

## 1. Σκοπός

Η εργαστηριακή αυτή άσκηση αποσκοπεί α) στη μελέτη του φαινομένου της εξασθέ-  
νσης φωτός καθώς διέρχεται μέσα από διαφανή σώματα και β) στον προσδιορισμό  
του συντελεστή απορρόφησης των χρωστικών ουσιών που καλύπτουν τα σώματα.

## 2. Θεωρία

### *Εξασθένηση του φωτός*

Η εξασθένηση της έντασης φωτός που διέρχεται μέσα από ένα διαφανές μέσο, όπως  
είναι μια υάλινη πλάκα λευκή ή χρωματισμένη εξαρτάται από δύο ανεξάρτητα μεταξύ  
τους φαινόμενα, αφ' ενός από την ανάκλαση που υφίσταται το φως στις διαχωριστι-  
κές επιφάνειες της πλάκας (ή της κάθε πλάκας αν πρόκειται για περισσότερες) και  
αφ' ετέρου εξαρτάται από την απορρόφηση από την χρωστική ουσία που έχει χρησι-  
μοποιηθεί ως επίστρωση στην πλάκα.

Εξασθένηση φωτός = ανάκλαση + απορρόφηση

### *α) ανάκλαση φωτός*

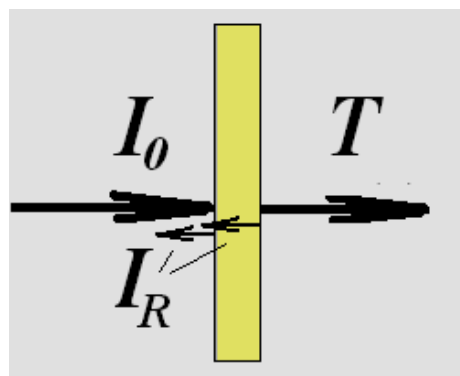
Την συνεισφορά της ανάκλασης προβλέπει ο ακόλουθος νόμος, εφ' όσον η πρόσπτω-  
ση του φωτός είναι κάθετη:

$$R = \left[ \frac{n-1}{n+1} \right]^2 \quad (1)$$

όπου  $n$  ο δείκτης διάθλασης του υλικού, πχ 1.5 για το γυαλί,  $R$  είναι ο βαθμός ανά-  
κλασης (reflection), τούτέστιν ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα έ-  
νταση φωτός. Ως εκ τούτου η διερχόμενη ένταση φωτός  $T$  (transmission) είναι

$$T = 1 - R \quad (2)$$

**Σχήμα 1.:** Σχηματική παράσταση της διαπερατό-  
τητας ως προς την προσπίπτουσα και ανακλώμενη  
ένταση φωτός

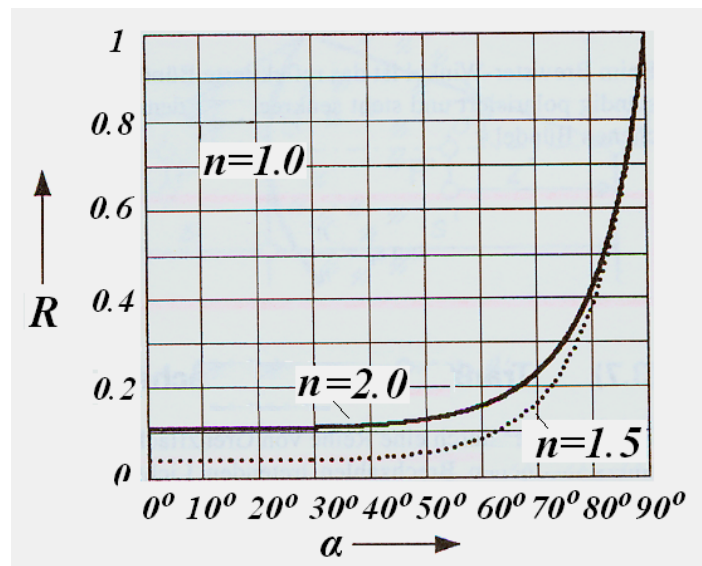


**Παράδειγμα:** Για  $n = 1.5$  η παραπάνω σχέση δίνει:

$$R = \left[ \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} \right]^2 = 0.04$$

δηλαδή  $R = 4\%$  και  $T = 96\%$

**Σχήμα 2.:** Γραφική παράσταση της σχέσης ανάκλασης  $R$  με την γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$  σε επιφάνεια για τρεις περιπτώσεις δείκτη διάθλασης ( $n=1, 1.5$  και  $2$ )



### β) απορρόφηση φωτός. Νόμος Lambert-Beer

Η εξασθένιση του φωτός λόγω απορρόφησης προβλέπεται από τον **νόμο** των Lambert και beer.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (3)$$

Η παραπάνω σχέση έχει προκύψει ως εξής: Θεωρείται ότι η μείωση της έντασης φωτός  $dI$  που συμβαίνει λόγω απορρόφησης, εξαρτάται από το πάχος του υλικού, από την αρχική έντασή του φωτός  $I_0$  και από μια σταθερά, τον συντελεστή απορρόφησης  $\mu$ , ο οποίος έχει σχέση με το ίδιο το υλικό, την χρωστική ουσία, στην περίπτωση των έγχρωμων γυαλιών, των φίλτρων ή την επίστρωση που έχει χρησιμοποιηθεί.

$$dI \approx -I_0 \cdot \mu \cdot dx \quad (4)$$

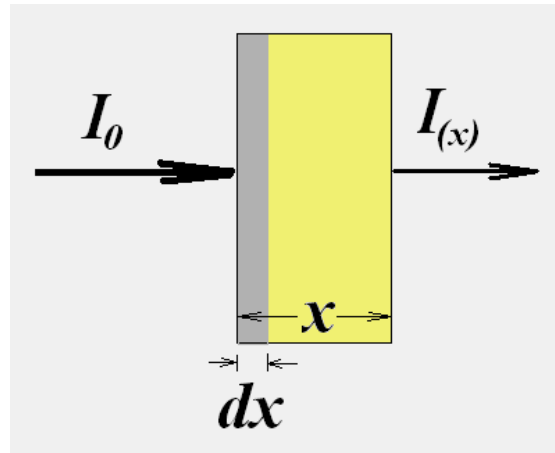
Διαχωρίζοντας τις άγνωστες παραμέτρους και ολοκληρώνοντας τα δύο μέρη της εξίσωσης από  $I$  έως  $I_0$  και  $0$  έως  $x$  αντίστοιχα προκύπτει, όπως φαίνεται στις ακόλουθες σχέσεις, η τελική εκθετική εξίσωση (σχέση 3 και 7), ως έκφραση του νόμου της απορρόφησης.

$$dI \approx -\mu \cdot I \cdot dx \Rightarrow \frac{dI}{I} = -\mu \cdot dx$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^x \mu \cdot dx \Rightarrow \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu \cdot x \quad (5,6,7)$$

$$\Rightarrow \underline{I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}}$$

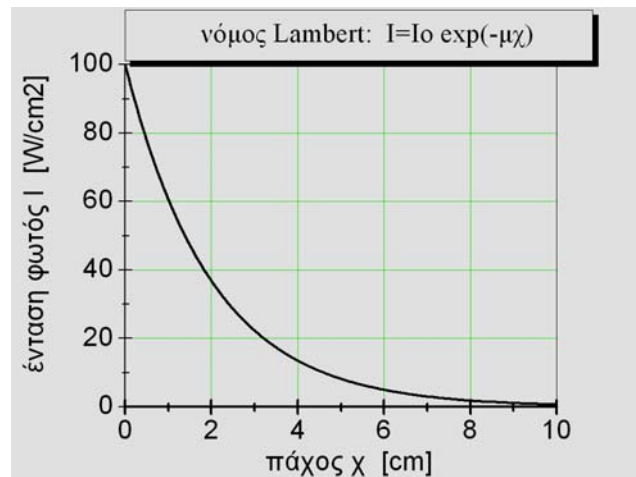
**Σχήμα 3.:** Σχηματική παράσταση της εξασθένησης έντασης φωτός μέσα από διαφανές σώμα πάχους  $x$



Είναι η ένταση  $I$  ανάλογη του φωτισμού  $B$  που μετράμε με ένα λουξόμετρο, τότε εύκολα μπορούμε να προσδιορίσουμε τον συντελεστή απορρόφησης του συγκεκριμένου υλικού, με απλές μετρήσεις.

Ο συντελεστής  $\mu$  που δίνεται σε  $[m^{-1}]$  αποτελεί ένα μέτρο της μείωσης της έντασης του φωτός λόγω απορρόφησης από το χρωστικό υλικό. Η τιμή του εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται.

**Σχήμα 4.:** Γραφική παράσταση του νόμου του Lambert που δείχνει την εξασθένηση του φωτός σαν συνάρτηση με το πάχος διαφανούς σώματος



### 3. Πειραματική διάταξη

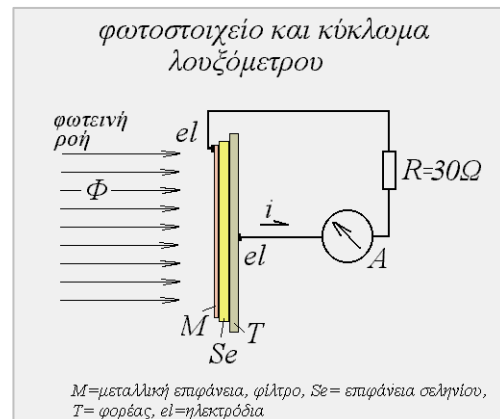
Το σύνολο των ασκήσεων που ακολουθούν πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός οργάνου μέτρησης φωτισμού, του λουξόμετρου. Σε δεδομένη επιφάνεια ενός φωτοστοιχείου από σελλήνιο, μετριέται η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται, η οποία είναι

ανάλογη της φωτεινής ροής, δηλαδή των φωτονίων που πέφτουν επάνω της. Συχνότερα μετράται με ένα αμπερόμετρο ακρίβειας το ρεύμα  $i$  σε [mA] που διατρέχει το κύκλωμα, στο οποίο ανάμεσα στις δύο επαφές του ημιαγωγού έχει προστεθεί εν σειρά ένας αντιστάτης ακρίβειας και σταθερής τιμής, πχ  $R = 30 \Omega$ .

Το κύκλωμα αυτό είναι ενδεικτικό και υλοποιείται στα κοινά λουξόμετρα, στα οποία η ένδειξη του αμπερόμετρου είναι ψηφιακή και οι τιμές εκφράζονται απευθείας, μετά από κάποια εσωτερική βαθμονόμηση που έχει γίνει, σε μονάδες lux. Ένα τέτοιο ψηφιακό λουξόμετρο, όπως αυτό που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα θα χρησιμοποιηθεί στις μετρήσεις, στις επιμέρους ασκήσεις που ακολουθούν.

Διαθέτει τρεις περιοχές μέτρησης, οι οποίες επιλέγονται ανάλογα με την ένταση του φωτός που πρόκειται να μετρηθεί.

**Σχήμα 5.:** Το κύκλωμα ενός τυπικού φωτοστοιχείου σχηματικά

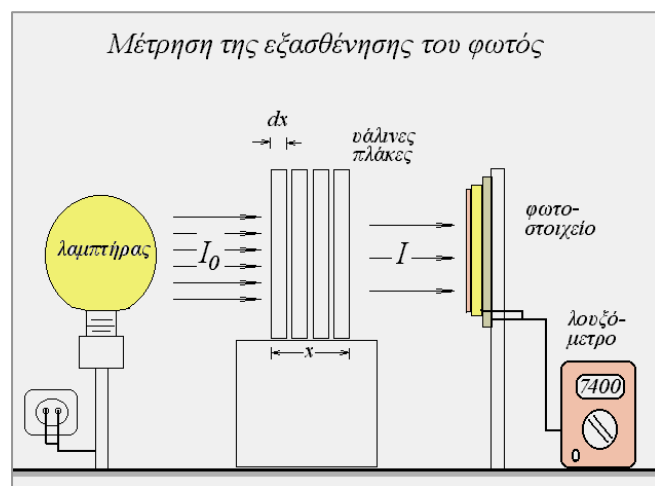


Για τον περιορισμό του φωτός που προέρχεται από το περιβάλλον, είτε παίρνουμε μια μέτρηση αναφοράς, δηλαδή πριν την εκάστοτε μέτρηση, την οποία αφαιρούμε κάθε φορά από την τιμή της μέτρησής μας, είτε χρησιμοποιούμε ένα προστατευτικό κάλυμμα για συσκότιση.

Προσαρμόζουμε έναν κύλινδρο από μαύρο αδιαφανές υλικό διαμέτρου όση και το φωτοστοιχείο του λουξόμετρου και μήκους περίπου 10 εκατοστά.

Το δεύτερο λουξόμετρο στην φωτογραφία είναι αναλογικό με αρκετά μεγάλη ευαισθησία και ακρίβεια. Με τον επιλογέα κλίμακας και περιοχής μέτρησης επιτρέπεται εύκολα να μετρηθούν πολύ αμυδροί έως πολύ έντονοι φωτισμοί, τουτέστιν από 0.01 lux έως 60.000 lux.

**Σχήμα 6:** Η σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης.



Εναλλακτικά και κατά περίπτωση με τα παραπάνω λουξόμετρα θα χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις φωτισμού και ένας κατάλληλος αισθητήρας, αυτός που φαίνεται στην φωτογραφία, ο οποίος συνδέεται μέσω της θύρας USB με τον υπολογιστή. Την μέτρηση και την συλλογή των δεδομένων σε μορφή πίνακα τιμών ή και γραφικών παραστάσεων αναλαμβάνει στην περίπτωση αυτή κατάλληλο λογισμικό πρόγραμμα που τρέχει στον υπολογιστή.

## Πειραματική διαδικασία

Η άσκηση αυτή αποτελείται από δύο διακριτά μέρη:

### Μετρήσεις

#### α) Εξασθένηση φωτός

Μετράται η εξασθένηση του φωτός λαμπτήρα, καθώς το φως διαπερνά μια σειρά από υάλινες απόλυτα διαφανείς πλάκες. Η ένταση του φωτός μετράται έμμεσα από τον φωτισμό που μας δίνει το λουξόμετρο. Για δεδομένη απόσταση λαμπτήρα φωτοστοιχείου μετράμε αρχικά τον φωτισμό χωρίς την παρεμβολή κάποιας υάλινης πλάκας. Προσδιορίζουμε έτσι την τιμή  $B_0$ . Ακολούθως τοποθετούμε ανάμεσα στον λαμπτήρα και στο λουξόμετρο, περίπου στο μέσο της απόστασης, μια υάλινη πλάκα δεδομένου πάχους, πχ 3 mm και μετράμε τον φωτισμό, δηλαδή την ένταση του φωτός που διήλθε.

Στην συνέχεια προσθέτουμε και δεύτερη πλάκα, μετά και τρίτη κοκ., αυξάνοντας έτσι βαθμιδωτά το συνολικό πάχος του υλικού, από το οποίο περνάει το φως. Κάθε φορά δε μετράμε τον φωτισμό από την ένδειξη του λουξόμετρου και καταχωρούμε τις τιμές στον πίνακα τιμών στην αντίστοιχη σειρά. Αιτιολογούμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν, βάσει της θεωρίας.

#### β) Απορρόφηση φωτός. Συντελεστής απορρόφησης

Μετράμε την απορρόφηση που υπέστη το φως του λαμπτήρα καθώς το φως διαπερνά μια σειρά από υάλινες, έγχρωμες πλάκες (μιας χρώσης). Η ένταση του φωτός μετρείται αρχικά χωρίς την μεσολάβηση κάποιας πλάκας, ως  $B_0$ . Ακολούθως τοποθετείται η πρώτη πλάκα και μετράται ο φωτισμός με το λουξόμετρο. Καταχωρείται η τιμή μέτρησης στον πίνακα τιμών. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για μια σειρά από πλάκες, αυξάνοντας βαθμιδωτά το συνολικό πάχος του υλικού.

### Επεξεργασία δεδομένων

Αφού κάνουμε τους απαραίτητους υπολογισμούς στις στήλες του πίνακα τιμών, όπως την εύρεση του λόγου  $B/B_0$  και τον λογάριθμο  $\ln(B/B_0)$ , κατασκευάζουμε την γραφική παράσταση  $\ln(B/B_0) = f(x)$ . Η γραφική παράσταση μπορεί να γίνει είτε με το χέρι σε μιλιμετρέ χαρτί, είτε με κάποιο κατάλληλο πρόγραμμα στον υπολογιστή, όπως πχ με το Excel ή το Origin.

Από την σωστή τοποθέτηση των πειραματικών δεδομένων προκύπτει μια ευθεία γραμμή που περνάει από το μηδέν (αρχή των αξόνων). Εύκολα διαπιστώνει κανείς ότι **η κλίση** της ευθείας αυτής μας δίνει την τιμή του συντελεστή απορρόφησης  $\mu$  του υλικού.

$$\ln\left(\frac{B}{B_0}\right) = -\mu \cdot x$$

Υπολογίζουμε τον συντελεστή απορρόφησης του υλικού και σχολιάζουμε το αποτέλεσμα.

$$B_0 = \dots\dots [lux]$$

ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΙΙ				
A/A	Πάχος x έγχρωμων υαλοπινάκων σε [mm]	Ενδειξη λουξόμε- τρου B σε [lux]	Λόγος φωτισμού προς αρχικό φωτισμό, B/B <sub>0</sub>	Λογάριθμος του λόγου (B/B <sub>0</sub> ), ln(B/B <sub>0</sub> )
1				
2				
3				
4				
5				

**Διόρθωση πειραματικής τιμής απορρόφησης:** Στη διαδικασία που ακολουθήθηκε παραπάνω δεν λήφθηκε υπόψη η μείωση της έντασης διερχόμενης ακτινοβολίας λόγω ανάκλασης στις διαδοχικές επιφάνειες των υάλινων πλακών. Ως εκ τούτου θα πρέπει η τιμή του συντελεστή απορρόφησης μ να υποστεί την εξής διόρθωση: Αφαιρούμε απ' αυτή την συνεισφορά της ανάκλασης μ<sub>ανακλ</sub>, η οποία προέκυψε στην προηγούμενη άσκηση (πίνακας τιμών Ι).

$$\mu_{απορ} = \mu - \mu_{ανακλ}$$

Η τιμή μ<sub>ανακλ</sub> υπολογίζεται από την γραφική παράσταση ln(B/B<sub>0</sub>)=f(x) που κατασκευάζουμε με τις τιμές του πίνακα Ι. Σ' αυτήν η κλίση της ευθείας που προκύπτει μας δίνει την τιμή μ<sub>ανακλ</sub> κάνοντας την απλή παραδοχή: Θεωρεί κανείς ότι η μείωση του διερχόμενου φωτός λόγω ανάκλασης είναι μια φθίνουσα εκθετική συνάρτηση, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των επιφανειών ανάκλασης Ν, τον βαθμό ανάκλασης της κάθε μιάς επιφάνειας και το πάχος L των πλακών.

$$\ln\left(\frac{B}{B_0}\right) = -\frac{N \cdot R}{L} \cdot x \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{B}{B_0}\right) = -\mu_{ανακλ} \cdot x$$

Στην συνέχεια σχολιάζουμε το αποτέλεσμα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ Ι				
A/ A	Πάχος x υαλοπί- νακα σε [mm]	Ενδειξη λουξόμε- τρου σε [lux]	Λόγος φωτισμού προς αρχικό φω- τισμό, $B/B_0$	$\ln (B/B_0)$
1				
2				
3				
4				
5				

**Εικόνα 1.:** Φωτογραφίες από δύο τυπικά λουξόμετρα εργαστηρίου, ένα ψηφιακό και ένα αναλογικού τύπου.



**Εικόνα 2.:** Φωτογραφίες από αισθητήρα (μεταλλάκτη) για την μέτρηση της έντασης φωτός, ο οποίος συνδέεται άμεσα με την θύρα USB του υπολογιστή.

