

Μέρος 5^ο **ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ**

- **Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ^(*)**
- **ΤΟ ΦΩΤΟΑΓΩΓΙΜΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ^(*)**

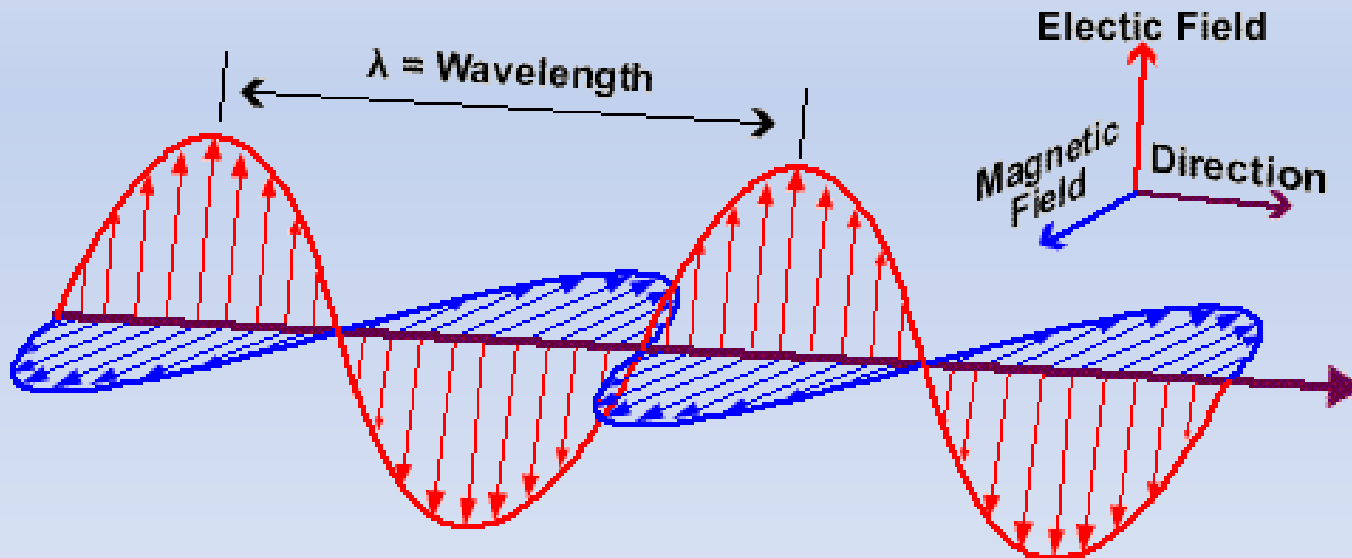
^(*) Αντιστοιχεί στο κεφάλαιο 4 του βιβλίου των Κ. Καλαϊτζάκη και Ε. Κουτρούλη “Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες: Αρχές λειτουργίας και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης”

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- Η Φύση του Φωτός
- Το Φωτοαγώγιμο Στοιχείο
- Η Ημιαγώγιμη Φωτοδίοδος
- Το Φωτοτρανζίστορ

Τα Χαρακτηριστικά του Φωτός

- Το φως είναι μια μορφή **ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας** (electromagnetic radiation)
- Η Η/Μ ακτινοβολία είναι μια μορφή εγκάρσιου Ηλεκτρικού (Electric) και Μαγνητικού (Magnetic) κύματος που διαδίδεται (στο κενό) με ταχύτητα **$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$** .



Πηγή: <http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/RadiationSafety/theory/nature.htm>

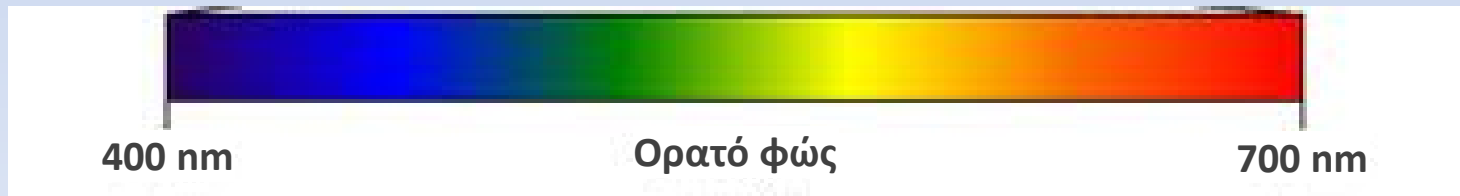
Τα Χαρακτηριστικά του Φωτός (συνέχεια)

Το **μήκος κύματος (wavelength)**, λ , του φωτός είναι στην κλίμακα στην οποία αντιδρά το μάτι μας. Έτσι, μπορούμε να βλέπουμε.

Το χρώμα του φωτός καθορίζεται από τη **συχνότητά** του (**frequency**), f

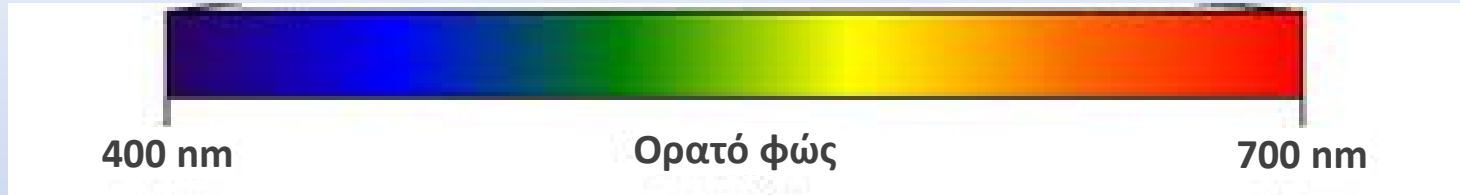
Σχέση μήκους κύματος - συχνότητας $f = \frac{c}{\lambda}$

Η κλίμακα των μηκών κύματος του ορατού φωτός (visible light) ονομάζεται **χρωματικό φάσμα (spectrum)**. Εκτείνεται από τα 400 nm ως τα 700 nm.



Τα Χαρακτηριστικά του Φωτός (συνέχεια)

ΠΡΟΒΛΗΜΑ: Υπολογίστε τη συχνότητα (σε Hz) του φωτός στα δύο άκρα του ορατού φάσματος, 400 και 700 nm.



Απάντηση

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

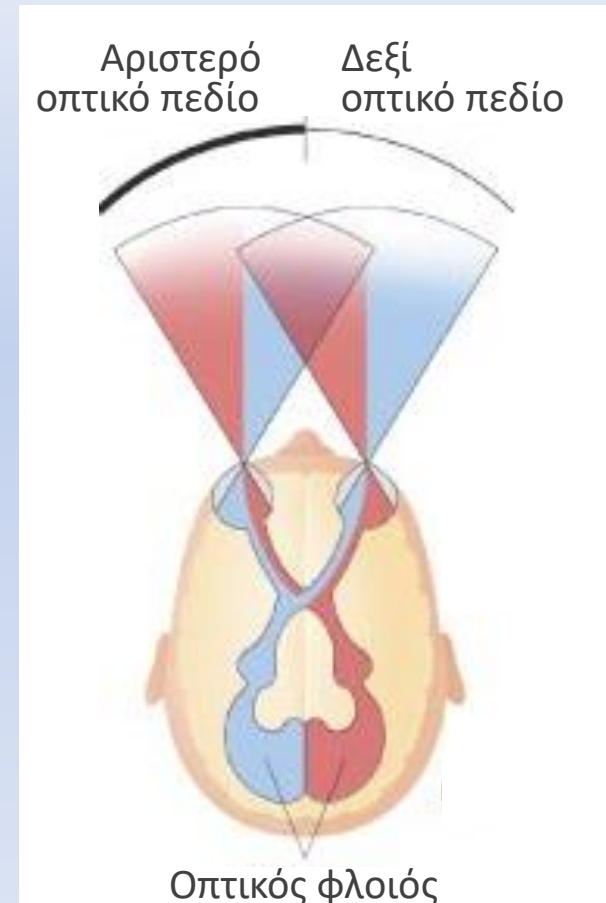
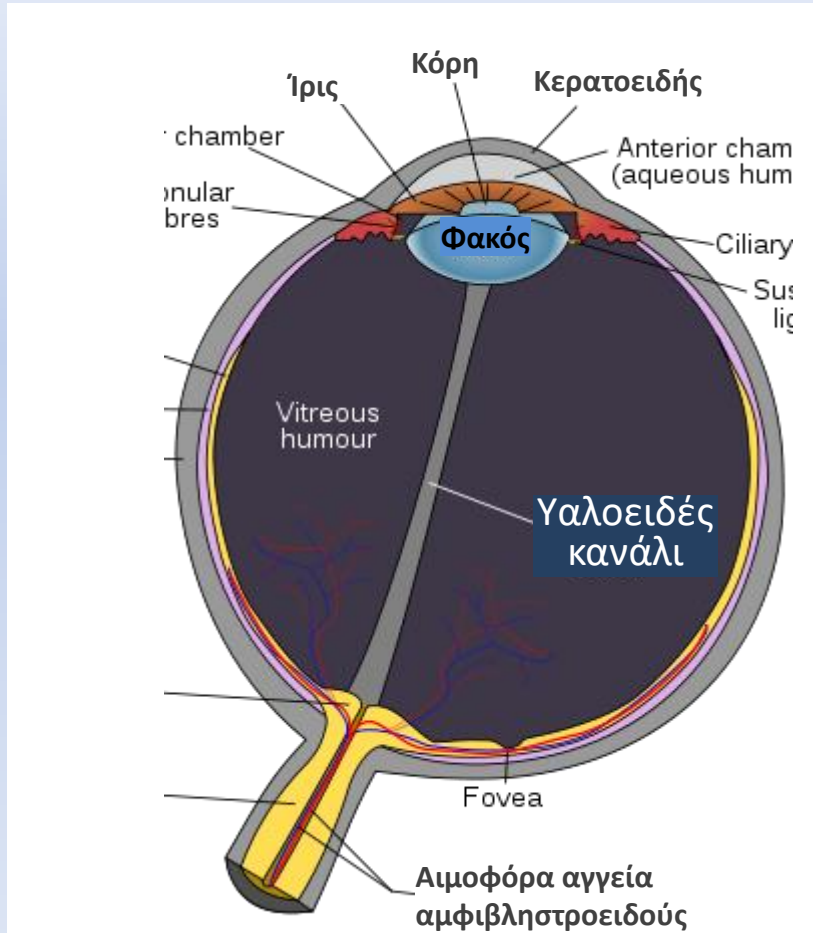
$$f_{\text{ιώδες}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{400 \times 10^{-9} \text{ m}} = 750 \times 10^{12} \text{ Hz} = 750 \text{ THz}$$

$$f_{\text{ερυθρό}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{700 \times 10^{-9} \text{ m}} = 429 \times 10^{12} \text{ Hz} = 429 \text{ THz}$$

Το Μάτι

Το μάτι είναι ένα είδος **μετατροπέα** που μετατρέπει την ενέργεια του φωτός σε σήματα που στέλνονται στον εγκέφαλο.

Αυτό είναι το φαινόμενο της **όρασης (vision)**.



Πηγή: http://en.wikipedia.org/wiki/Visual_system

Πηγή: <http://trialx.com/curebyte/2011/07/09/vision-binocular-photos-and-a-listing-of-clinical-trials/>

Η Σωματιδιακή Φύση του Φωτός: Φωτόνια

Εκτός από Η/Μ κύμα, το φως μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από πολύ μικρά πακέτα ενέργειας, τα ονομαζόμενα **φωτόνια (photons)**.

Η ενέργεια E κάθε φωτονίου είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας f του φωτός.

$$E = h \cdot f$$

όπου: h η σταθερά του Planck $\approx 6.63 \times 10^{-34}$ J·s.

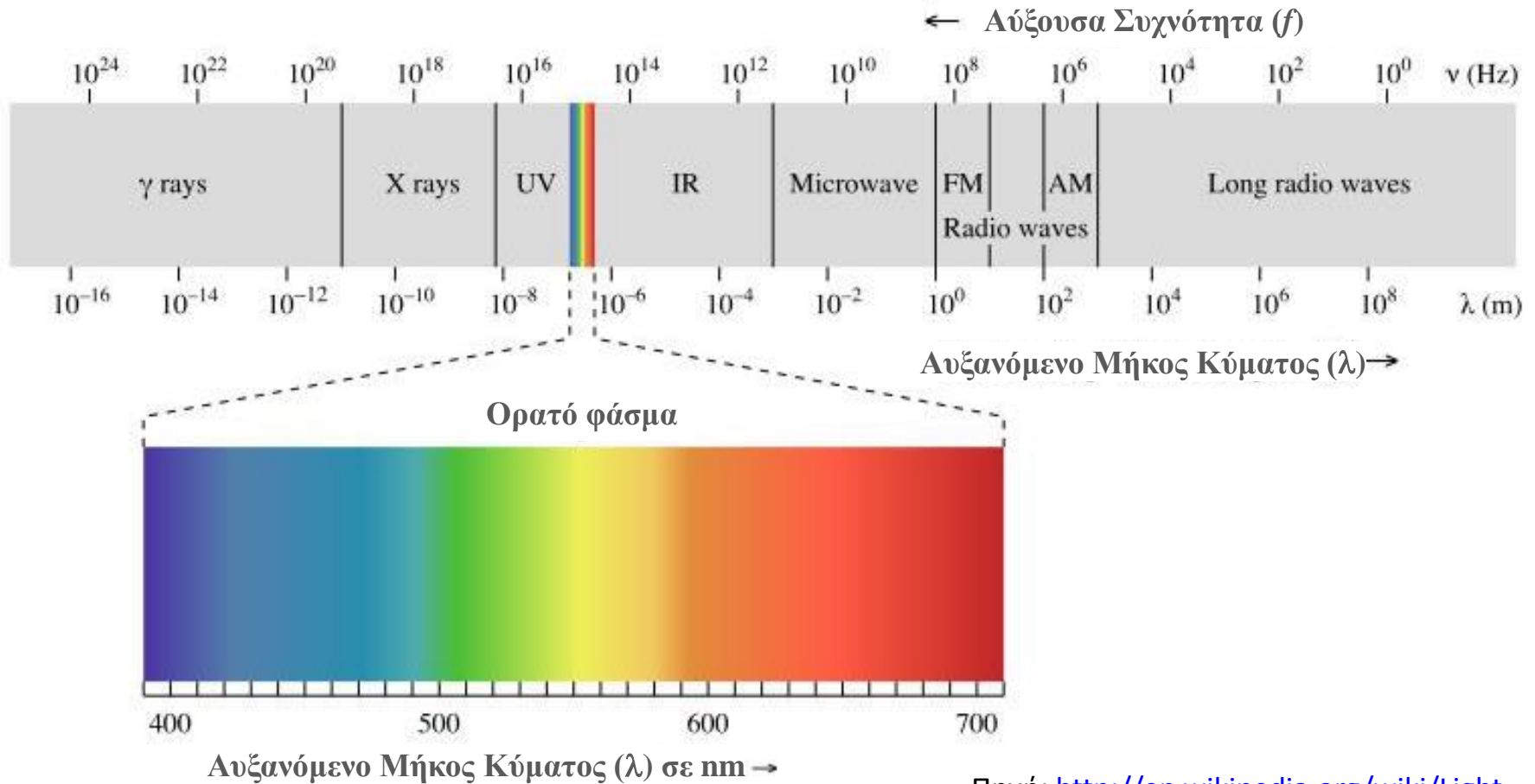
ΠΡΟΒΛΗΜΑ: Υπολογίστε την ενέργεια ενός φωτονίου από τα δύο άκρα του ορατού φάσματος, 400 και 700 nm.



Απάντηση $E_{\text{ιώδους}} = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) (750 \times 10^{12} \text{ Hz}) = 4.97 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$E_{\text{ερυθρού}} = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) (429 \times 10^{12} \text{ Hz}) = 2.84 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Το φως μέσα στο φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας



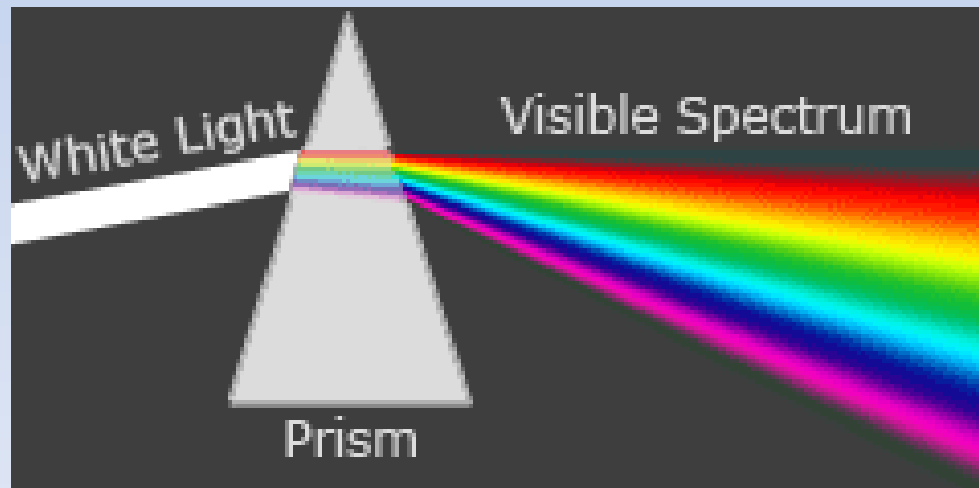
Πηγή: <http://en.wikipedia.org/wiki/Light>

Τα Χαρακτηριστικά του Φωτός: Το Χρώμα

Το λευκό φως (white light), σαν αυτό που μας δίνει ο ήλιος, διαχωρίζεται σε χρώματα στο γνωστό **ορατό φάσμα (visible spectrum)**:

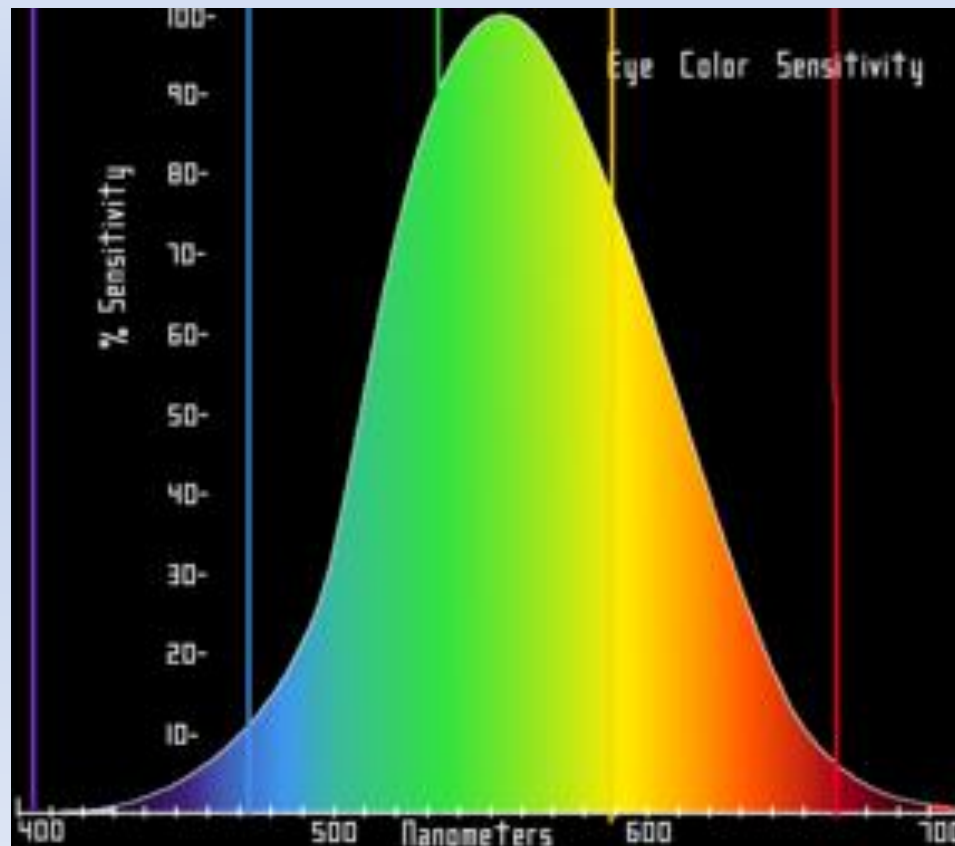
- κόκκινο (red)
- πορτοκάλι (orange)
- κίτρινο (yellow)
- πράσινο (green)
- μπλε (blue)
- λουλακί (indigo)
- ιώδες (violet)

αν διέλθει από ένα γυάλινο πρίσμα (prism).



Ευαισθησία του ματιού στα χρώματα

- Το ανθρώπινο μάτι παρουσιάζει διαφορετική σχετική ευαισθησία (% sensitivity) στα διάφορα χρώματα.
- Το μάτι είναι περισσότερο ευαίσθητο στο πράσινο/κίτρινο φως με μήκος κύματος 550nm



Τα Χαρακτηριστικά του Φωτός: Η Ένταση

Εκτός από το χρώμα (ενέργεια των φωτονίων), το άλλο χαρακτηριστικό του φωτός είναι η **ένταση (intensity)** (αριθμός φωτονίων).

Χαρακτηριστικά του φωτός	
Χρώμα	(ενέργεια των φωτονίων)
Ένταση	(αριθμός φωτονίων)

ΠΡΟΒΛΗΜΑ: Υπολογίστε πόσα φωτόνια ιώδους φωτός εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο από έναν μικρό λαμπτήρα φωτεινής ισχύος $1 \mu\text{W}$.

Απάντηση $P = \frac{E}{t} \Rightarrow E = P \cdot t = (1\mu\text{W})(1\text{s}) = 1\mu\text{J}$ (ενέργεια εκπεμπόμενου φωτός σε 1s)

Η ενέργεια ενός φωτονίου ιώδους είναι $E_{\text{ιώδους}} = 4.79 \times 10^{-19}\text{J}$

Επομένως, ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων σε 1s είναι

$$N = \frac{1\mu\text{J}}{4.97 \times 10^{-19}\text{J}} = \frac{10^{-6}\text{J}}{4.97 \times 10^{-19}\text{J}} \approx 2 \times 10^{12} \text{ φωτόνια}$$

Μονάδες Φωτός: Η Candela

Μονάδα μέτρησης της **φωτεινής έντασης** ή **φωτοβολίας** (luminous intensity) είναι η **Candela (cd)**

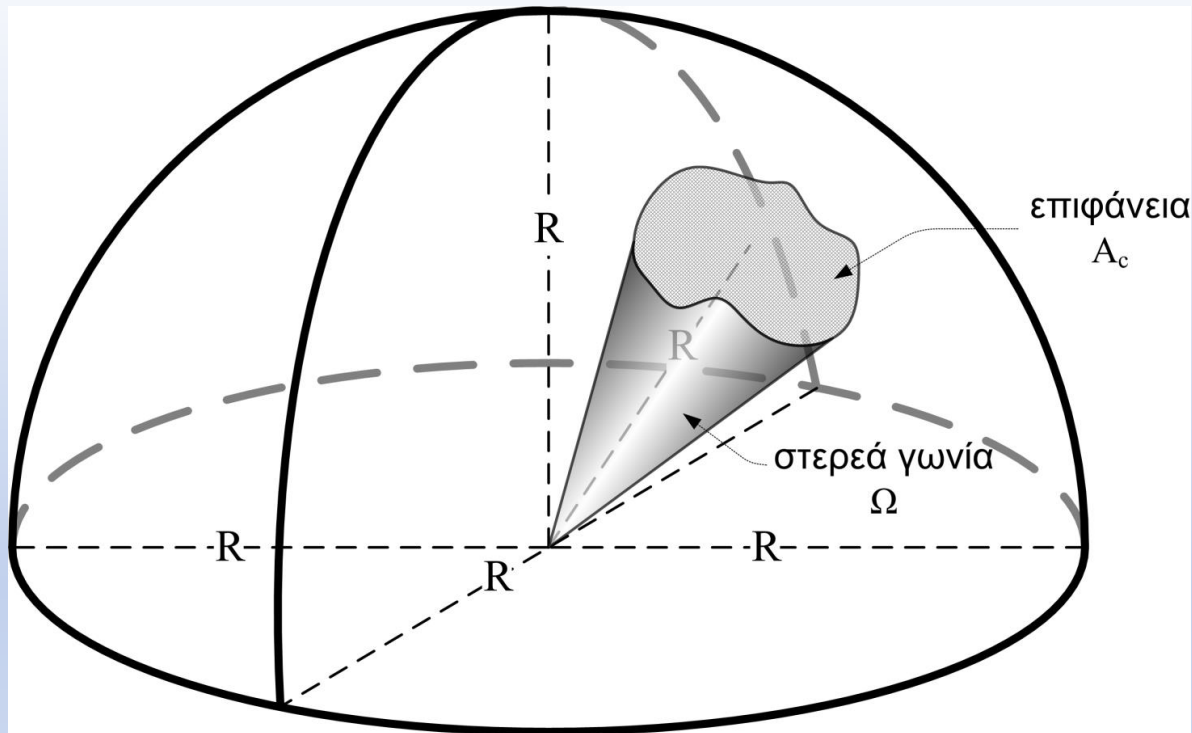
Τα πρότυπα μέτρησης της έντασης του φωτός (Φωτομετρία) ήταν:

- αρχικά, η **κέρινη λαμπάδα** (wax candle)
- μετά, ο **ηλεκτρικός λαμπτήρας**
- τώρα, **το μέλαν σώμα** (black body), ένα σώμα που ιδανικά απορροφάει και εκπέμπει όλα τα μήκη κύματος του φωτός.

Η **candela** είναι το 1/60 της φωτεινής έντασης που μετριέται κάθετα στην επιφάνεια 1cm^2 ενός μελανού σώματος, που βρίσκεται στη θερμοκρασία τηκόμενης πλατίνας (2046 K)

Η candela αναπαράγεται αρκετά πιστά με τη βοήθεια ενός προβολέα νήματος βολφραμίου, ο οποίος εκπέμπει ένα χρώμα που αντιστοιχεί σε 2854 K.

Το Στερακτίο - Η Μονάδα Στερεάς Γωνίας



Στερεά γωνία (solid angle):
$$\Omega = \frac{A_c}{R^2}$$

Μονάδα μέτρησης της στερεάς γωνίας είναι το **στερακτίο (sterad, sr)**. Ένα στερακτίο είναι η στερεά γωνία που αντιστοιχεί σε επιφάνεια 1m^2 πάνω σε σφαίρα ακτίνας 1m .

Η πλήρης επιφάνεια μιας σφαίρας περιέχει 4π sr (~ 12.6 sr)

Μονάδες Φωτός: Το Lumen

Το Lumen (lm) είναι η μονάδα της φωτεινής ροής (luminous flux) ή φωτεινής ισχύος (luminous power) .

- Ένα Lumen είναι η φωτεινή ροή που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή μιας candela μέσα σε ένα στερακτίνο,

$$1 \text{ lm} = (1 \text{ cd}) \times (1 \text{ sr})$$

- Η πλήρης σφαίρα περιλαμβάνει 4π (12.6) στερακτίνα. Συνεπώς, η ολική φωτεινή ροή από μια σημειακή πηγή της 1 candela είναι 12.6 lm.
- Η φωτεινή ροή μπορεί να θεωρηθεί ως φωτεινή ισχύς, ή η ενέργεια (αριθμός φωτονίων) που εκπέμπεται ανά δευτερόλεπτο.

Διαφορά Lumen - Watt

- Η φωτεινή ισχύς και η μονάδα της Lumen είναι ένα μέτρο της έντασης του ορατού φωτός που εκπέμπεται από μια πηγή.
- Η ισχύς ακτινοβολίας μιας πηγής (και η μονάδα της Watt) μετρούν την ολική τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της πηγής ανεξάρτητα από το μήκος κύματος (ορατό ή μη).
- Το lumen συνδέεται με το Watt μέσω ενός συντελεστή ($K=683 \text{ lm/W}$) που υπολογίζεται βάσει της διαφορετικής ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού στα διάφορα μήκη κύματος (χρώματα)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: Έστω μια πηγή Η/Μ ακτινοβολίας στο IR (π.χ., 730 - 810 nm) ισχύος 10W. Προφανώς, η φωτεινή ισχύς που εκπέμπει αυτή η πηγή είναι 0 lumen.

Μονάδες Φωτός: Το Lux

Ο φωτισμός (*illumination, illuminance*) μιας επιφανείας ορίζεται ως η φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφανείας που πέφτει από όλες τις κατευθύνσεις πάνω σ' αυτήν την επιφάνεια.

Μονάδα φωτισμού είναι το **Lux (lx)**

- Φωτισμό 1 lx έχουμε όταν φωτεινή ροή ενός lumen προσπίπτει επάνω σε επιφάνεια εμβαδού 1 m^2 .
- Με άλλα λόγια, ένας φωτισμός 1 lux παράγεται πάνω σε μια επιφάνεια 1 m^2 σε μια απόσταση 1 m από μια σημειακή πηγή 1 cd.
- Σε πολλές εργασίες ασχολούμαστε με την πρόσπτωση του φωτός σε επίπεδες επιφάνειες παρά σε σφαίρες, αλλά το σφάλμα που εισάγεται είναι συχνά αμελητέο.

Ο Νόμος του Αντίστροφου τετραγώνου

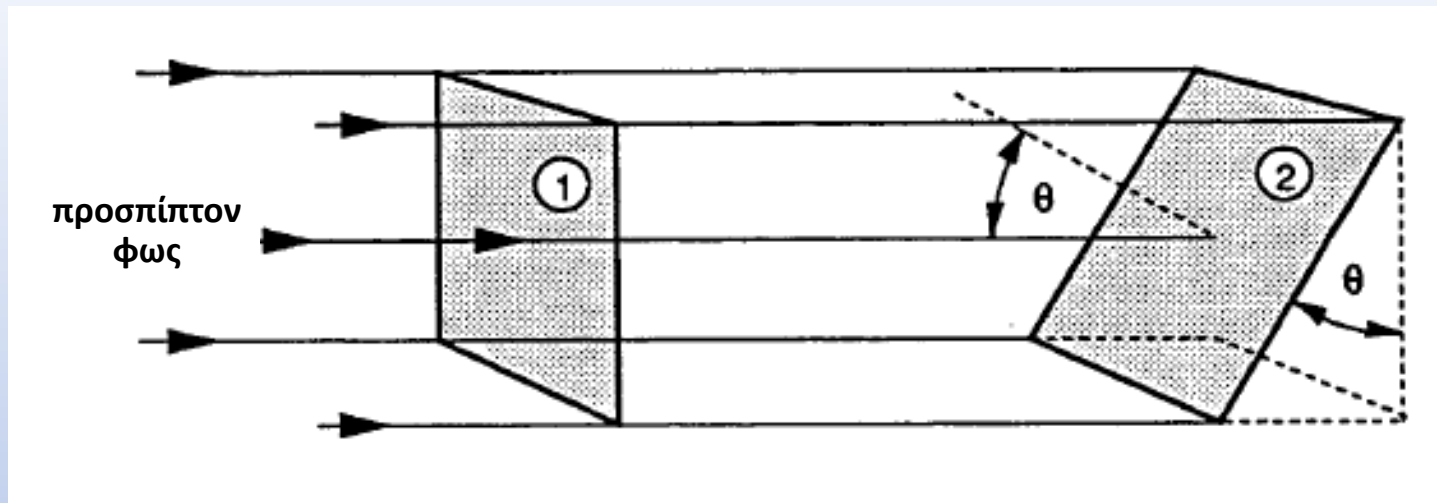
Ο φωτισμός E lux σε μια απόσταση d μέτρων από την πηγή, που εκπέμπει φωτεινή ισχύ Φ lumens, δίνεται από τη σχέση

$$E = \frac{\Phi}{d^2}$$

Η σχέση αυτή ονομάζεται **Νόμος Αντιστρόφου Τετραγώνου (Inverse Square Law)**.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: Αν διπλασιάσουμε την απόσταση ενός σώματος από μια πηγή, ο φωτισμός της επιφάνειας του σώματος δεν θα μειωθεί στο μισό, αλλά, θα μειωθεί στο $\frac{1}{4}$ του αρχικού.

Ο Νόμος του Lambert



Ο Νόμος Συνημιτόνου του Lambert (Lambert's Cosine Law): καθώς περιστρέφουμε μια επιφάνεια ο φωτισμός είναι ανάλογος του $\cos\theta$ (του συνημιτόνου της γωνίας περιστροφής θ).

Ο Νόμος Αντιστρόφου Τετραγώνου γίνεται
$$E = \frac{\Phi}{d^2} \cdot \cos\theta$$

Αισθητήρες φωτός

Οι **αισθητήρες φωτός (light detectors)** ή **φωτοανιχνευτές (photodetectors)** είναι μετατροπείς για την ορατή (400 – 700nm) και την κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία (700 – 1400 nm)

Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

A. Κβαντικοί ανιχνευτές (quantum detectors): Μετατρέπουν το προσπίπτον φως (γενικά, Η/Μ ακτινοβολία) απ'ευθείας σε ηλεκτρικό ρεύμα (ηλεκτρόνια/οπές) σε έναν ημιαγωγό.

- Φωτοαγώγιμα στοιχεία (photoconductive cells) ή φωτοαντιστάσεις (photoresistors)
- Φωτοдиодοι (photodiodes)
- Φωτοτρανζίστορ (phototransistors)

B. Θερμικοί ανιχνευτές (thermal detectors): Απορροφούν την προσπίπτουσα ενέργεια και λειτουργούν μετρώντας με ένα θερμόμετρο την αύξηση στη θερμοκρασία.

- Θερμοζεύγη (thermocouple detectors)
- Πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές (pyro-electric detectors)

Εργαστηριακή άσκηση 9^η

Το φωτοαγωγίμο στοιχείο

(ή φωτοαγωγός ή φωτοαντίσταση)

ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

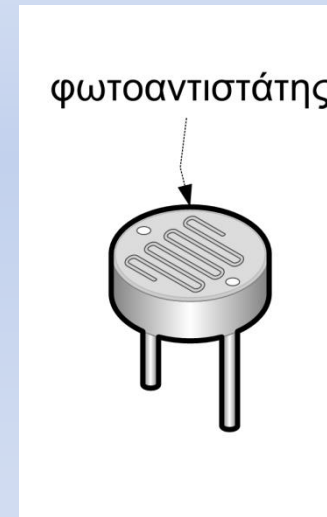
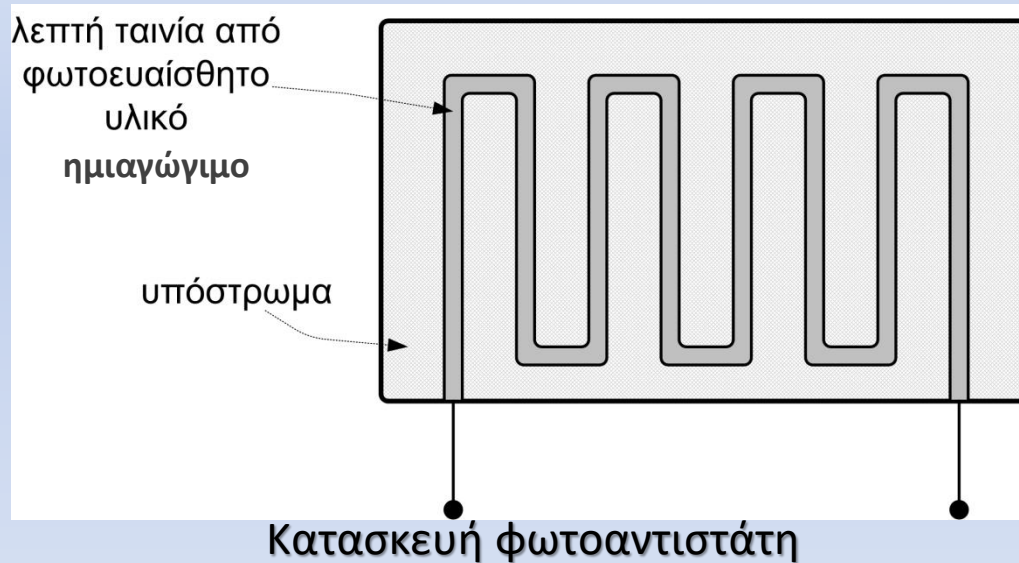
- Να κατανοήσουμε το φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας.
- Να αναγνωρίσουμε τους όρους «φωτο-αντίσταση» (photo-resistor), «φωτο-αγωγός» (photo-conductor) και «αντίσταση εξαρτώμενη από φως» (Light Dependent Resistor, LDR).
- Να μετρήσουμε την φωτεινότητα και την πολική απόκριση του φωτοαγωγίμου στοιχείου

ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

- Η Απόκριση στο Φωτισμό
- Ο Νόμος Συνημιτόνου του Lambert

Φωτοαγωγοί

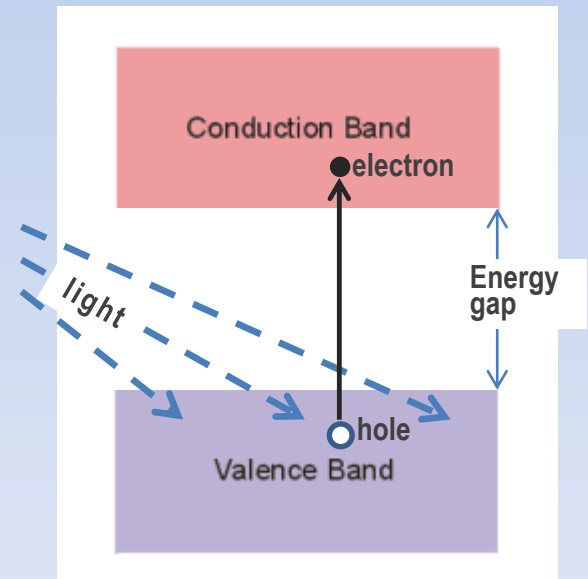
- Οι **φωτοαγωγοί (Photoconductors)** ή **φωτοαντιστάτες (photoresistors)** είναι υλικά των οποίων η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της έντασης του προσπίπτοντος φωτός.
- Το φαινόμενο αυτό λέγεται **φωτοαγωγιμότητα (photoconductivity)**



- Οι φωτοαγωγοί ή φωτοαντιστάσεις φτιάχνονται από ημιαγώγιμα υλικά (semiconductor materials) μεγάλης αντίστασης.

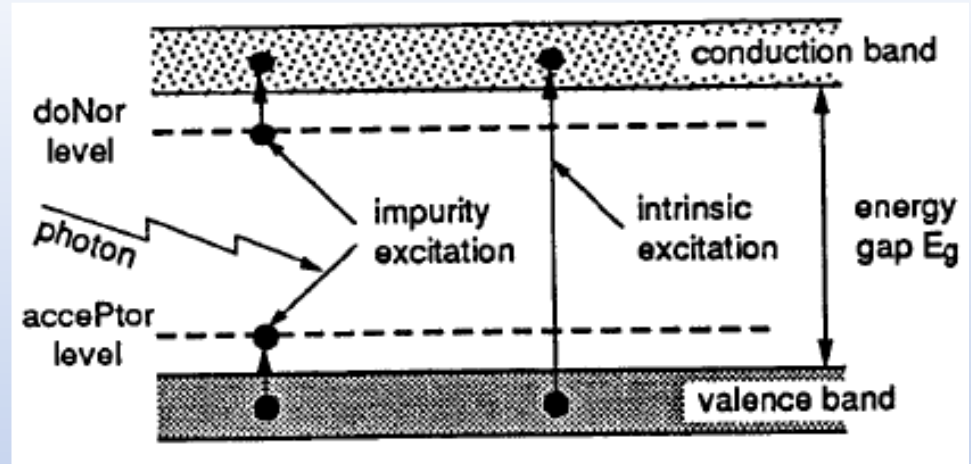
Φωτοαγωγοί (συνέχεια)

- Αν φως (**light**), αρκετά υψηλής συχνότητας (ενέργειας), πέσει πάνω στον φωτοαγωγό, τα φωτόνια, που απορροφώνται, δίνουν αρκετή ενέργεια στα ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους (**valence band**), να υπερβούν το ενεργειακό χάσμα (**energy gap**) και να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας (**conduction band**).
- Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (**electrons**), που προκύπτουν, καθώς και οι οπές (**holes**) που αφήνουν πίσω τους, άγουν το ρεύμα, δηλαδή, μειώνουν την αντίσταση.
- Οι φωτοαγωγοί μπορεί να είναι είτε καθαροί (**intrinsic**) ημιαγωγοί είτε ημιαγωγοί με προσμίξεις (**impurities**).
- Σε έναν **καθαρό** ημιαγωγό, π.χ. Πυρίτιο, τα φωτόνια πρέπει να έχουν αρκετά υψηλή ενέργεια (συχνότητα) για να διαγείρουν τα ηλεκτρόνια (**intrinsic excitation**) να υπερβούν το ενεργειακό χάσμα.



Φωτοαγωγοί (συνέχεια)

- Οι ημιαγωγοί **προσμίξεων** έχουν άτομα προσμίξεων (impurities ή dopants).
- Οι προσμίξεις εμφανίζονται ως ενεργειακά επίπεδα ακριβώς κάτω από τη ζώνη αγωγιμότητας (**doNor level** για τον τύπο N) ή ακριβώς επάνω από τη ζώνη σθένους (**accePtor level** για τον τύπο P).



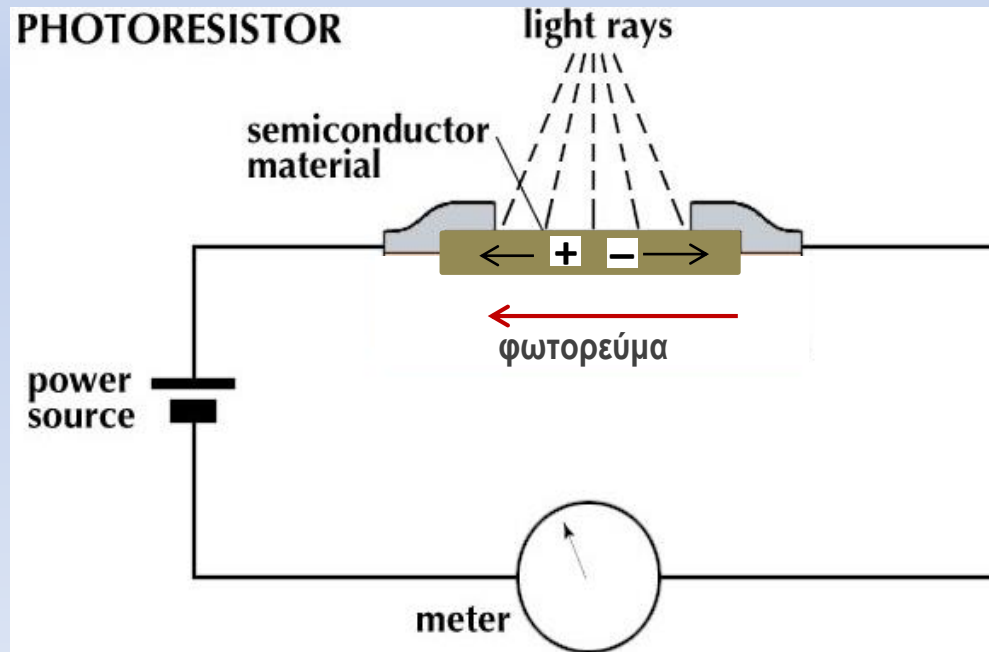
- Φωτόνια μπορούν να προκαλέσουν τις εξής διεγέρσεις προσμίξεων (**impurity excitations**):
 - ένα ηλεκτρόνιο από το επίπεδο δοτών (doNor level) στη ζώνη αγωγιμότητας (για τον τύπο N)
 - ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στο επίπεδο δεκτών (accePtor level) (για τον τύπο P).

Φωτοαγωγοί (συνέχεια)

- Οι φωτοαγωγοί (Photoconductors) λέγονται και φωτοαντιστάσεις (photoresistors) ή και φωτοεξαρτώμενες αντιστάσεις (light dependent resistors, LDR).
- Καμιά φορά αναφέρεται και σαν **CdS**, από το "cadmium sulfide," το υλικό από το οποίο φτιάχνονται οι φωτοαντιστάσεις.

Το Φωτο-Ρεύμα

- Αν εφαρμόσουμε εξωτερική τάση με μια πηγή (power source), οι φορείς (ηλεκτρόνια – και οπές +) που παράγονται από φώτοδιέγερση θα κινηθούν προκαλώντας ένα ρεύμα (φωτορεύμα - photocurrent).
- Συνδέοντας ένα όργανο μέτρησης (meter), μετράμε την ένταση του φωτορεύματος η οποία μεταβάλλεται ανάλογα προς την ένταση του προσπίπτοντος φωτός (light rays).



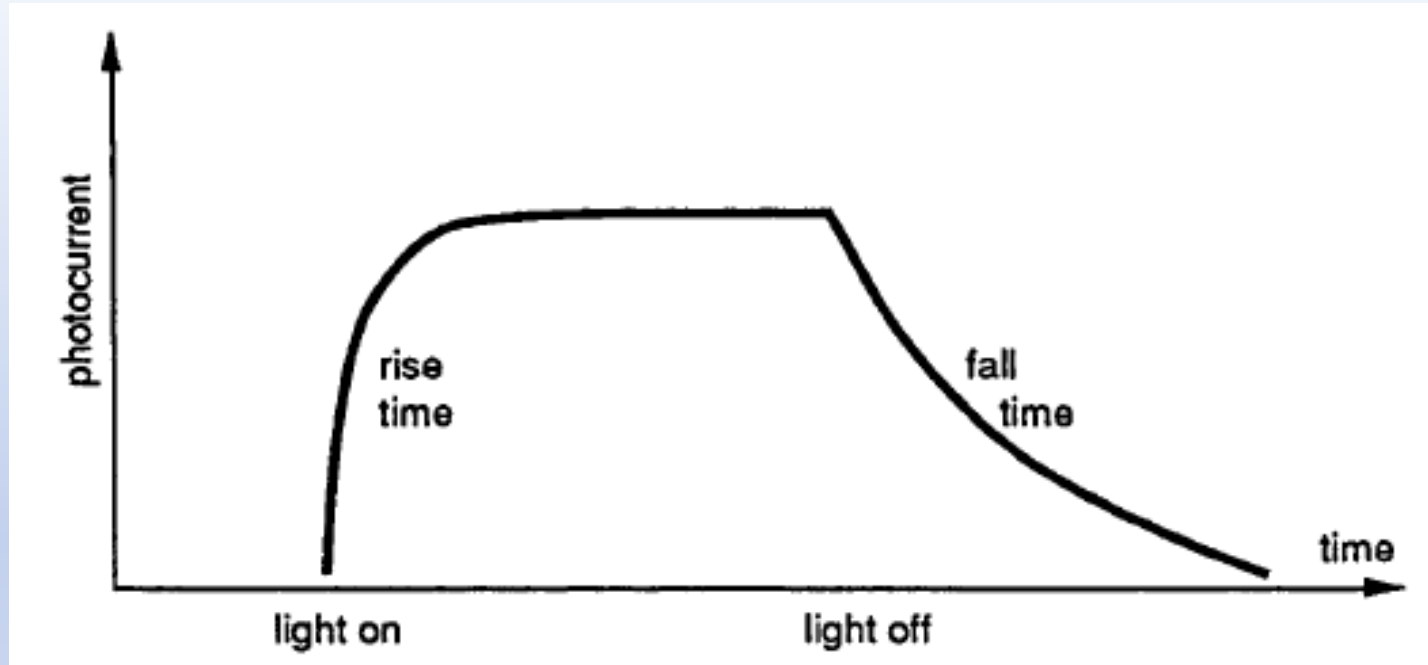
Ευαισθησία και χρόνος απόκρισης φωτοστοιχείου

Αν αυξήσουμε τη συγκέντρωση των προσμίξεων στον ημιαγωγό:

- αυξάνεται η συγκέντρωση των φορέων (ηλεκτρόνια-οπές) και, ως εκ τούτου, αυξάνεται το φωτορεύμα και η ευαισθησία του φωτοστοιχείου
- συμβαίνει συχνότερα η παγίδευση του ηλεκτρονίου στις κενές θέσεις των προσμίξεων, οπότε μεγαλώνει ο χρόνος απόκρισης του φωτοαγώγιμου στοιχείο στο φως

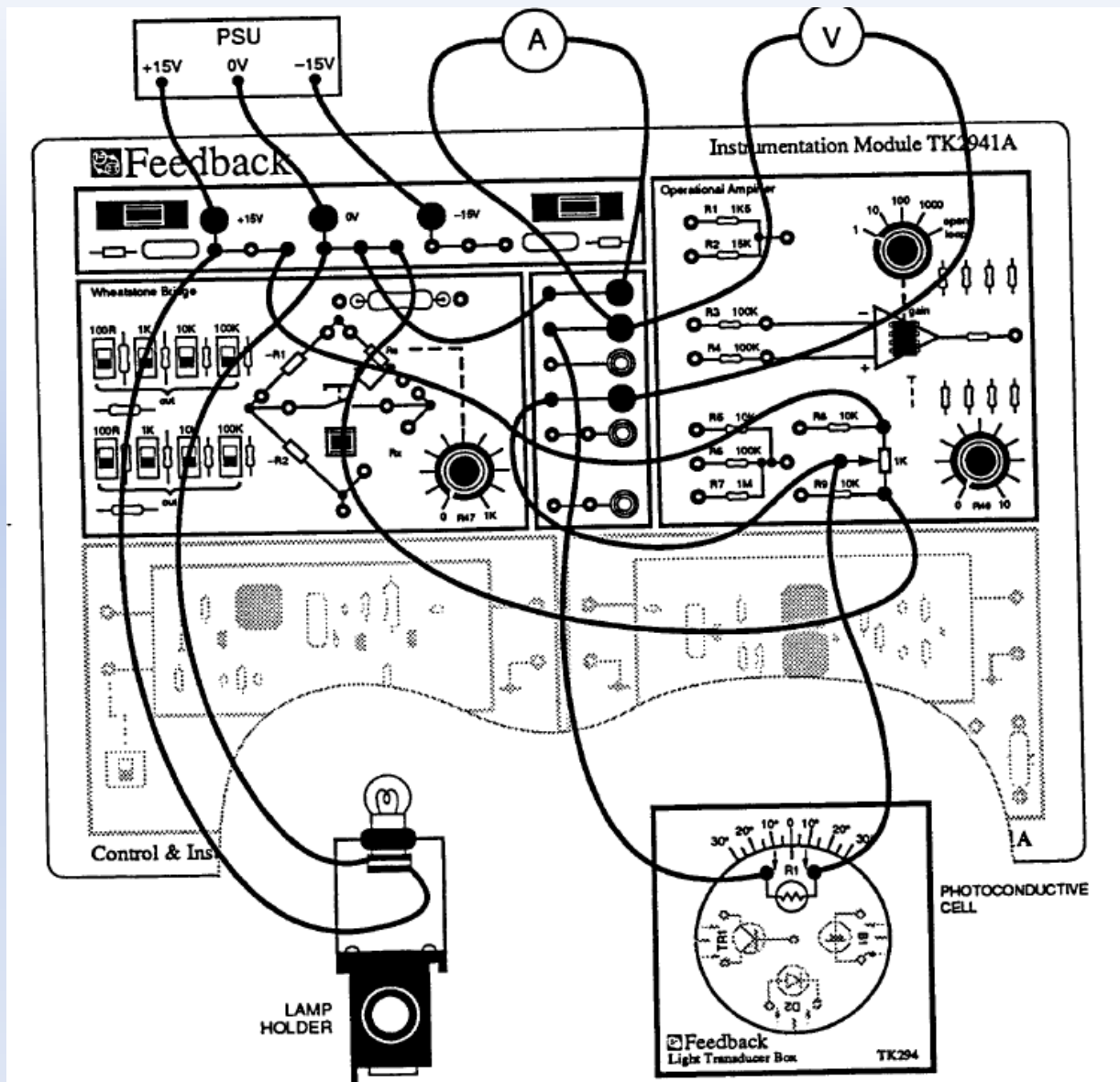
Όσο περισσότερο ευαίσθητο είναι ένα φωτοαγώγιμο στοιχείο τόσο πιο αργή είναι η αντίδρασή του (στο φως) και τόσο πιο μικρή απόκριση συχνότητας έχει.

Χαρακτηριστική απόκριση φωτοστοιχείου



Ο **χρόνος πτώσης** (fall time) του ρεύματος, που ακολουθεί το σβήσιμο του φωτός (light off), είναι μακρύτερος από το **χρόνο ανόδου** (rise time) του ρεύματος, αμέσως μετά το άναμα του φωτός (light on), επειδή παίρνει περισσότερο χρόνο στα ηλεκτρόνια να επαναδιεγερθούν μετά την παγίδευση.

Μέρος 1: Η Απόκριση στο Φωτισμό και Μέρος 2: Ο Νόμος Συνημιτόνου του Labert : Η Συνδεσμολογία



Μέρος 1: Η Απόκριση στο Φωτισμό – Εκτέλεση των μετρήσεων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.25.5

Σχετικός Φωτισμός (%)	Κλίμακα	Ρεύμα (mA)	Αντίσταση Φωτοστοιχείου (Ω)
100			
90			
80			
70			
60			
50			
40			
30			
25			
20			
10			
0			

Μέρος 2: Νόμος Συνημιτόνου του Lambert – Εκτέλεση των μετρήσεων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.25.6

Γωνία (μοίρες)	Ρεύμα (mA)
30 ACW	
25	
20	
15	
10	
5	
0	
5 CW	
10	
15	
20	
25	
30	