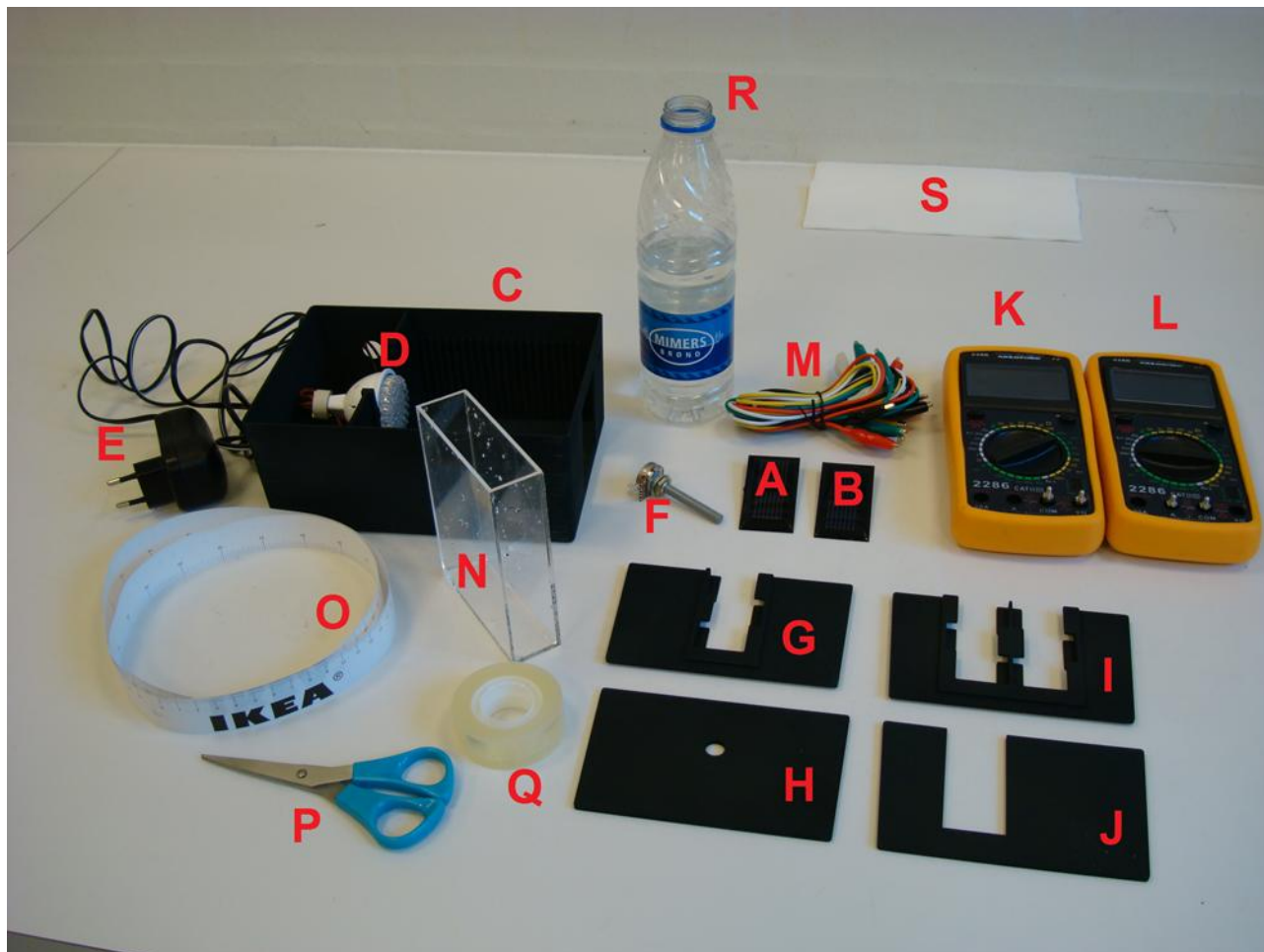


2.0 Εισαγωγή

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε αυτό το πείραμα φαίνεται στην Εικ. 2.1.



Εικόνα 2.1 Ο εξοπλισμός του πειράματος E2.

Λίστα εξοπλισμού (βλ. Εικ. 2.1):

A: Ηλιακή κυψέλη

B: Ηλιακή κυψέλη

C: Κουτί με υποδοχές για τη στερέωση της φωτεινής πηγής, των ηλιακών κυψελών κ.λπ.

D: Φωτεινή πηγή LED σε στήριγμα

E: Τροφοδοτικό για τη φωτεινή πηγή D

F: Μεταβλητός αντιστάτης

G: Στήριγμα για την τοποθέτηση της ηλιακής κυψέλης στο κουτί C

H: Πλάκα με κυκλική οπή για χρήση στο κουτί C

I: Στήριγμα για την τοποθέτηση των δύο ηλιακών κυψελών στο κουτί C

J: Πλάκα προστασίας για χρήση στο κουτί C

K: Ψηφιακό πολύμετρο

L: Ψηφιακό πολύμετρο

M: Καλώδια με μικρά κροκοδειλάκια

N: Διαφανές δοχείο (μεγάλη κυψελίδα)

O: Μετροταινία

P: Ψαλίδι

Q: Σελοτέιπ

R: Νερό για την πλήρωση του διαφανούς δοχείου N

S: Χαρτοπετσέτες για το παραπανήσιο νερό

T: Πλαστικά ποτήρια για το νερό από το διαφανές δοχείο N (δε φαίνονται στην Εικ. 2.1)

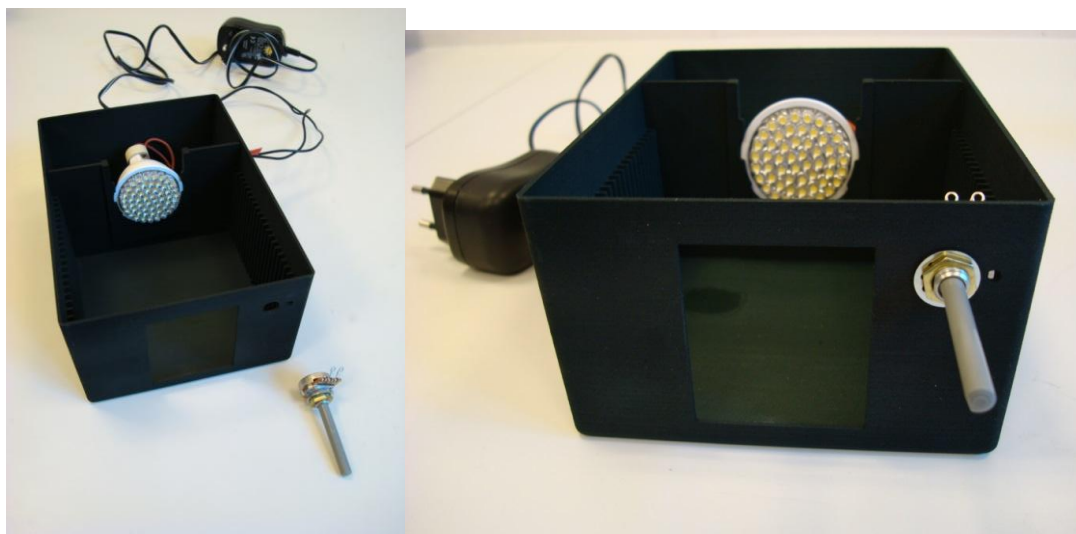
U: Πλαστικό σταγονόμετρο (δε φαίνεται στην Εικ. 2.1)

V: Καπάκι για το κουτί C (δε φαίνεται στην Εικ. 2.1)

Φύλλο Δεδομένων: Πίνακας θεμελιωδών Σταθερών

Ταχύτητα του φωτός στο κενό	c	$= 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Στοιχειώδες φορτίο	e	$= 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Σταθερά του Boltzmann	k_B	$= 1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Μια ηλιακή κυψέλη μετατρέπει μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας του προσπίπτοντος φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω του διαχωρισμού φορτίων στο εσωτερικό της. Έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Το πείραμα E2 στοχεύει στην εξέταση των ηλιακών κυψελών με τη χρήση του παρεχόμενου εξοπλισμού, που αποτελείται από ένα κουτί με στηρίγματα για τη φωτεινή πηγή, για τις ηλιακές κυψέλες, και για διάφορες πλάκες, και ένα καπάκι. Ο μεταβλητός αντιστάτης θα πρέπει να στερεωθεί στο κουτί, βλ. Εικ. 2.2. Ένας από τους τρεις ακροδέκτες έχει αφαιρεθεί, αφού μόνο οι άλλοι δύο ακροδέκτες θα χρησιμοποιηθούν. Παρέχονται επίσης καλώδια με μικρά κροκοδειλάκια και δύο ηλιακές κυψέλες (στις οποίες αναγράφονται ένας σειριακός αριθμός και τα γράμματα A ή B) με σημεία σύνδεσης στο πίσω μέρος. Οι δύο ηλιακές κυψέλες είναι παρόμοιες αλλά μπορεί να διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους (λόγω κατασκευαστικών αποκλίσεων). Τα δύο πολύμετρα έχουν εφοδιαστεί με ακροδέκτες για την ενδεδειγμένη χρήση ως αμπερόμετρο και βολτόμετρο, αντίστοιχα, βλ. Εικ. 2.3. Τέλος, στο πείραμα θα χρησιμοποιηθεί ένα διαφανές δοχείο καθώς και εμφιαλωμένο νερό.



Εικόνα 2.2 (α) Κουτί με φωτεινή πηγή και αντιστάτη για στήριξη. **(β)** Ο αντιστάτης στερεωμένος στο κουτί. Παρατηρήστε ότι η μικρή ακίδα του αντιστάτη ταιριάζει στην οπή που βρίσκεται στα δεξιά του στελέχους.



Εικόνα 2.3 Πολύμετρα εφοδιασμένα με τερματικά για χρήση ως αμπερόμετρο (**αριστερά**) και βολτόμετρο (**δεξιά**), αντίστοιχα. Το όργανο τίθεται σε λειτουργία πατώντας το κουμπί “POWER” στην πάνω αριστερή γωνία. Το όργανο τίθεται εκτός λειτουργίας αυτόματα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αδράνειας. Μπορεί να μετρήσει συνεχές ρεύμα και τάση (=) καθώς επίσης και εναλλασσόμενα (~). Η εσωτερική αντίσταση του βολτομέτρου είναι 10 MΩ ανεξάρτητα από την κλίμακα μετρήσεων. Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αμπερομέτρου είναι 200 mV σε πλήρη μέτρηση, ανεξάρτητα από την κλίμακα μετρήσεων. Σε περίπτωση υπερχειλίσης, θα εμφανιστεί στην οθόνη η ένδειξη “1”, οπότε πρέπει να επιλέξετε μια ευρύτερη

κλίμακα μετρήσεων. Το κουμπί “HOLD” (πάνω δεξιά γωνία) δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί, εκτός αν θέλετε να “παγώσετε” μια μέτρηση.

ΠΡΟΣΟΧΗ: Μην χρησιμοποιήσετε το πολύμετρο για μέτρηση αντιστάσεων (ωμόμετρο) των ηλιακών κυψελών αφού το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να τις καταστρέψει. Όταν αλλάζετε την κλίμακα μετρήσεων στα πολύμετρα, παρακαλώ γυρίστε το διακόπτη με προσοχή. Μπορεί να είναι ασταθής και να σπάσει. Κατά τη μέτρηση ελέγξτε ότι υπάρχει αριθμός κάτω από την υποδιαστολή – αν ο περιστρεφόμενος διακόπτης δε βρίσκεται στη σωστή θέση, το πολύμετρο δε θα πραγματοποιεί μετρήσεις, ακόμη κι αν εμφανίζονται ψηφία στην οθόνη του.

Σημείωση: Μην αλλάζετε την τάση του τροφοδοτικού. Πρέπει να παραμείνει στα 12V σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. (Το τροφοδοτικό για τη φωτεινή πηγή θα πρέπει να συνδεθεί στην έξοδο (230 V ~) του πάγκου εργασίας σας.)

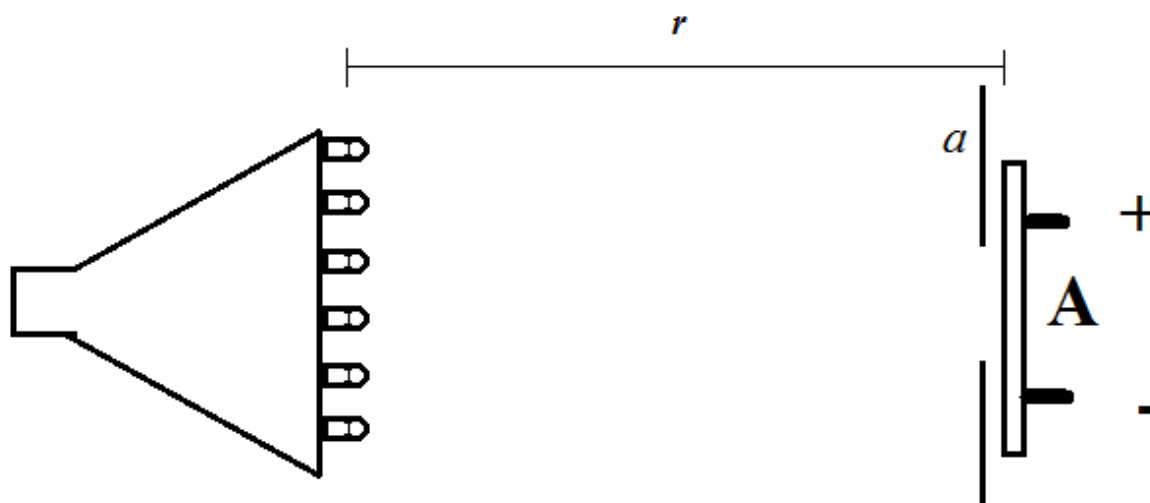
Σημείωση: Συνυπολογισμός σφαλμάτων απαιτείται μόνο όπου αναφέρεται ρητά.

Σημείωση: Όλες οι μετρούμενες και υπολογιζόμενες τιμές πρέπει να δίνονται στο S.I.

Σημείωση: Για όλες τις μετρήσεις έντασης και τάσης στο πείραμα αυτό η φωτεινή πηγή LED πρέπει να είναι αναμμένη.

2.1 Η σχέση του ρεύματος της ηλιακής κυψέλης με την απόσταση από τη φωτεινή πηγή

Στην ερώτηση αυτή θα μετρήσετε την ένταση I , του ρεύματος που παράγεται από την ηλιακή κυψέλη συνδεδεμένη με αμπερόμετρο, και θα προσδιορίσετε τη σχέση της με την απόσταση r από τη φωτεινή πηγή. Το φως παράγεται στο εσωτερικό κάθε μιας διόδου, συνεπώς η απόσταση r θα πρέπει να μετρηθεί με τον τρόπο που φαίνεται στην Εικ. 2.4.



Εικόνα 2.4 Κάτοψη της διάταξης για την ερώτηση 2.1. Σημειώστε ότι το άνοιγμα a βρίσκεται ακριβώς μπροστά από την ηλιακή κυψέλη A. Η απόσταση μετρείται από το εσωτερικό των διόδων μέχρι την επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης.

Μην αλλάξετε την κλίμακα μετρήσεων του αμπερομέτρου σε αυτό το πείραμα: η εσωτερική αντίσταση του αμπερομέτρου εξαρτάται από την κλίμακα μετρήσεων και επηρεάζει την ένταση του ρεύματος που παράγεται από την ηλιακή κυψέλη. Σημειώστε στο Φύλλο Απαντήσεων τους Σειριακούς Αριθμούς της φωτεινής πηγής και της ηλιακής κυψέλης A. Στερεώστε τη φωτεινή πηγή στο στήριγμα σχήματος U (η φωτεινή πηγή εφαρμόζει σφιχτά στο στήριγμα, οπότε πρέπει να είστε υπομονετικοί κατά την τοποθέτηση). Στερεώστε την ηλιακή κυψέλη A σε ένα στήριγμα και μαζί τοποθετήστε την πλάκα της κυκλικής οπής ακριβώς μπροστά από την A. Η ένταση I ως συνάρτηση της απόστασης r από τη φωτεινή πηγή μπορεί, όταν το r δεν είναι πολύ μικρό, να προσεγγιστεί από τη σχέση

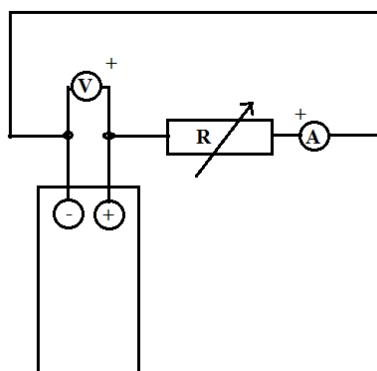
$$I(r) = \frac{I_a}{1 + \frac{r^2}{a^2}}$$

Όπου τα I_a και a είναι σταθερές.

2.1a	Μετρήστε το I ως συνάρτηση του r , και γράψτε τον πίνακα των μετρήσεών σας.	1,0
2.1b	Βρείτε τις τιμές των I_a και a χρησιμοποιώντας κατάλληλη γραφική μέθοδο.	1,0

2.2 Χαρακτηριστική καμπύλη της ηλιακής κυψέλης

Αφαιρέστε την πλάκα της κυκλικής οπής. Τοποθετήστε το μεταβλητό αντιστάτη στο δοχείο όπως φαίνεται στην Εικ. 2.2. Τοποθετήστε τη φωτεινή πηγή στην υποδοχή με τον αριθμό 0, στην πιο μεγάλη απόσταση από τον αντιστάτη. Τοποθετήστε την ηλιακή κυψέλη A στο απλό στήριγμα χωρίς την πλάκα κυκλικής οπής στην σχισμή με τον αριθμό 10. Κατασκευάστε το κύκλωμα της Εικ. 2.5, έτσι ώστε να παίρνετε μετρήσεις για τη χαρακτηριστική της κυψέλης δηλαδή μετρήσεις για την τάση στα άκρα της κυψέλης U ως συνάρτηση της έντασης του ρεύματος I στο κύκλωμα που αποτελείται από την κυψέλη, τον αντιστάτη και το αμπερόμετρο.



Εικόνα 2.5 Το ηλεκτρικό κύκλωμα για τη χαρακτηριστική στην ερώτηση 2.2.

2.2a	Να καταγράψετε όλες τις μετρήσεις της τάσης U και της έντασης του ρεύματος I σε πίνακα.	0,6
2.2b	Να χαράξετε από τις πιο πάνω τιμές την Τάση ως συνάρτηση της έντασης (χαρακτηριστική καμπύλη)	0,8

2.3 Θεωρητική χαρακτηριστική καμπύλη της κυψέλης

Για την ηλιακή κυψέλη σε αυτό το πείραμα, το ρεύμα σε συνάρτηση με την τάση δίνεται από την εξίσωση

$$I = I_{\max} - I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right) - 1 \right)$$

Όπου οι παράμετροι $I_{\max}$, I_0 και η είναι σταθερές για δεδομένη φωτοβολία. Λαμβάνουμε τη θερμοκρασία να είναι $T = 300 \text{ K}$. Οι θεμελιώδεις σταθερές e και k_B είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και η σταθερά του Boltzmann, αντίστοιχα.

2.3a	Να χρησιμοποιήσετε τη χαρακτηριστική από της ερώτηση 2.2b για να προσδιορίσετε το $I_{\max}$.	0,4
------	--	-----

Η παράμετρος η μπορεί να θεωρηθεί ότι κυμαίνεται στο διάστημα 1 με 4. Για κάποιες τιμές της τάσης U , η πιο πάνω σχέση μπορεί να προσεγγιστεί με τη σχέση

$$I \approx I_{\max} - I_0 \exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right)$$

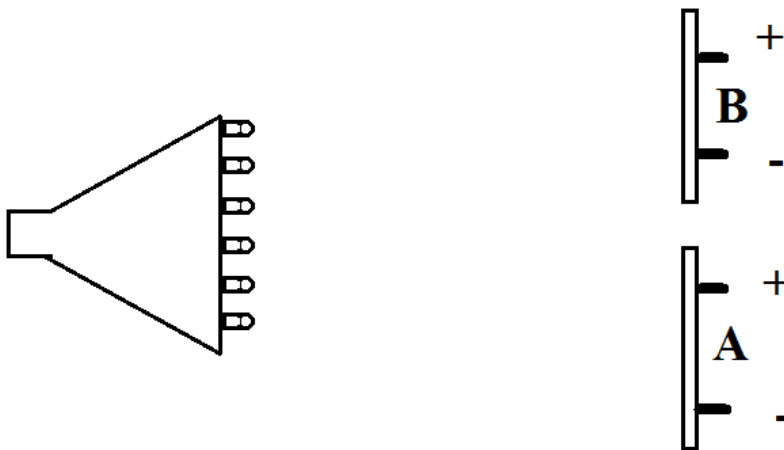
2.3b	Εκτιμήστε για ποιες τιμές της τάσης U ισχύει η πιο πάνω προσέγγιση. Προσδιορίστε γραφικά τις τιμές των I_0 και η για τη κυψέλη που χρησιμοποιήσατε.	1,2
------	--	-----

2.4 Μέγιστη Ισχύς της ηλιακής κυψέλης

2.4a	Η μέγιστη ισχύς την οποία η ηλιακή κυψέλη μπορεί να δώσει στο εξωτερικό κύκλωμα συμβολίζεται με $P_{\max}$. Να προσδιορίσετε την τιμή της $P_{\max}$ για την κυψέλη που χρησιμοποιήσατε χρησιμοποιώντας λίγες κατάλληλες μετρήσεις (Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε κάποιες από τις μετρήσεις σας στην ερώτηση 2.2).	0,5
2.4b	Να υπολογίσετε τη βέλτιστη αντίσταση φορτίου, R_{opt} , δηλαδή την ολική εξωτερική αντίσταση όταν η ηλιακή κυψέλη αποδίδει στο εξωτερικό κύκλωμα τη μέγιστη ισχύ της στην R_{opt} . Να γράψετε το αποτέλεσμα σας μαζί με το σφάλμα και να δείξετε τη μέθοδό σας με κατάλληλους υπολογισμούς.	0,5

2.5 Συγκρίνοντας τις ηλιακές κυψέλες

Τοποθετήστε και τις δύο ηλιακές κυψέλες (A και B) στο διπλό στήριγμα με τον αριθμό 15, βλέπε Εικ. 2.6.



Εικόνα 2.6 Κάτοψη της πηγής φωτός και ηλιακές κυψέλες στην ερώτηση 2.5.

2.5a	Να μετρήσετε, για τη δεδομένη φωτεινότητα: - Την μέγιστη διαφορά δυναμικού U_A που μπορεί να μετρηθεί για την κυψέλη A. - Την μέγιστη ένταση του ρεύματος I_A που μπορεί να μετρηθεί για την κυψέλη A. Να επαναλάβετε τα πιο πάνω για την κυψέλη B.	0,5
2.5b	Να σχεδιάσετε τα αντίστοιχα ηλεκτρικά κυκλώματα δείχνοντας την καλωδίωση των ηλιακών κυψελών και των μετρητών.	0,3

2.6 Συνδέοντας τις ηλιακές κυψέλες

Οι δύο ηλιακές κυψέλες μπορούν να συνδεθούν σε σειρά με δύο διαφορετικούς τρόπους όπως φαίνεται στην Εικ. 2.7. Υπάρχουν επίσης δύο διαφορετικοί τρόποι να συνδεθούν παράλληλα (Δεν φαίνονται στην Εικόνα).

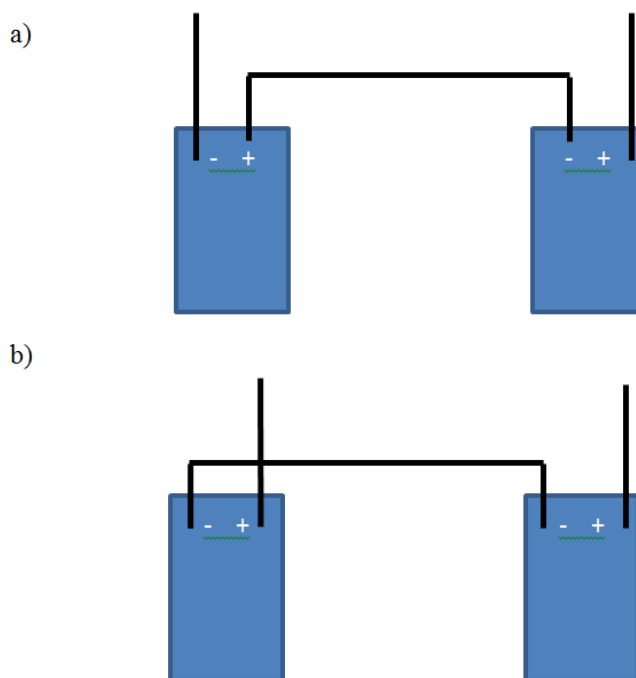
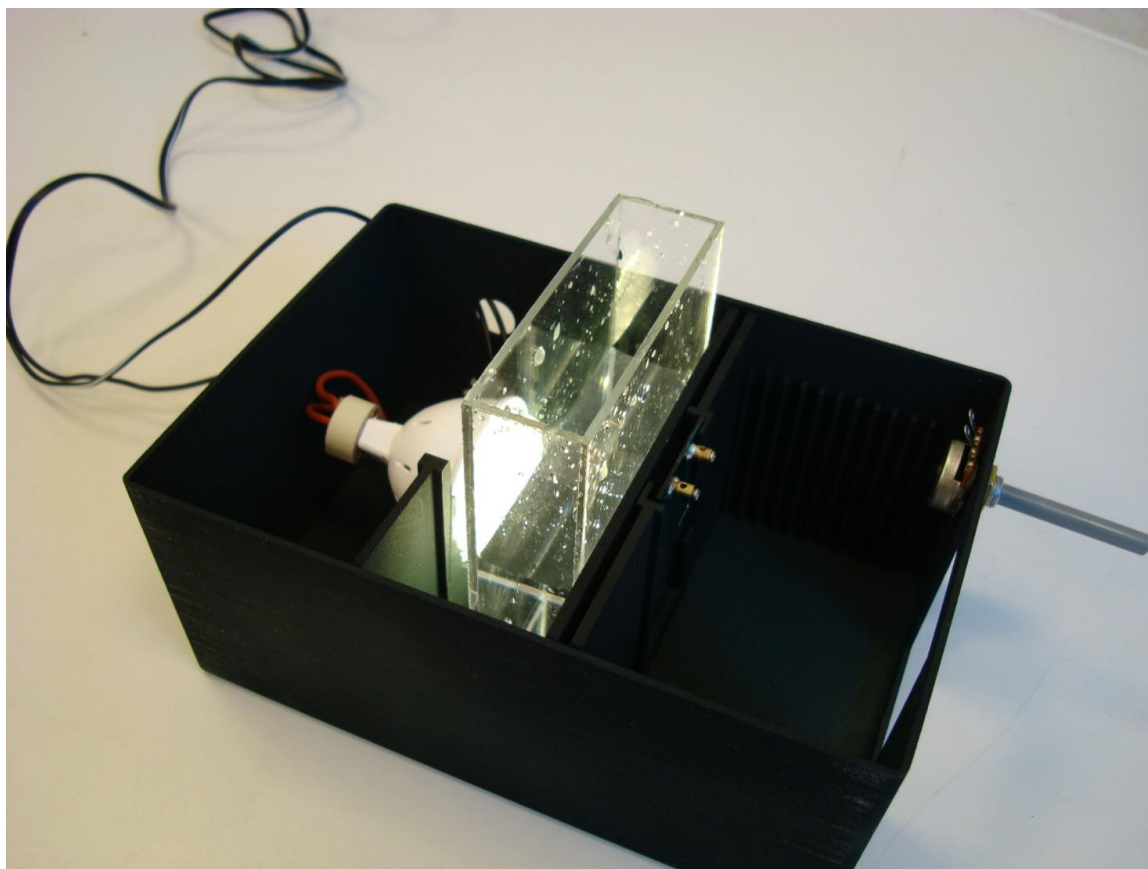


Figure 2.7 Δύο τρόποι σύνδεσης των κυψελών σε σειρά για την ερώτηση 2.6. Οι δύο τρόποι για παράλληλη σύνδεση δεν φαίνονται.

2.6a	Να προσδιορίσετε ποια σύνδεση των δύο κυψελών δίνει τη μεγαλύτερη δυνατή ισχύ στο εξωτερικό κύκλωμα όταν η μια από τις κυψέλες θωρακίζεται με την πλάκα θωράκισης (J στην Εικ. 2.1). Σχόλιο: Μπορείτε να εκτιμήσετε τη μέγιστη ισχύ πολύ εύκολα, υπολογίζοντάς τη από τη μέγιστη τάση και το μέγιστο ρεύμα που μετράτε σε κάθε συνδεσμολογία. Να σχεδιάσετε τα αντίστοιχα ηλεκτρικά κυκλώματα.	1,0
------	--	-----

2.7 Η επίδραση του διαφανούς δοχείου (μεγάλη κυψελίδα) στην ένταση του ρεύματος της κυψέλης

Τοποθετήστε την πηγή φωτός στο κουτί και τοποθετήστε την κυψέλη Α στην απλή υποδοχή με την κυκλική οπή ακριβώς μπροστά, έτσι ώστε να υπάρχει απόσταση περίπου 50 mm μεταξύ της κυψέλης και της φωτεινής πηγής. Τοποθετήστε το άδαιο διαφανές δοχείο ακριβώς μπροστά από την κυκλική οπή όπως δείχνει η Εικ. 2.8.



Εικόνα 2.8 Πειραματική διάταξη του ερωτήματος 2.7.

2.7a	Να μετρήσετε την ένταση του ρεύματος I με τον ίδιο τρόπο όπως στο ερώτημα 2.1, αλλά τώρα ως συνάρτηση του ύψους h του νερού που περιέχεται στο διαφανές δοχείο, βλ. Εικ. 2.8. Να κάνετε ένα πίνακα για τις μετρήσεις και να σχεδιάσετε τη γραφική παράσταση.	1,0
2.7b	Να εξηγήσετε μόνο με σχεδιαγράμματα και σύμβολα τη μορφή της πιο πάνω γραφικής παράστασης.	1,0

Να στερεώσετε την πηγή φωτός στο κουτί και να τοποθετήσετε την ηλιακή κυψέλη Α στη μονή θήκη, έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ της ηλιακής κυψέλης και της πηγής φωτός να είναι μέγιστη. Να τοποθετήσετε τη πλάκα με την κυκλική οπή ακριβώς μπροστά από την ηλιακή κυψέλη.

2.7c	Για αυτή την πειραματική διάταξη να κάνετε τα ακόλουθα: - Να μετρήσετε την απόσταση r_1 μεταξύ της φωτεινής πηγής και της ηλιακής κυψέλης και την ένταση του ρεύματος I_1 . - Να τοποθετήσετε το άδειο διαφανές δοχείο ακριβώς μπροστά από την πλάκα με την	0,6
------	---	-----

	κυκλική οπή και να μετρήσετε την ένταση του ρεύματος I_2. - Να γεμίσετε το δοχείο με νερό, σχεδόν μέχρι την κορυφή, και να μετρήσετε την ένταση του ρεύματος I_3.	
2.7d	Να χρησιμοποιήσετε τις μετρήσεις από το 2.7c για να βρείτε την τιμή του δείκτη διάθλασης, n_w του νερού. Να περιγράψετε τη μέθοδο εργασίας σας με τα κατάλληλα σχήματα και εξισώσεις. Μπορείτε να συμπεριλάβετε πρόσθετες μετρήσεις.	1,6

Φύλλο Απαντήσεων Κωδικός Χώρας (2 γράμματα)

Αριθμός Μαθητή (1-5)

	Σειριακοί αριθμοί: Φωτεινή πηγή ηλιακή κυψέλη	Βαθμοί																																																																
2.1a	Πίνακας του I ως συνάρτηση του r: <table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>																																																																	1,0
2.1b	Ρεύμα $I_a =$ τιμή $a =$ Σε χωριστό φύλλο δείξτε τους υπολογισμούς και τη γραφική μέθοδο που χρησιμοποιήσατε.	1,0																																																																
2.2a	Πίνακας των αντίστοιχων μετρήσεων των U και I: <table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>																																																																	0,6

Φύλλο Απαντήσεων Κωδικός Χώρας (2 γράμματα)		Αριθμός Μαθητή (1-5)
2.2b	Από τις τιμές αυτές να χαράξετε τη χαρακτηριστική καμπύλη σε χωριστό Φύλλο.	0,8
2.3a	Ρεύμα $I_{\max} =$ Σε χωριστό φύλλο να δικαιολογήσετε την ερμηνεία του γραφήματος στο ερώτημα 2.2b	0,4
2.3b	Εύρος τιμών του $U =$ Ρεύμα $I_0 =$ $\eta =$ Σε χωριστό φύλλο να συμπεριλάβετε το γράφημα	1,2
2.4a	Ισχύς $P_{\max} =$ Σε χωριστό φύλλο να συμπεριλάβετε τη δικαιολόγηση	0,5
2.4b	Αντίσταση $R_{\text{opt}} \pm \Delta R_{\text{opt}} =$ Σε χωριστό φύλλο να συμπεριλάβετε τη δικαιολόγηση της μεθόδου	0,5
2.5a	$U_A =$ $I_A =$ $U_B =$ $I_B =$	0,5
2.5b	Σχεδιάστε τα ηλεκτρικά κυκλώματα σε χωριστό φύλλο.	0,3
2.6a	Σε χωριστό φύλλο να δικαιολογήσετε ποια σύνδεση των δύο κυψελών δίνει τη μεγαλύτερη δυνατή ισχύ στο εξωτερικό κύκλωμα. Να σχεδιάσετε τα αντίστοιχα ηλεκτρικά κυκλώματα σε χωριστό φύλλο.	1,0

Φύλλο Απαντήσεων Κωδικός Χώρας (2 γράμματα)

Αριθμός Μαθητή (1-5)

2.7a	Πίνακας του I σε συνάρτηση με το h :				1,0
Να σχεδιάσετε τη γραφική παράσταση σε χωριστό φύλλο					
2.7b	Να συμπεριλάβετε τα σχεδιαγράμματα και τα σύμβολα σε ξεχωριστό φύλλο.				1,0
2.7c	Απόσταση $r_1 =$ Ρεύμα $I_1 =$ Ρεύμα $I_2 =$ Ρεύμα $I_3 =$				0,6
2.7d	Δείκτης διάθλασης $n_w =$ Να συμπεριλάβετε δικαιολόγηση της μεθόδου σε χωριστό φύλλο				1,6
	Σύνολο				12,0

SOLUTION

2.1 The dependence of the solar cell current on the distance to the light source

$$I(r) = \frac{I_a}{1 + \frac{r^2}{a^2}}$$

2.1a	Measure I as a function of r , and set up a table of your measurements.	1.0
2.1b	Determine the values of I_a and a by the use of a suitable graphical method.	1.0

slot #	r mm	I mA	$1/I$ 1/mA	r^2 mm ²
3	9.0	5.440	0.184	81
4	14.5	5.290	0.189	210
5	20.0	5.010	0.200	400
6	25.5	4.540	0.220	650
7	31.0	3.840	0.260	961
8	36.5	3.230	0.310	1332
9	42.0	2.730	0.366	1764
10	47.5	2.305	0.434	2256
11	53.0	1.985	0.504	2809
12	58.5	1.730	0.578	3422
13	64.0	1.485	0.673	4096
14	69.5	1.305	0.766	4830
15	75.0	1.140	0.877	5625
16	80.5	1.045	0.957	6480
17	86.0	0.930	1.075	7396
18	91.5	0.840	1.190	8372
19	97.0	0.755	1.325	9409
20	102.5	0.690	1.449	10506

$$I \left(1 + \frac{r^2}{a^2} \right) = I_a$$

$$r^2 = I_a a^2 \cdot \frac{1}{I} - a^2$$

$$a^2 = 1200 \text{ mm}^2 \pm 100 \text{ mm}^2,$$

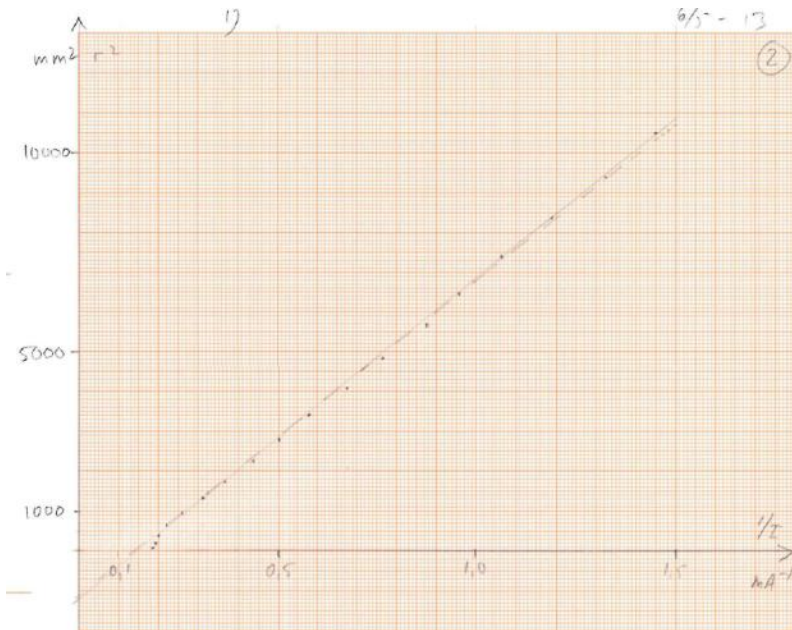
$$a = 35 \text{ mm} \pm \pm 2 \text{ mm}$$

$$I_a a^2 = \frac{10870 - 0}{1.50 - 0.15} \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mA}^{-1}} = 8051.85 \dots \text{mm}^2 \text{mA}$$

$$I_a = \frac{8051.85 \frac{\text{mm}^2}{\text{mA}^{-1}}}{1200 \text{ mm}^2} = 6.7 \text{ mA} \pm 0.5 \text{ mA}$$

$$(I_a a^2)_{\min} = \frac{10700 - 0}{1.50 - 0.14} \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mA}^{-1}} = 7867.6 \dots \text{mm}^2 \text{mA}$$

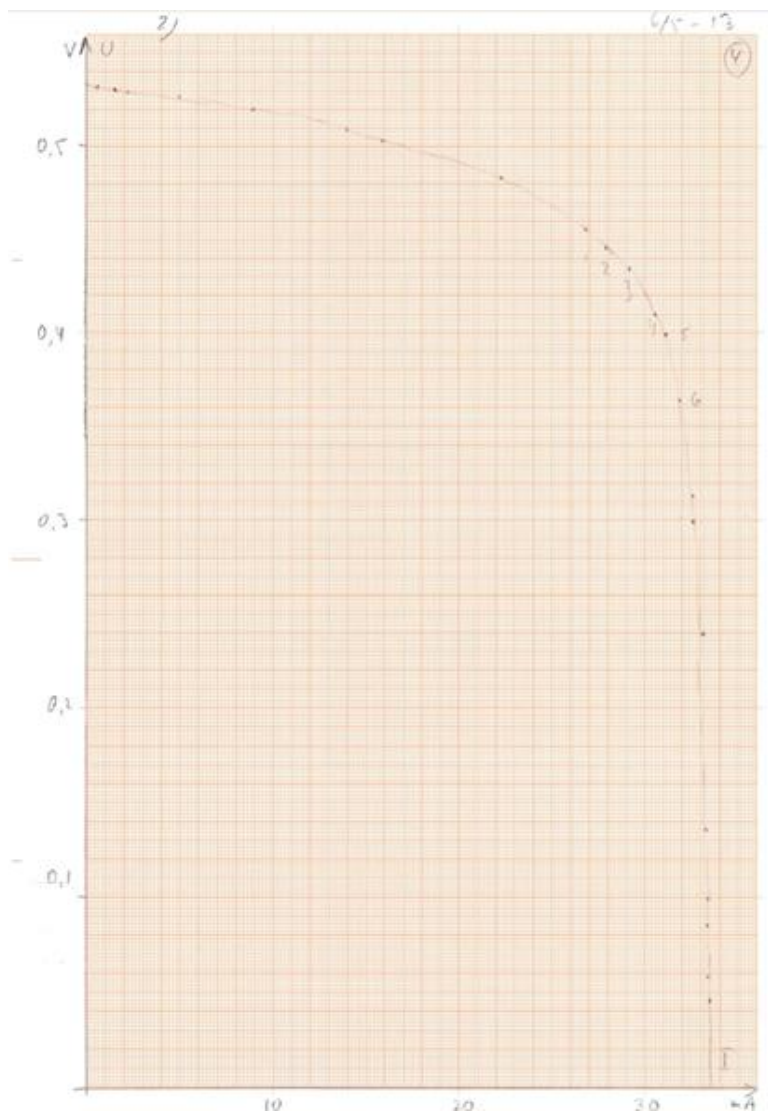
$$\rightarrow I_{a, \max} = \frac{(I_a a^2)_{\min}}{a^2_{\min}} = \frac{7867.6 \text{ mm}^2 \text{mA}}{1100 \text{ mm}^2} = 7.2 \text{ mA}$$



2.2 Characteristic of the solar cell

2.2a	Make a table of corresponding measurements of U and I .	0.6
2.2b	Graph voltage as a function of current	0.8

I mA	U V
0.496	0.532
1.451	0.531
5.05	0.526
8.88	0.52
14.05	0.509
31.1	0.395
25.3	0.471
21.6	0.488
30.6	0.41
31.9	0.364
32.6	0.299
32.6	0.313
33.1	0.239
33.4	0.085
33.3	0.138
33.4	0.096
33.4	0.058
33.5	0.046
33.5	0.045
1.05	0.529
27.8	0.454
15.9	0.503
22.3	0.483
26.8	0.458
29.2	0.435



2.3 Theoretical characteristic for the solar cell

2.3a	Use the graph from question 2.2b to determine $I_{\max}$.	0.4
2.3b	Estimate the range of values of U for which the mentioned approximation is good. Determine graphically the values of I_0 and η for your solar cell.	1.2

$$I = I_{\max} \text{ for } U = 0 \rightarrow I_{\max} = 33.5 \text{ mA}$$

$$\eta k_B T < 4 \cdot 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 300 \text{ K} = 0.103 \text{ eV}$$

$$I = I_{\max} - I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right) - 1 \right) \approx I_{\max} - I_0 \exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right)$$

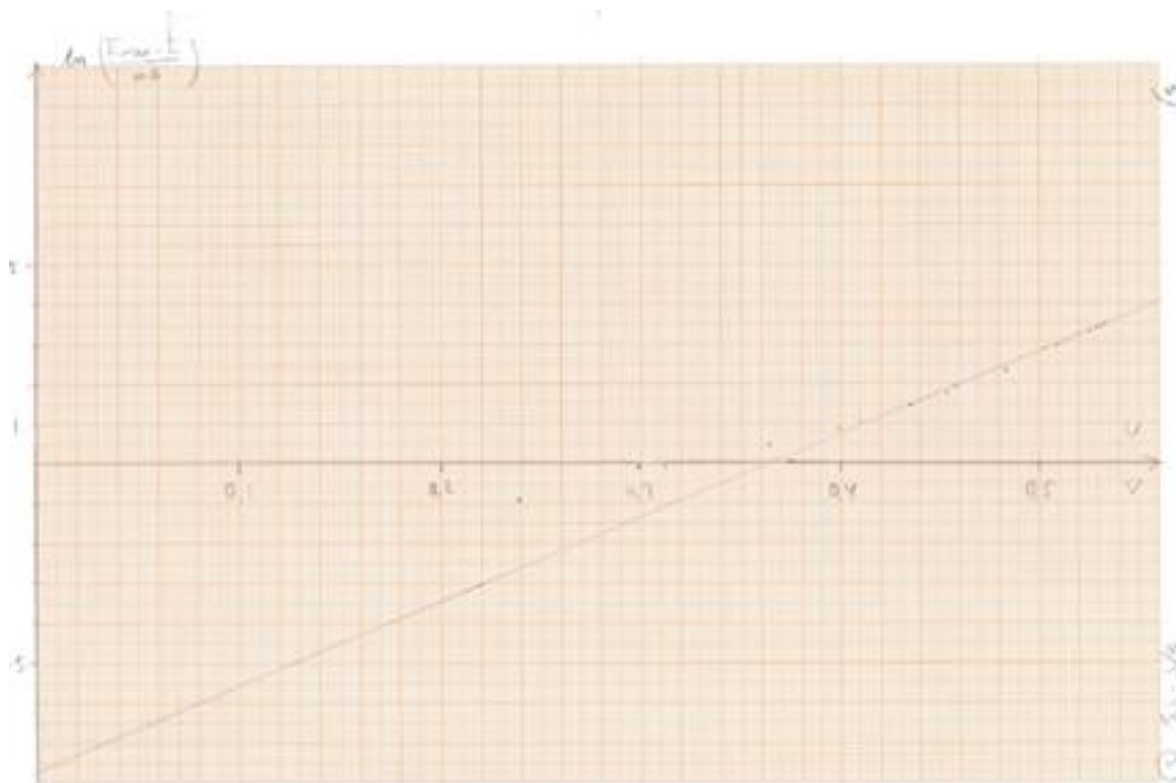
$$\text{for } U > 0.4 \text{ V where } \exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right) > \exp(4) \gg 1$$

$$\ln\left(\frac{I_{\max} - I}{\text{mA}}\right) = \frac{e}{\eta k_B T} U - \ln\left(\frac{I_0}{\text{mA}}\right)$$

$$\frac{e}{\eta k_B T} = \frac{4.03 - (-7.7)}{0.56 \text{ V}} = 20.95 \text{ V}^{-1}$$

$$I_0 = e^{-7.7} \text{ mA} = 0.45 \mu\text{A}$$

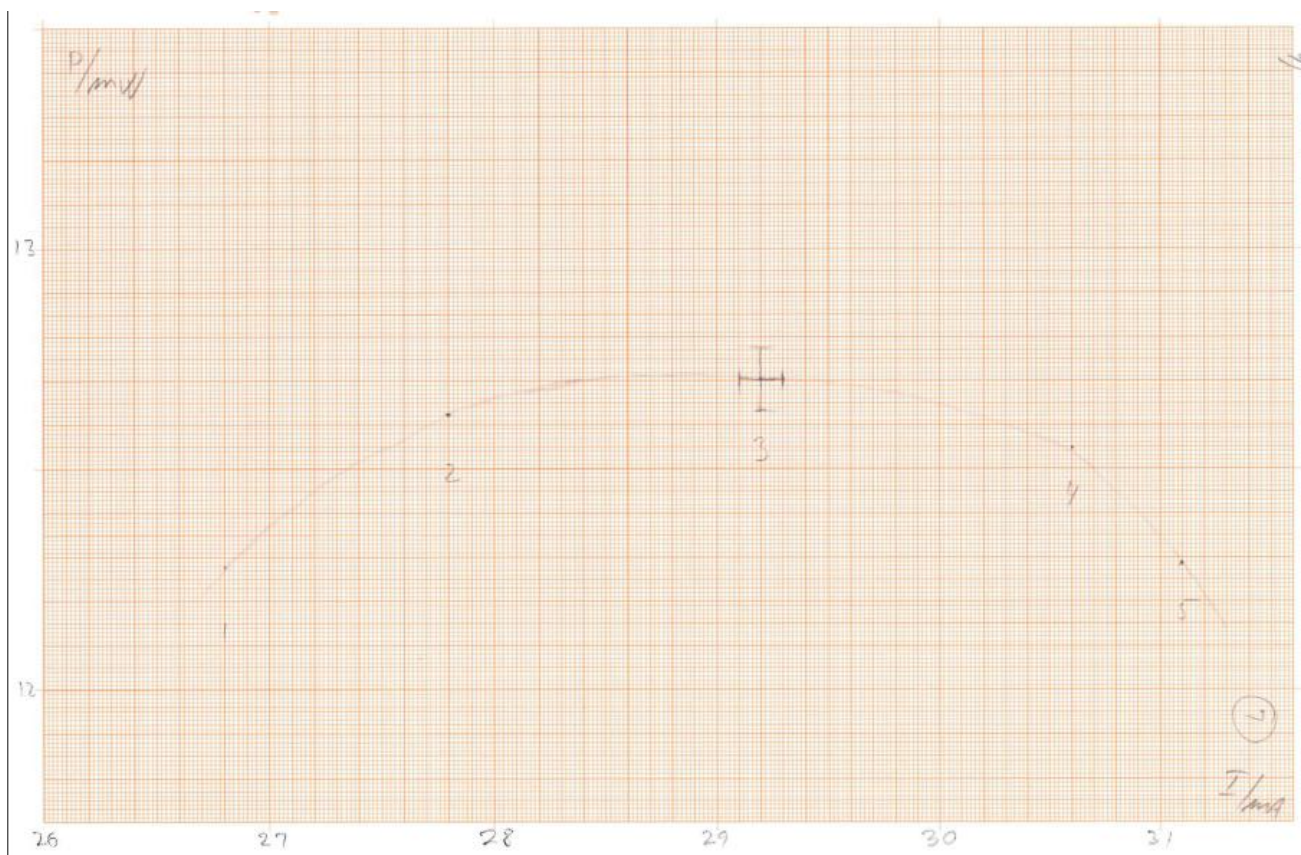
$$\rightarrow \eta = \frac{e/(k_B T)}{20.95 \text{ V}^{-1}} = 1.85$$



2.4 Maximum power for a solar cell

2.4a	The maximum power that the solar cell can deliver to the external circuit is denoted $P_{\max}$. Determine $P_{\max}$ for your solar cell through a few, suitable measurements. (You may use some of your previous measurements from question 2.2)	0.5
2.4b	Estimate the optimal load resistance R_{opt} , i.e. the total external resistance when the solar cell delivers its maximum power to R_{opt} . State your result with uncertainty and illustrate your method with suitable calculations.	0.5

I	U	P	
mA	V	mW	
26.8	0.458	12.2744	1
27.8	0.454	12.6212	2
29.2	0.435	12.7020	3
30.6	0.410	12.5460	4
31.1	0.395	12.2845	5



$$P_{\max} = (12.7 \pm 0.1) \text{ mW} @ (28.8 \pm 0.2) \text{ mA}$$

$$R_{\text{opt}} = \frac{P_{\max}}{I_{\text{opt}}^2} = \frac{12.71 \text{ mW}}{(28.8 \text{ mA})^2} = (15.3 \pm 0.3) \Omega$$

2.5 Comparing the solar cells

2.5a	Measure, for the given illumination: - The maximum potential difference U_A that can be measured over solar cell A. - The maximum current I_A that can be measured through solar cell A. Do the same for solar cell B.	0.5
2.5b	Draw electrical diagrams for your circuits showing the wiring of the solar cells and the meters.	0.3

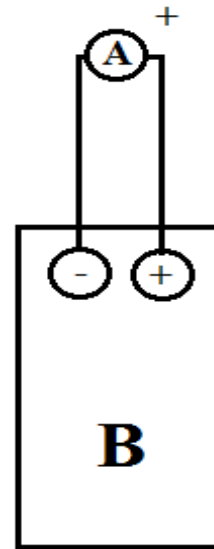
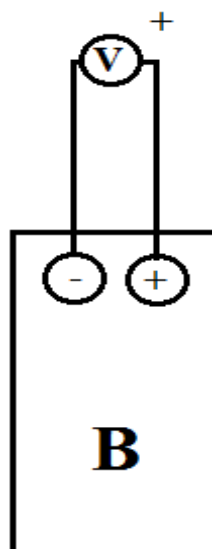
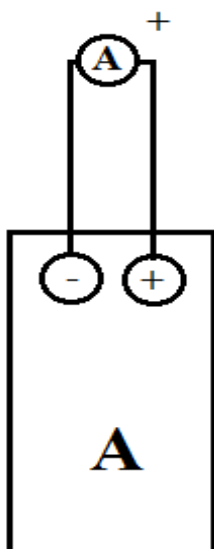
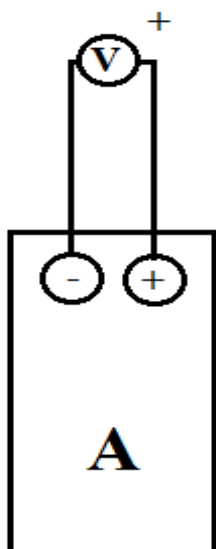
2.5a. $U_A = 0.512 \text{ V}$

$I_A = 16.465 \text{ mA}$

$U_B = 0.480 \text{ V}$

$I_B = 16.325 \text{ mA}$

2.5b.



2.6 Couplings of the solar cells

2.6a	Determine which of the four arrangements of the two solar cells yields the highest possible power in the external circuit when one of the solar cells is shielded with the shielding plate (J in Fig. 2.1). Draw the corresponding electrical diagram.	1.0
------	---	-----

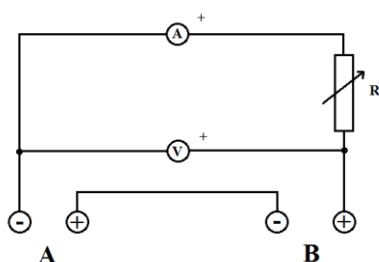
Two approaches:

Approach 1: use a constant setting of the variable resistor to simulate a constant external load.

Approach 2: use the hint given in the question and measure values of maximal U and maximal I independently (no variable resistor involved).

In the following only measurements for approach 1 are presented.

a.



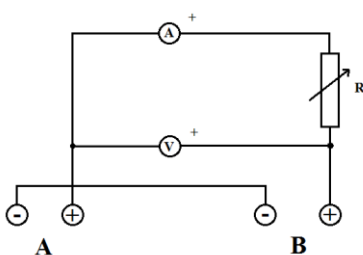
Unshielded (adjusting R for reasonable P)

13.10 mA; 0.794 V; 10.4 mW

A shielded: 0.37 mA; 0.022 V

B shielded: 0.83 mA; 0.049 V

b.

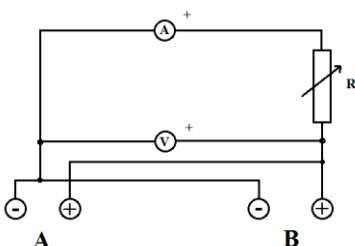


R like in a.

A shielded: 1.47 mA; 0.088 V

B shielded: -2.82 mA; -0.170 V

c.

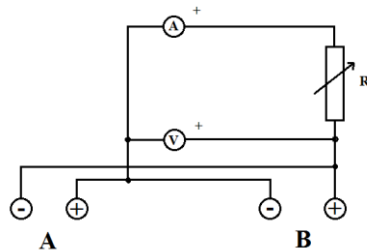


R like in a.

A shielded: 6.89 mA; 0.415 V

B shielded: 6.905 mA; 0.4165 V

d.



R like in a.

A shielded: 7.14 mA; 0.436 V

B shielded: -7.76 mA; -0.474 V

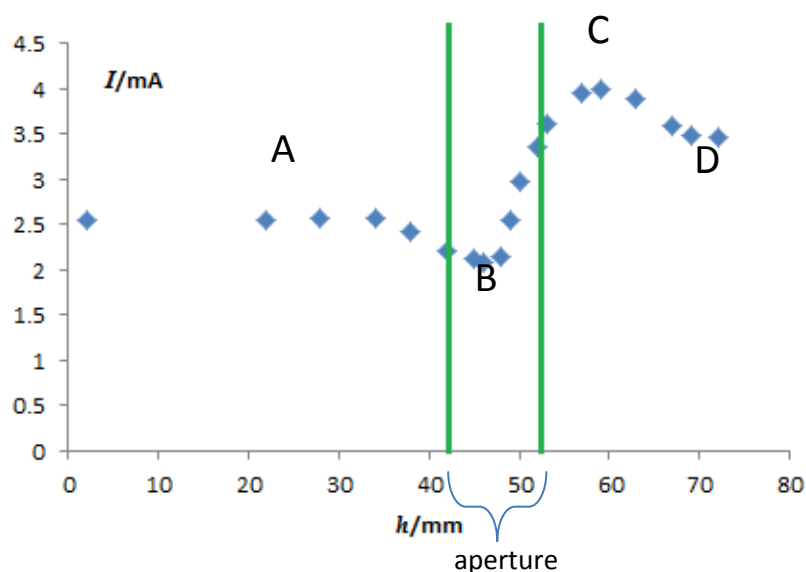
Conclusion: Best power: Set-up d with B shielded. (Solar cell A slightly better than B).

2.7 The effect of the optical vessel (large cuvette) on the solar cell current

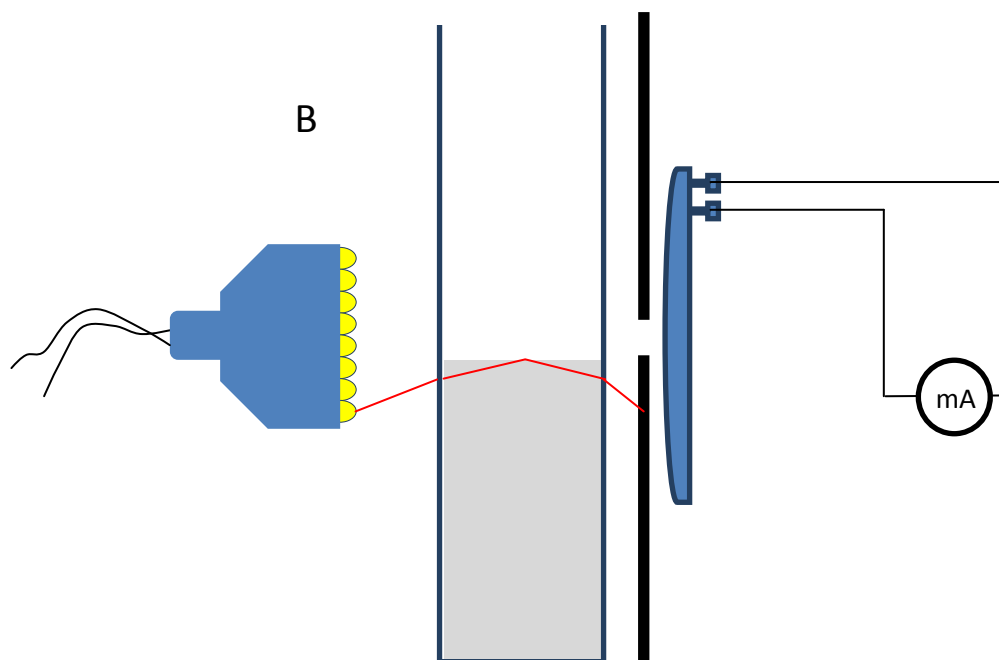
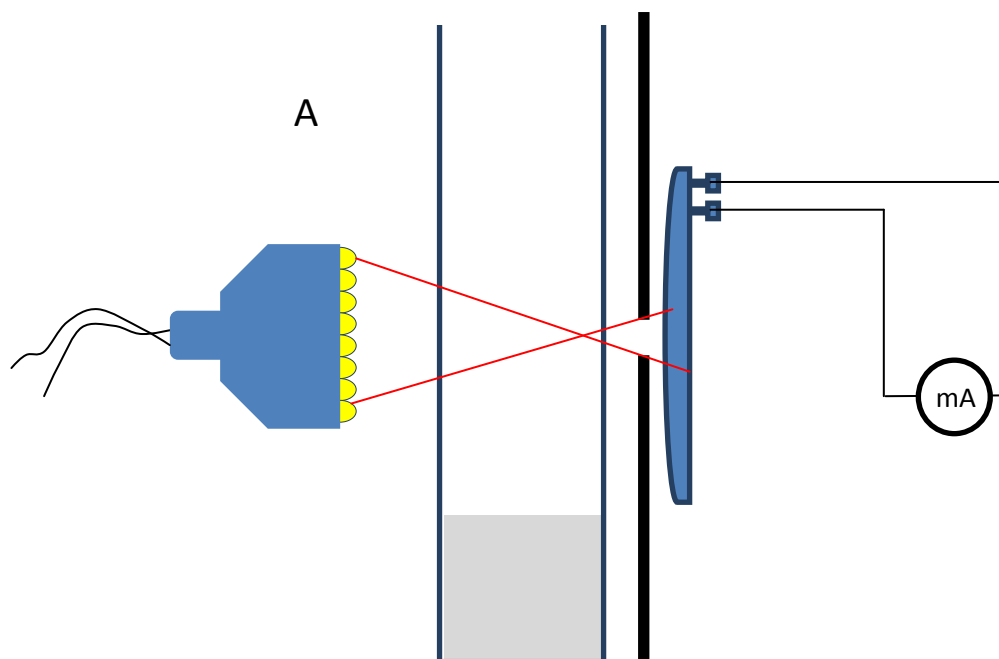
2.7a	Measure the current I , now as a function of the height, h , of water in the vessel, see Fig. 2.8. Make a table of the measurements and draw a graph.	1.0
2.7b	Explain with only sketches and symbols why the graph looks the way it does.	1.0
2.7c	For this set-up do the following: - Measure the distance r_1 between the light source and the solar cell, and the current I_1 . - Place the empty vessel immediately in front of the circular aperture and measure the current I_2 . - Fill up the vessel with water, almost to the top, and measure the current I_3 .	0.6
2.7d	Use your measurements from 2.7c to find a value for the refractive index n_w for water. Illustrate your method with suitable sketches and equations. You may include additional measurements.	1.6

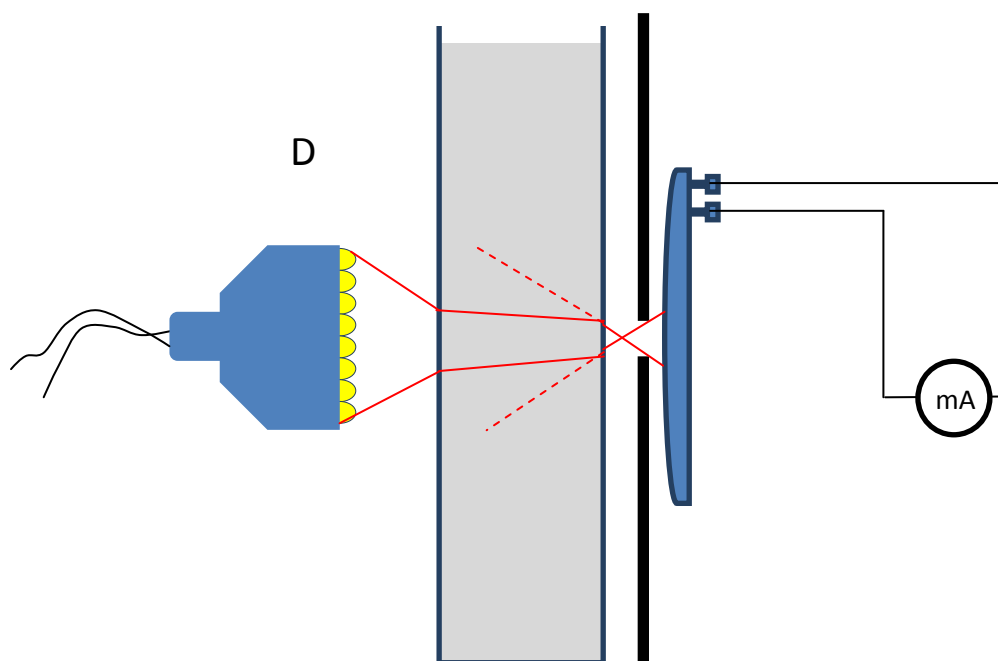
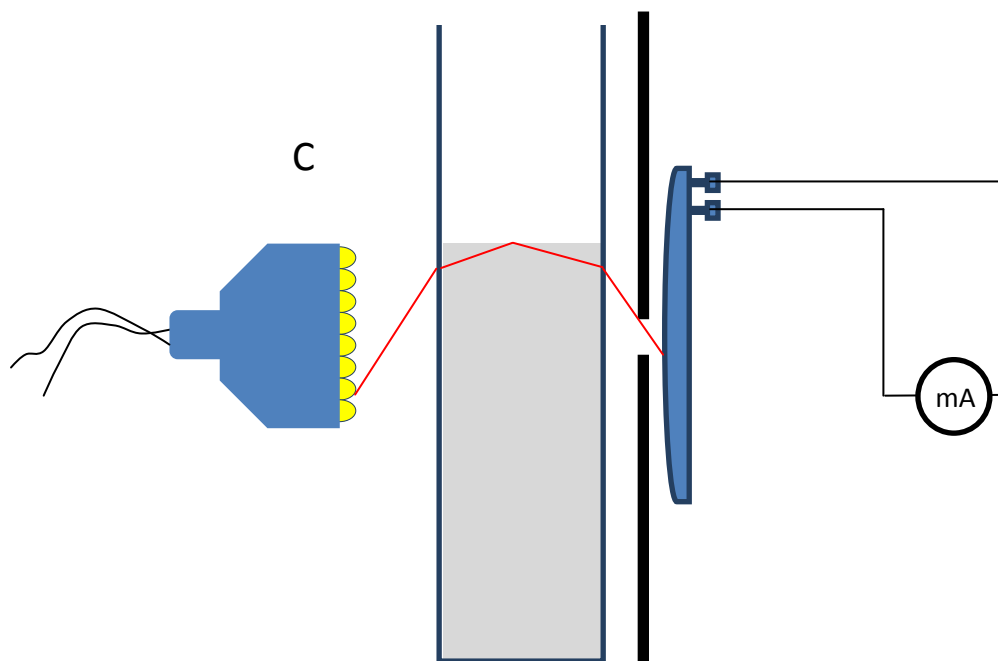
2.7a

h	I
mm	mA
2	2.54
22	2.55
28	2.56
34	2.57
38	2.42
42	2.21
45	2.13
46	2.08
48	2.15
49	2.54
50	2.97
52	3.36
53	3.61
57	3.96
59	3.99
63	3.89
67	3.6
69	3.49
72	3.47



2.7b **Exemplar** drawings for position A, B, C and D on previous graph:

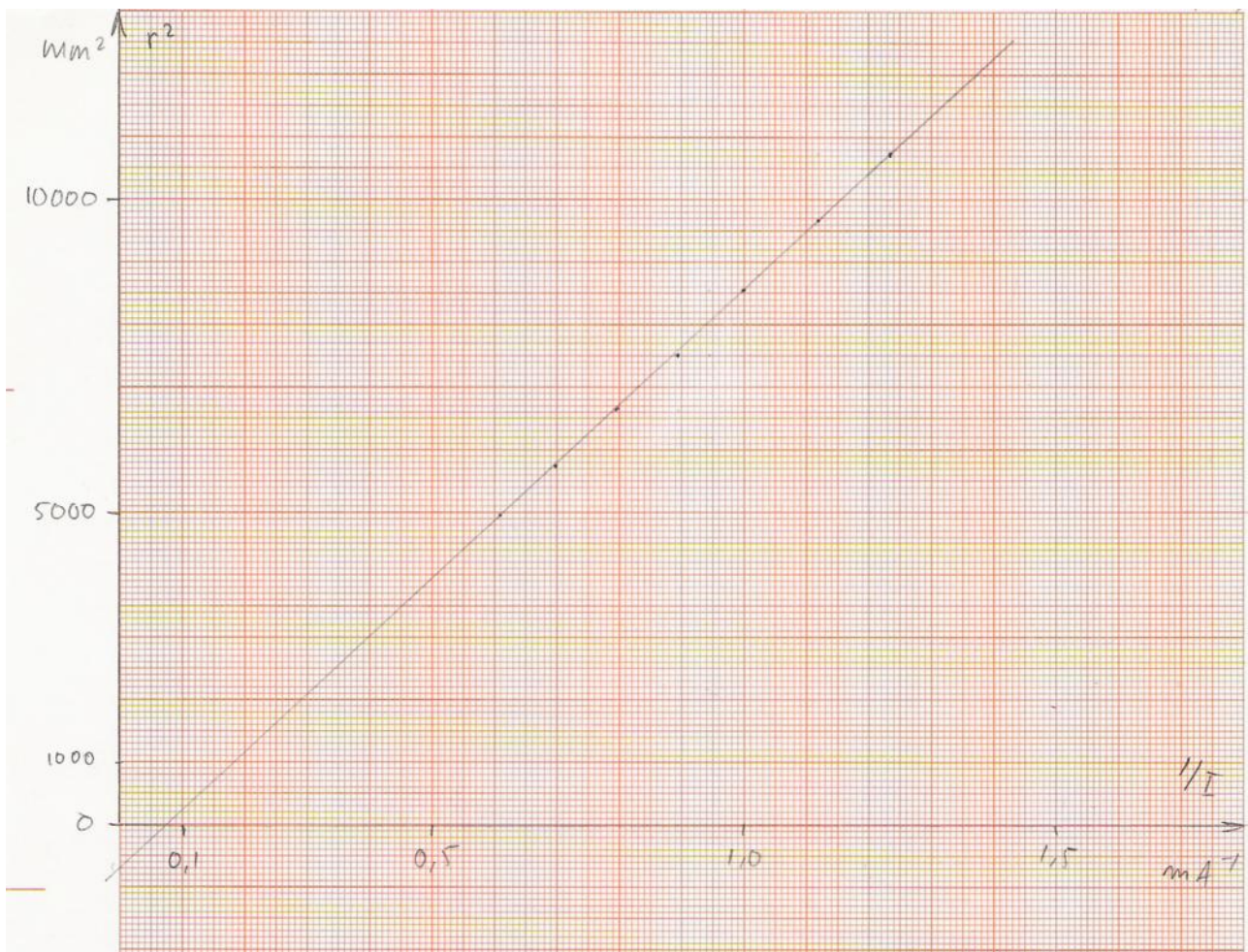




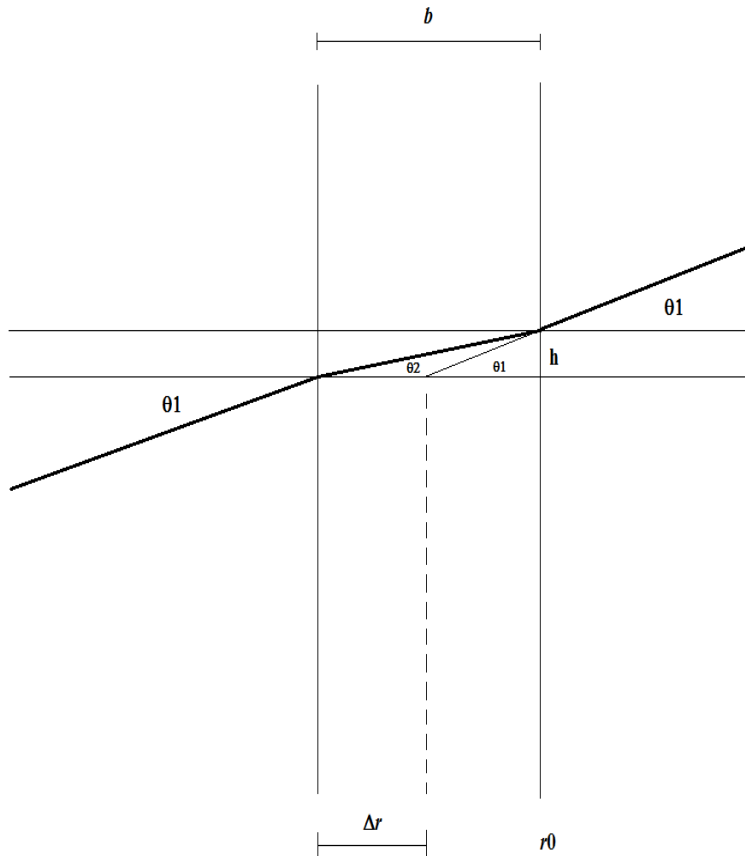
2.7c NOTE: The exemplar measurements are from a different lamp than in 2.1. For a solution to 2.7d using the distance graph you have to refer to the graph below.

$$r_1 = 103.5 \text{ mm}; I_1 = 0.81 \text{ mA}; I_2 = 0.705 \text{ mA}; I_3 = 0.85 \text{ mA}$$

$$\frac{1}{I_3} \cdot \frac{I_2}{I_1} = 1.024 \text{ mA}^{-1} \sim r_c^2 = 8800 \text{ mm}^2 \sim r_c = 93.8 \text{ mm}$$



2.7d



$$h = (b - \Delta r) \tan \theta_1 = b \tan \theta_2 \Rightarrow \frac{b}{b - \Delta r} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} \approx \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n, \text{ da } \theta_2 < \theta_1 \ll 1.$$

$$n_w \approx \frac{b}{b - \Delta r} = \frac{b}{b - (r_1 - r_c)} = \frac{26.0 \text{ mm}}{26.0 \text{ mm} - (103.5 - 93.8) \text{ mm}} = 1.6$$

NOTE: You may get better results. The uncertainty is rather large in this method because of the subtraction of two large numbers for Δr

A different method is to determine the shift by actually moving the set-up and perhaps making an interpolation in directly measured data.