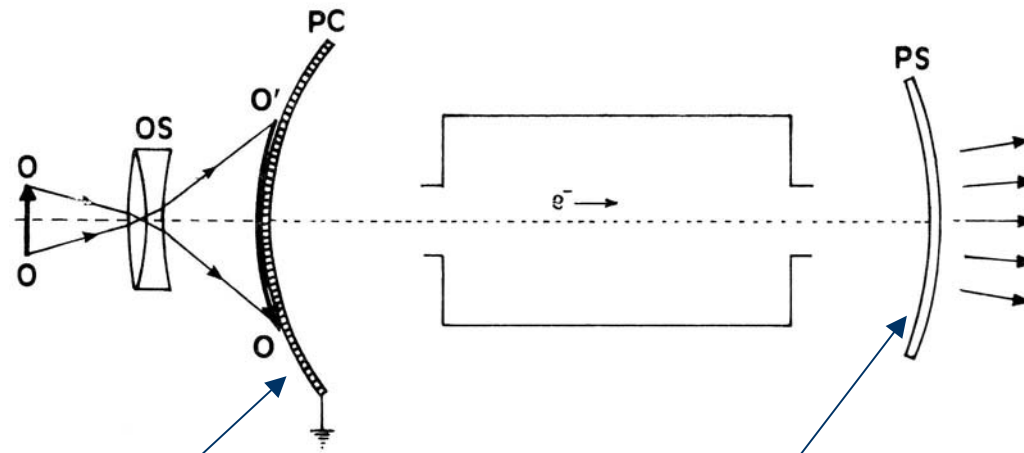


Σχ.111. Δομική οργάνωση ενός τυπικού φωτοπολ/στή.

- Είναι ουσιαστικά διατάξεις εικονοληψίας



# Διατάξεις εικονοληψίας



Σχ.102. Γενική λειτουργική δομή ενός συστήματος εικονοληψίας.

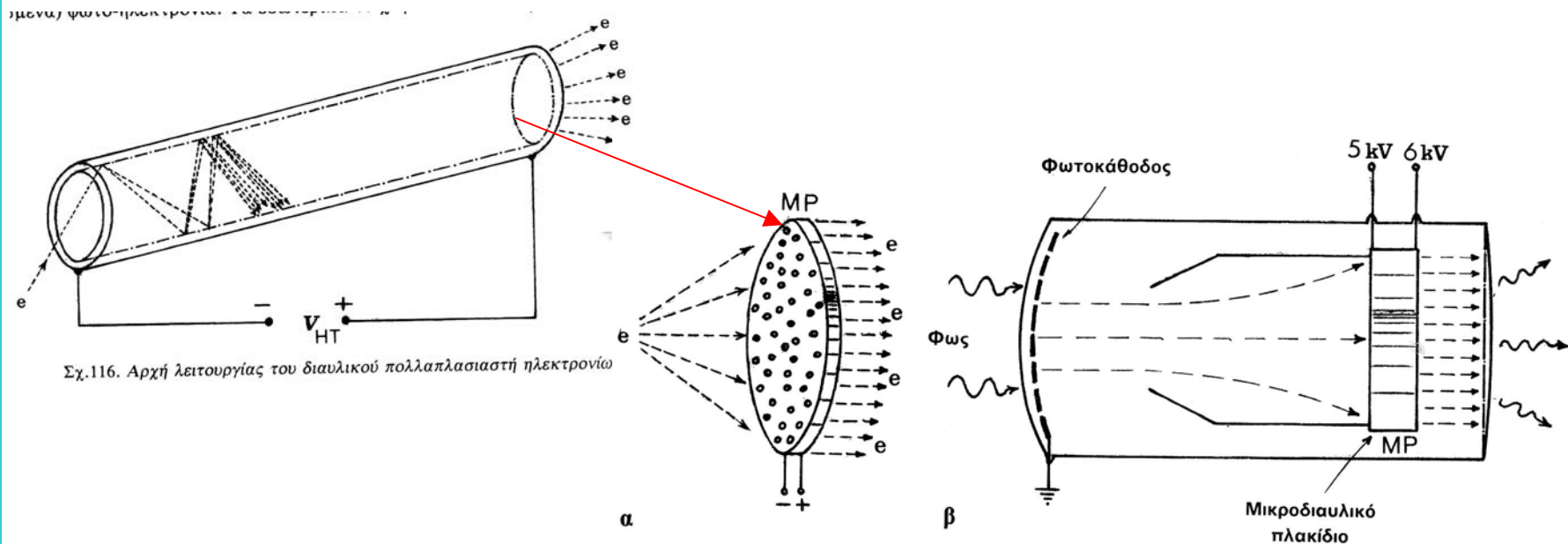
Φωτοαγώγιμο υλικό ή  
array PG Si

CCD Charged  
Coupled devices



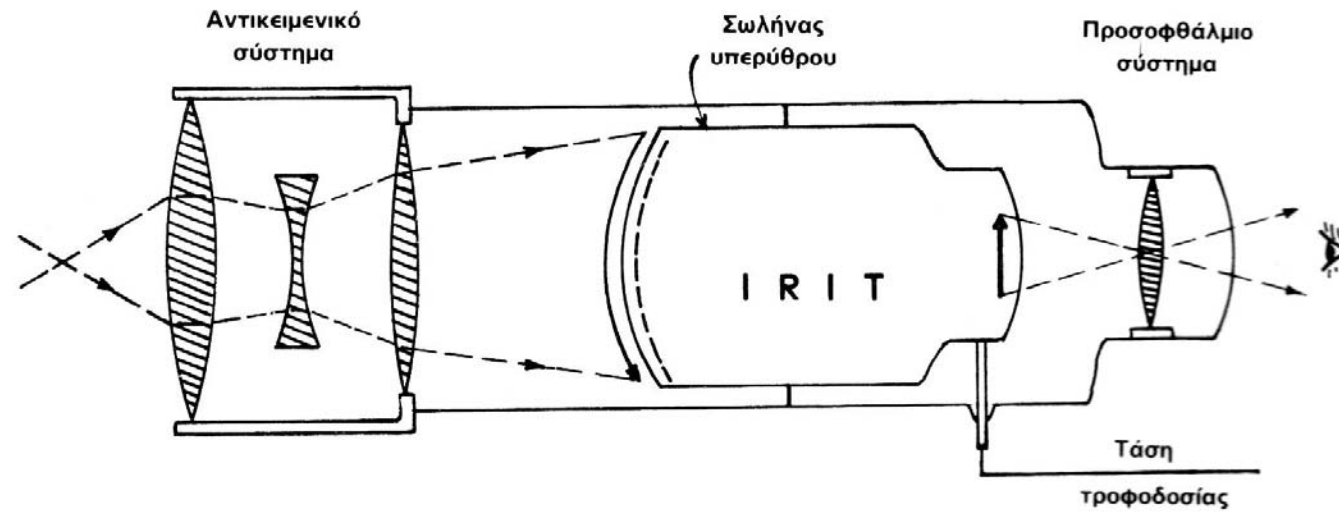
# ΕΝΤΑΤΙΚΟΠΟΙΗΤΕΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

- Εντατικοποιητές: εμποδίζουν τα φωτοηλεκτρόνια να διασπαρούν χρησιμοποιώντας διαφορες μεθόδους εστίασης με σημαντικότερη αυτή του διαυλικού πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων





# Εικονοληψία στο υπέρυθρο



Σχ.118. Δομή διόπτρας/τηλεσκοπίου υπέρυθρων.