

Замечание: Все измерения и вычисления должны быть представлены в единицах системы СИ с необходимым количеством значащих цифр. Погрешности нужно оценивать только, если это явно указано.

1.0 Введение

Эксперимент с лазерным дальномером (ЛД)



Рис. 1.1 Часть оборудования для эксперимента

- A: Лазерный дальномер
- B: Оптическое волокно (длиной примерно 1 м)
- C: Клейкие войлочные прокладки с отверстием
- D: Измерительная лента
- E: Скотч – клейкая лента
- F: Ножницы
- G: Крышка от черного ящика

Лазерный дальномер (ЛД, Рис. 1.2 и Рис. 1.3) состоит из источника (излучателя) и приемника. Источником является диодный лазер, излучение которого промодулировано с очень высокой частотой. Когда лазерный луч попадает на объект, он отражается во

всевозможных направлениях. Часть света возвращается обратно и попадает в приемник дальномера, расположенный рядом с источником. Телескопическая оптика дальномера автоматически фокусируется на точку, которую лазерный луч формирует на объекте, и регистрирует рассеянный свет. Электроника дальномера измеряет время, которое требуется свету для преодоления расстояния от источника до приемника.

Измеренное время потом преобразуется в значение y по формуле

$$y = \frac{1}{2}ct + k$$

Это значение y показывается на экране дальномера. Здесь $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ м с}^{-1}$ - скорость света. Постоянная k зависит от настроек дальномера, которые позволяют измерять расстояние либо от верхней (см. Рис. 1.2) либо от нижней стороны (края) дальномера. Когда лазерный дальномер включают, по умолчанию действует настройка, при которой расстояние измеряется от нижней стороны дальномера. **Эта настройка должна сохраняться в процессе всех измерений!!!**

Из-за параллакса, дальномер не может измерять расстояния менее 5 см. Максимально возможное расстояние для измерений примерно 25 м.

Мощность диодного лазера < 1 мВт, а длина волны 635 нм. Погрешность, определения расстояния дальномером, заявленная производителем, составляет 2 мм.

Внимание: Диодный лазер дальномера может повредить ваши глаза. Не смотрите на лазерный луч и не направляйте его в глаза другим участникам олимпиады!

Настройки дальномера

Приведенный выше расчет расстояния y , естественно, делается в предположении, что свет распространяется со скоростью c . С учетом точности измерений нет никакой необходимости различать скорость распространения света в вакууме и в воздухе.

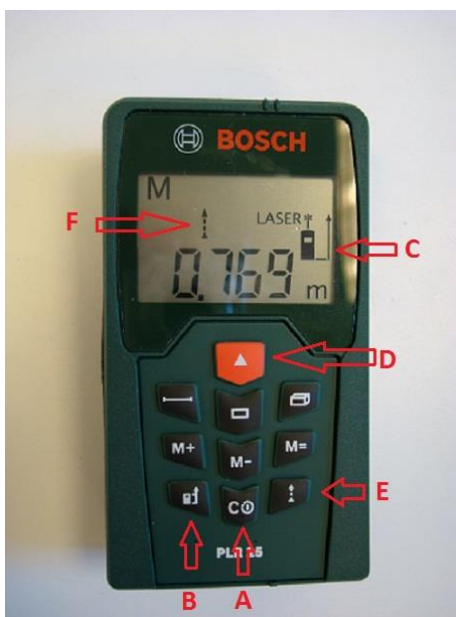


Рис. 1.2 Не отмеченные кнопки не нужны вам для выполнения эксперимента. Функции отмеченных кнопок:

- A:** Вкл/выкл
- B:** Переключение между режимами измерения от верхней или от нижней стороны дальномера.
- C:** Индикатор режима измерения от верхней/нижней стороны дальномера
- D:** Включение лазера/выполнение измерений
- E:** Режим непрерывного измерения
- F:** Индикатор непрерывного измерения



Рис. 1.3 Дальномер, вид с верхней стороны:

- A:** Источник с линзой
- B:** Приемник. **Не смотрите в лазерный луч!**

1.1 Измерения дальномером

Для выполнения измерения нужно нажать кнопку **D**, Рис. 1.2.

1.1a	Используйте дальномер для измерения расстояния H от верхней поверхности стола до пола. Запишите погрешность измерений ΔH . Покажите с помощью рисунка, как вы делали измерения.	0.4
------	---	-----

1.2 Эксперимент с оптическим волокном



Рис. 1.4 Схема оптического волокна.

Вам выдали оптическое волокно длиной примерно 1 м и диаметром примерно 2 мм. Волокно состоит из двух оптических материалов. Сердцевина (диаметр примерно 1 мм) делается из пластика с большим показателем преломления. Она окружена промежуточным слоем из пластика с немного меньшим показателем преломления, и все это покрыто защитным слоем из черного пластика. Сердцевина и промежуточный слой образуют волновод. На границе между сердцевиной и промежуточным слоем свет испытывает полное отражение (и не может покинуть сердцевину) до тех пор пока угол падения больше чем критический угол полного отражения. Таким образом, свет будет распространяться в сердцевине волокна, даже если волокно сгибать, конечно до тех пор, пока его не согнут слишком сильно.

Теперь вы должны перевести дальномер в режим непрерывного измерения (кнопка **E**, Рис. 1.2). В этом режиме показания прибора у будут обновляться примерно раз в секунду. Дальномер автоматически перейдет в спящий режим через несколько минут. Его можно вернуть из спящего режима нажатием красной кнопки «Пуск».

Осторожно накройте линзу приемника дальномера одной небольшой черной войлочной прокладкой (другая прокладка – запасная), приложив ее клейкой стороной к линзе, и несильно прижмите её до приклеивания. Вставьте конец оптического волокна в отверстие приклеенной прокладки, так чтобы конец волокна коснулся линзы (рис. 1.5). Обозначьте длину волокна через x .



Рис. 1.5 (а) Войлочная прокладка и оптоволокно. **(б)** Присоединение оптического волокна.

Другой конец оптического волокна следует удерживать рукой напротив источника так, чтобы он касался стекла в середине лазерного луча. Снимите показание y с экрана прибора. Предоставленные ножницы следует использовать для резания волокна.

Внимание: тщательно подумайте перед тем, как разрезать оптическое волокно, так как дополнительное оптическое волокно не предоставляется.

1.2a	Измерьте соответствующие значения x и y . Запишите данные ваших измерений в таблицу. Постройте график зависимости y от x .	1.8
1.2b	Воспользуйтесь графиком, чтобы найти показатель преломления n_{co} материала сердцевины волокна. Вычислите скорость света v в сердцевине оптического волокна.	1.2

1.3 Дальномер под углом к вертикали

В этой части задания вам потребуется оборудование, показанное на Рис. 1.6.

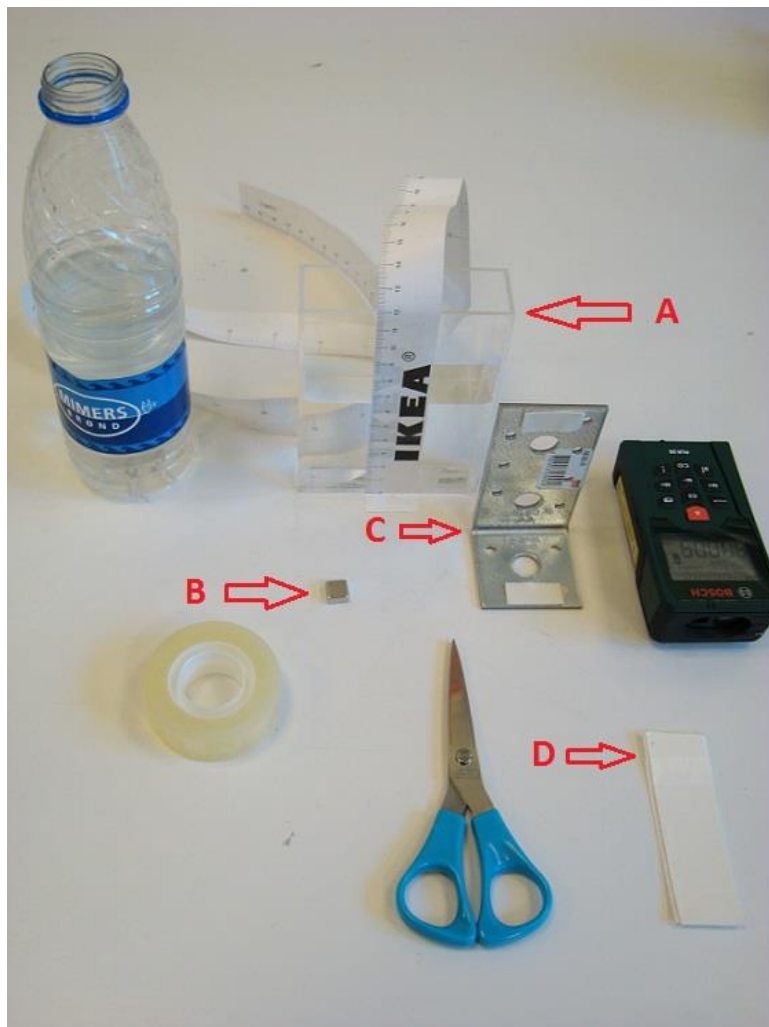


Рис. 1.6 Оборудование, показанное на рисунке:

A: Оптический сосуд с водой и измерительной лентой

B: Магнит (Он будет находится на железном уголке!) для закрепления железного уголка на верхней стороне черного ящика.

C: Железный уголок с прямоугольными самоклеящимися прокладками

D: Самоклеющиеся прокладки

Снимите черную войлочную прокладку с линзы. Дальномер теперь следует разместить следующим образом:

Поместите две прямоугольные самоклеющиеся прокладки на железный уголок (смотри метки **A** на Рис. 1.7).

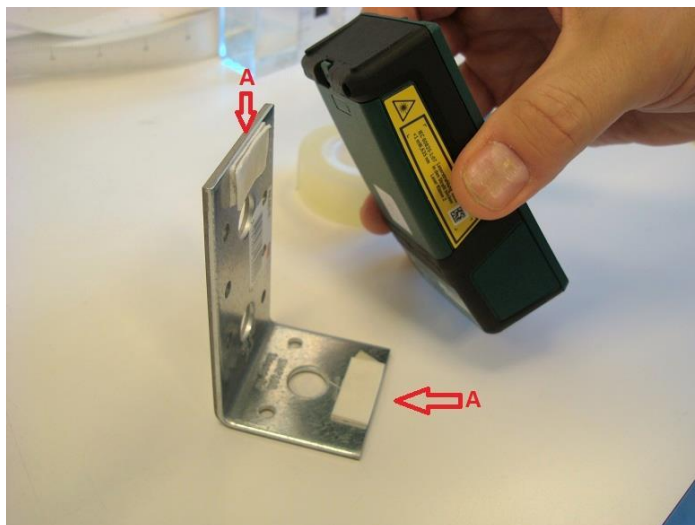


Рис. 1.7 Показано, как размещать две самоклеящиеся прокладки из пеноматериала на железном уголке.

Дальномер следует приклеить к железному уголку (Рис. 1.8).

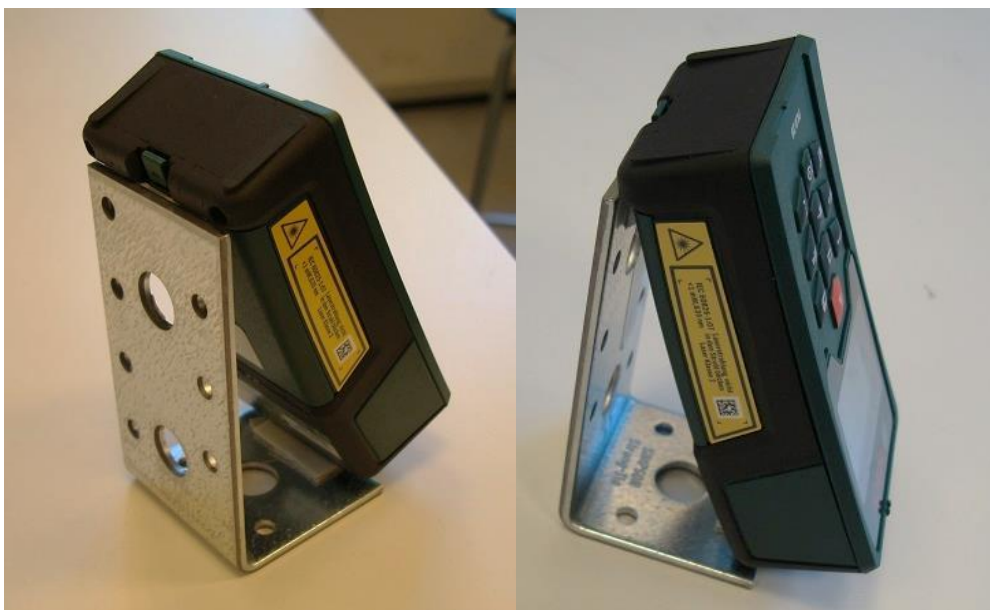


Рис. 1.8 Показано, как разместить лазерный дальномер на железном уголке.

Железный уголок с дальномером закрепите на черной коробке с помощью магнита, помещенного внутри коробки под металлическим уголком, как показано на Рис. 1.9. (Небольшой магнит изначально находится на железном уголке). Важно закрепить дальномер по отношению к коробке в точности так, как показано на рис. 1.9. Верхняя сторона коробки, на которую установлен дальномер, будет наклонена примерно на 4 градуса. Лазерный луч должен быть направлен под углом вниз безо всяких препятствий.

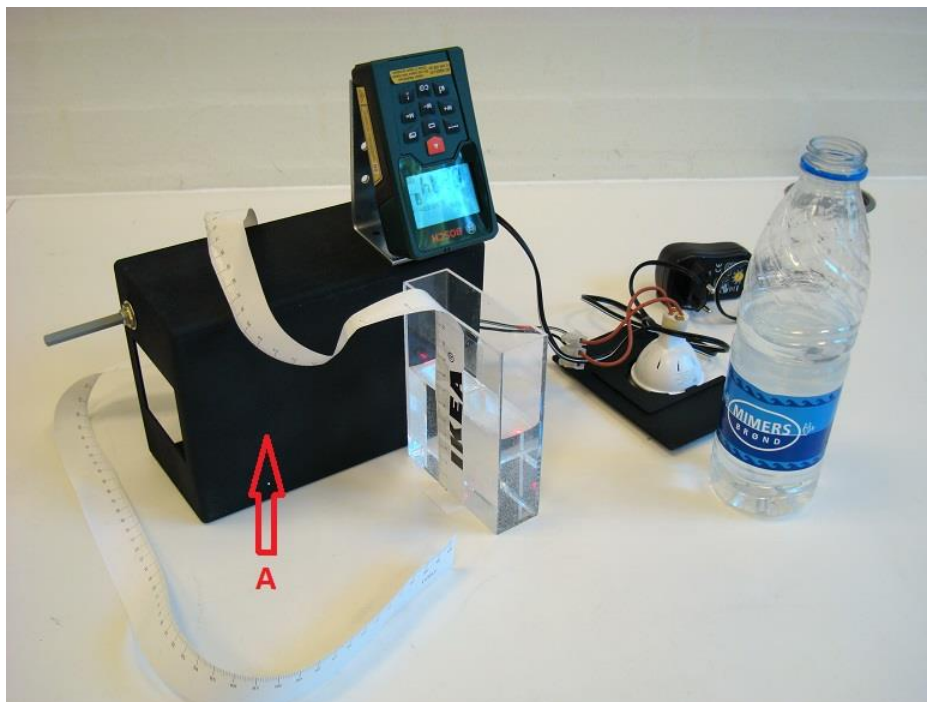


Рис. 1.9 Установка для эксперимента. (Черная коробка используйте только как подставку. Оборудование, изображенное за бутылкой, не используется в этой задаче)

A: Важно: Дно черной коробки, лежащей на борту, направьте к себе, как показано на рисунке. Сторона коробки, обращенная вверх, отклонена примерно на 4 градуса от горизонтали. Угол θ_1 (рис. 1.10) должен оставаться одинаковым во всех измерениях.

Когда дальномер включен и установлен, как описано выше, лазерный луч составляет угол θ_1 с вертикалью. Этот угол должен оставаться одинаковым во всех измерениях. Определите этот угол. Оптический сосуд в этом эксперименте вам не понадобится, поэтому временно уберите его.

1.3a	Измерьте дальномером расстояние y_1 до точки, в которой лазерный луч попадает на поверхность стола. Затем сдвиньте коробку вместе с дальномером горизонтально до тех пор, пока лазерный луч не попадет на пол. Измерьте дальномером расстояние y_2 до точки попадания лазерного луча на пол. Приведите погрешности измерений.	0.2
1.3b	Вычислите угол θ_1 используя только измерения y_1 , y_2 и H (значение H возьмите из пункта 1.1a). Определите погрешность $\Delta\theta_1$.	0.4

1.4 Эксперимент с оптическим сосудом

Разместите оптический сосуд таким образом, чтобы лазерный луч попадал на его дно примерно посередине (Рис. 1.10). Налейте немного воды в сосуд. Глубина воды x . Снимите показание y с экрана дальномера.

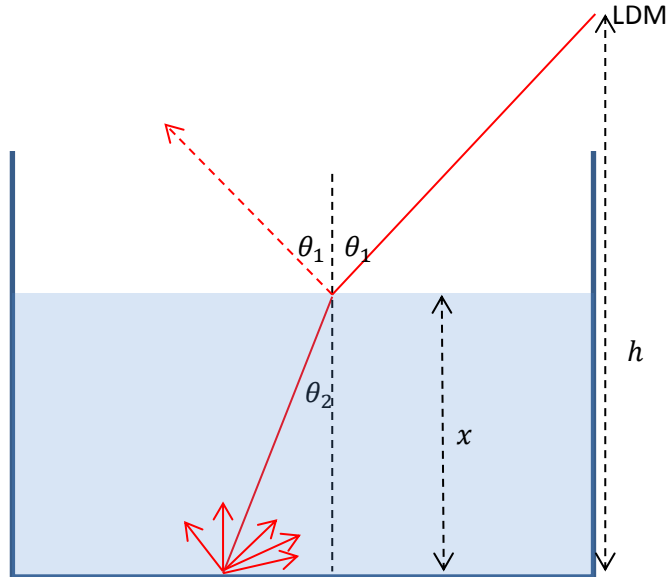


Рис. 1.10 Схема лазерных лучей в оптическом сосуде (уровень воды x).

1.4a	Измерьте соответствующие значения x и y и занесите их в таблицу измерений. Постройте график зависимости y от x .	1.6
1.4b	Покажите аналитически, как этот график должен выглядеть теоретически.	1.2
1.4c	Воспользуйтесь графиком, чтобы определить показатель преломления воды n_w .	1.2

2.0 Введение

Оборудование для этой экспериментальной задачи показано на рис. 2.1.

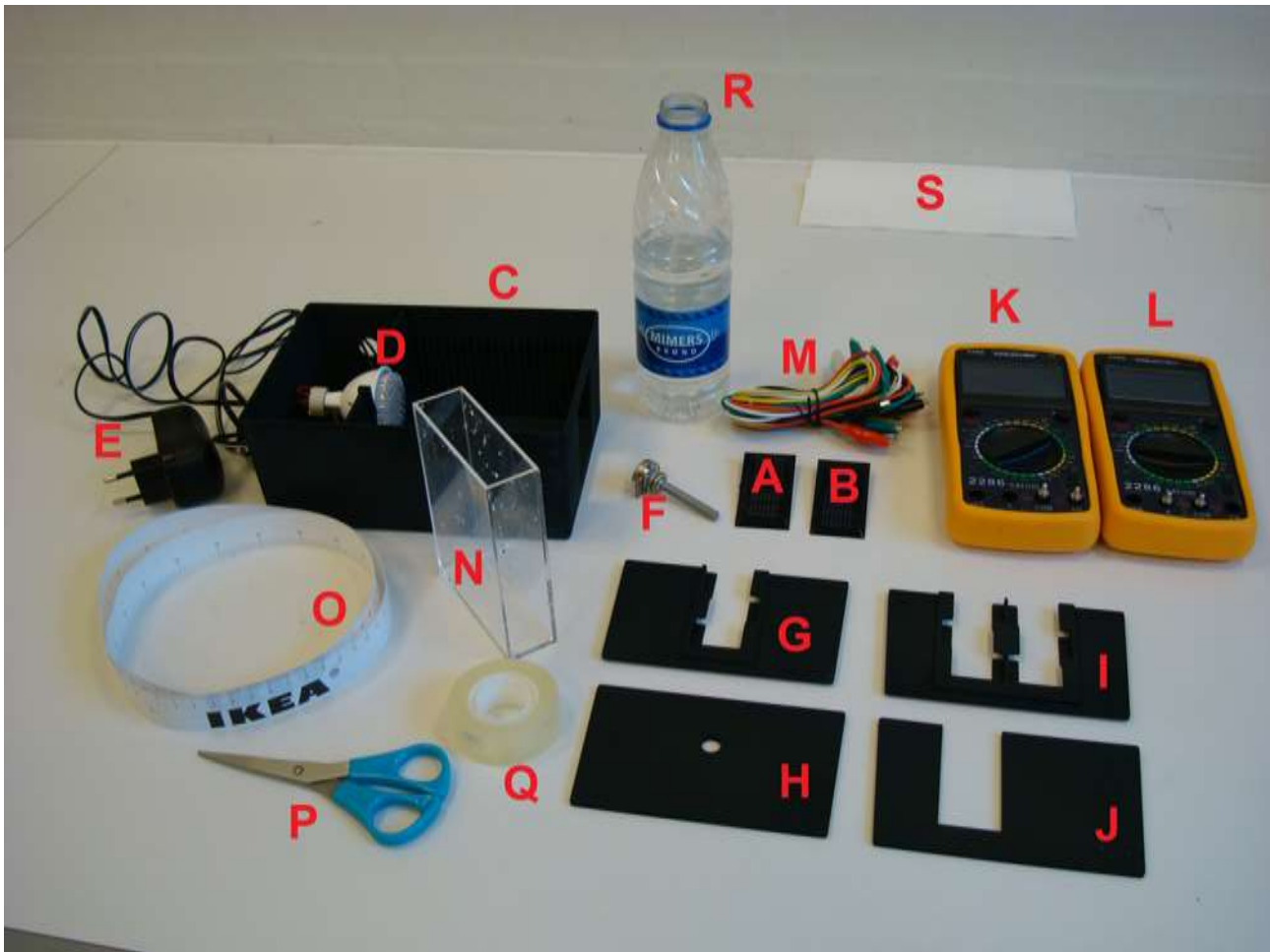


Рис. 2.1 Оборудование для эксперимента E2.

Список оборудования (рис. 2.1):

A: Солнечный элемент

B: Солнечный элемент

C: Ящик с пазами для крепления источника света, солнечных элементов, и т.д.

D: Светодиодный источник света в держателе

E: Блок питания источника света D

F: Переменный резистор

G: Держатель одного солнечного элемента в ящике C

H: Круговая диафрагма для использования в ящике C

I: Держатель двух солнечных элементов в ящике C

J: Заслонка для использования в ящике C

K: Цифровой мультиметр

- L: Цифровой мультиметр
- M: Провода с зажимами
- N: Оптический сосуд (большая кювета)
- O: Измерительная лента
- P: Ножницы
- Q: Скотч
- R: Вода для наполнения сосуда N
- S: Бумажная салфетка для промокания воды
- T: Пластиковая кружка для воды из оптического сосуда N (не показана на рис. 2.1)
- U: Пластиковая пипетка (не показана на рис. 2.1)
- V: Крышка для ящика C (не показана на рис. 2.1)

Табличные данные

Скорость света в вакууме	$c = 2.998 \times 10^8 \text{ м с}^{-1}$
Элементарный заряд	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Больцмана	$k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ Дж К}^{-1}$

Солнечный элемент преобразует часть электромагнитной энергии падающего света в электрическую энергию, путем разделения зарядов. Так генерируется электрический ток. В эксперименте E2 исследуются солнечные элементы с помощью предоставленного оборудования. Оборудование состоит из коробки с держателями для источника света и солнечных элементов вместе с различными пластинами и крышкой. Переменный резистор следует закрепить в коробке, рис. 2.2. Один из трех выводов резистора удален, так как для работы достаточно оставшихся двух. В комплекте имеются провода с зажимами и два солнечных элемента (маркированные порядковым номером и буквами A или B) с выводами сзади. Два солнечных элемента аналогичны, но могут слегка различаться. На рис. 2.3 изображены два мультиметра с указанием выводов, которые разрешено использовать. В эксперименте будет использоваться оптический сосуд и питьевая вода из бутылки.



Рис. 2.2 (а) Коробка с источником света и резистором для крепежа. (б) Переменный резистор, закрепленный в коробке. Заметьте, что небольшой штифт на резисторе подходит под отверстие справа от рукоятки.



Рис. 2.3 Мультиметры с указанием выводов, которые разрешено использовать. Левый мультиметр используется как амперметр, правый – как вольтметр. Прибор включается нажатием кнопки “POWER” в левом верхнем углу. Прибор выключается автоматически после некоторого времени простоя. Он может измерять как постоянный ток и напряжение (=), так и переменный ток и напряжение (~). Внутреннее сопротивление вольтметра – 10 МОм вне зависимости от диапазона, в котором вы работаете. Разность потенциалов на амперметре – 200 мВ при максимальном значении тока в диапазоне вне зависимости от диапазона, в котором вы работаете. В случае «зашкаливания» дисплей покажет “1”, и тогда нужно выбрать диапазон измерения бóльших значений. Кнопка “HOLD” (в правом верхнем углу) позволяет зафиксировать показание, если вам это потребуется.

ВНИМАНИЕ: *Запрещается использовать мультиметр в качестве омметра для измерения сопротивления солнечных элементов, так как это может повредить их. Меняя предел измерений мультиметра, поворачивайте рукоятку осторожно. Она может сломаться. Проверяйте, видно ли число после десятичной запятой при измерениях – если переключатель не полностью зафиксирован, мультиметр не будет измерять, даже если на экране присутствуют цифры.*

Примечание: Не меняйте напряжение на блоке питания. Оно должно быть 12 В в течение всего эксперимента. (Блок питания для источника света должен включаться в розетку (230 V ~) на вашем столе.)

Примечание: Погрешности оцениваются только, если это явно указано в задании.

Примечание: Все измеренные и вычисленные величины приводятся в единицах системы СИ.

Примечание: При всех измерениях тока и напряжения на солнечном элементе в этом эксперименте светодиодный источник света предполагается включенным.

2.1 Зависимость тока солнечного элемента от расстояния до источника света

В этом задании измерьте силу тока I , генерируемого солнечным элементом, включенным в цепь вместе с амперметром. Также определите как сила тока зависит от расстояния r до источника света. Свет излучается *внутри* самих светодиодов, и r , следовательно, надо измерять так, как показано на рис. 2.4.

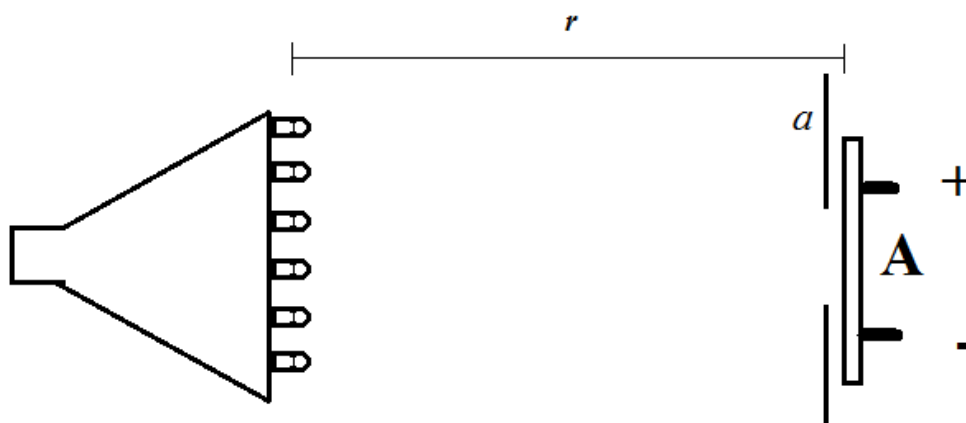


Рис. 2.4 Вид сверху на установку в задании 2.1. Круговая диафрагма a перед солнечным элементом. Расстояние измеряется от точки внутри светодиодов до поверхности солнечного элемента.

Не изменяйте пределы измерения амперметра в этом эксперименте: внутреннее сопротивление амперметра зависит от предела измерений, и таким образом, будет влиять на ток, текущий от солнечного элемента.

Укажите серийный номер источника света и солнечного элемента А на листе ответов. Закрепите источник света в U-образном держателе (будьте аккуратны, источник туго входит в держатель). Закрепите солнечный элемент А в держателе для одного солнечного элемента. Непосредственно перед солнечным элементом поместите круговую диафрагму.

Когда расстояние до источника света r не очень мало, сила тока I может быть аппроксимирована формулой

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

где I_a и a некоторые константы.

2.1a	Измерьте I как функцию r и поместите данные измерений в таблицу.	1.0
2.1b	Определите значения I_a и a подходящим графическим методом.	1.0

2.2 Вольт-амперная характеристика (ВАХ) солнечного элемента

Закрепите переменный резистор в коробке как показано на рис. 2.2. Поместите источник света в паз №0, самый дальний от резистора. Закрепите солнечный элемент А в держателе одного солнечного элемента *без круговой диафрагмы* в паз №10. Соберите цепь, как показано на рис. 2.5, для измерения ВАХ солнечного элемента, т.е. напряжение на выходе солнечного элемента U как функцию силы тока I в цепи, состоящей из солнечного элемента, резистора и амперметра.

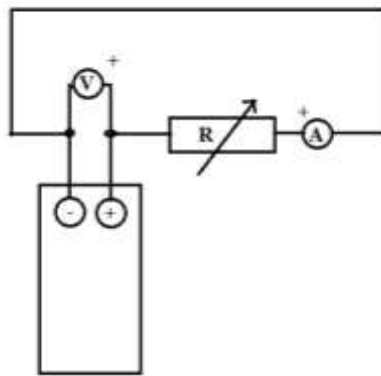


Рис. 2.5 Электрическая схема для измерения ВАХ в задании 2.2.

2.2a	Составьте таблицу соответствующих измерений U и I .	0.6
2.2b	Постройте график зависимости напряжения от силы тока.	0.8

2.3 Теоретическая ВАХ солнечного элемента

ВАХ солнечных элементов задается уравнением

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

где параметры I_{\max} , I_0 и η постоянны при фиксированном освещении. Температура $T = 300$ К. Фундаментальные постоянные e и k_B – элементарный заряд и постоянная Больцмана, соответственно.

2.3a	Определите I_{\max} , используя ВАХ из задания 2.2b.	0.4
------	--	-----

Параметр η лежит в интервале от 1 до 4. Для некоторых значений разности потенциалов U , эту уравнение можно аппроксимировать так

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

2.3b	Оцените область значений U , для которых указанное приближение выполняется. Определите графически значения I_0 и η для вашего солнечного элемента.	1.2
------	---	-----

2.4 Максимальная мощность солнечного элемента

2.4a	Обозначим максимальную мощность, которую солнечный элемент может отдать во внешнюю цепь P_{\max} . Проведите несколько измерений, по которым определите P_{\max} для вашего солнечного элемента. (Вы можете использовать свои предыдущие измерения из задания 2.2.)	0.5
2.4b	Оцените оптимальное сопротивление нагрузки R_{opt} , т.е. полное внешнее сопротивление, при котором солнечный элемент рассеивает наибольшую мощность на R_{opt} . Опишите свой метод, приводя соответствующие вычисления. Оцените погрешность R_{opt} .	0.5

2.5 Сравнение солнечных элементов

Закрепите оба солнечных элемента (А и В) в держателе двух элементов в пазу №15, рис. 2.6.

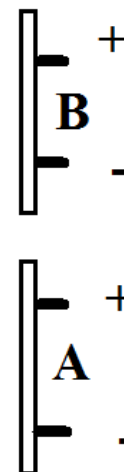
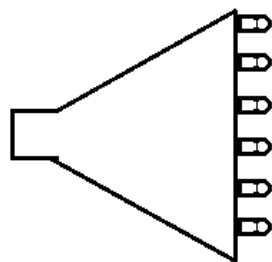


Рис. 2.6 Вид сверху на источник света и солнечные элементы в задании 2.5.

2.5a	<p>Для заданного освещения измерьте:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Наибольшую разность потенциалов U_A, которую можно измерить на солнечном элементе А. - Наибольшую силу тока I_A, который может течь через солнечный элемент А. <p>Сделайте то же самое для элемента В.</p>	0.5
2.5b	<p>Нарисуйте электрические схемы для ваших цепей (показывающие подключение солнечных элементов и измерительных приборов).</p>	0.3

2.6 Соединение солнечных элементов

Как показано на рис. 2.7, два солнечных элемента могут быть соединены последовательно двумя различными способами. Существует также два различных способа соединить их параллельно (не показано на рисунке).

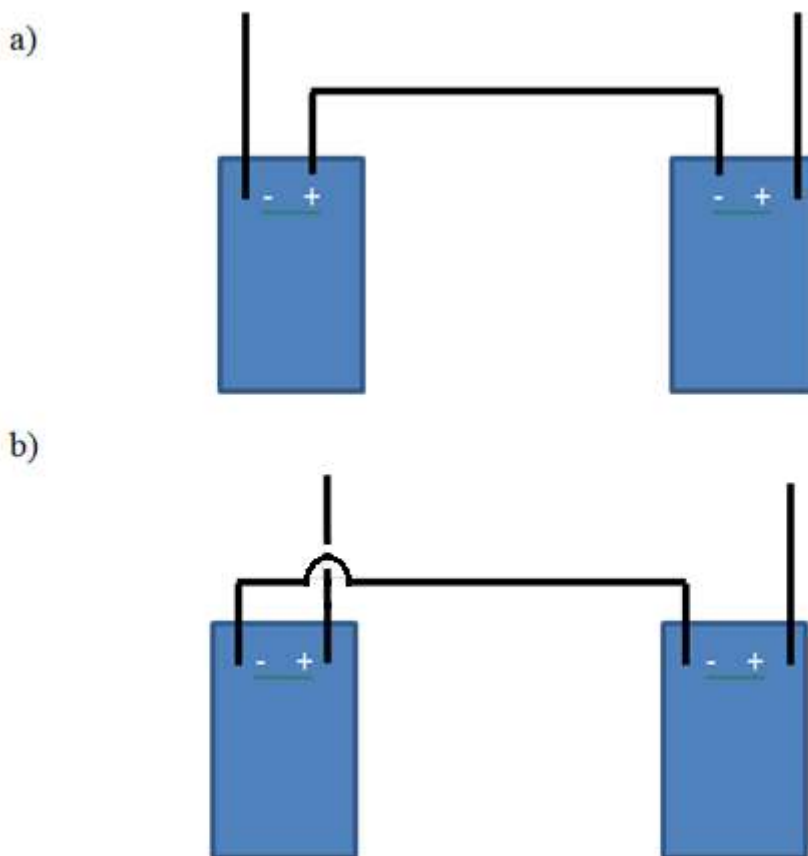


Рис. 2.7 Два способа последовательного соединения солнечных элементов для задания 2.6. Два способа их параллельного соединения не показаны.

2.6	<p>Определите, какой из четырех способов соединения двух солнечных элементов позволяет отдать во внешнюю цепь наибольшую мощность, когда один из элементов закрыт заслонкой (J на рис. 2.1). Подсказка: вы можете оценить максимальную мощность из максимального напряжения и максимального тока, измеренных для каждой конфигурации. Нарисуйте соответствующие электрические схемы.</p>	1.0
-----	--	-----

2.7 Влияние оптической кюветы на ток солнечного элемента

Закрепите источник света в коробке. Поместите солнечный элемент А в держатель одного элемента. Расположите солнечный элемент на расстоянии около 50 мм от источника света. Установите круговую диафрагму непосредственно перед элементом. Разместите пустой оптический сосуд непосредственно перед круговой диафрагмой, как показано на рис. 2.8.

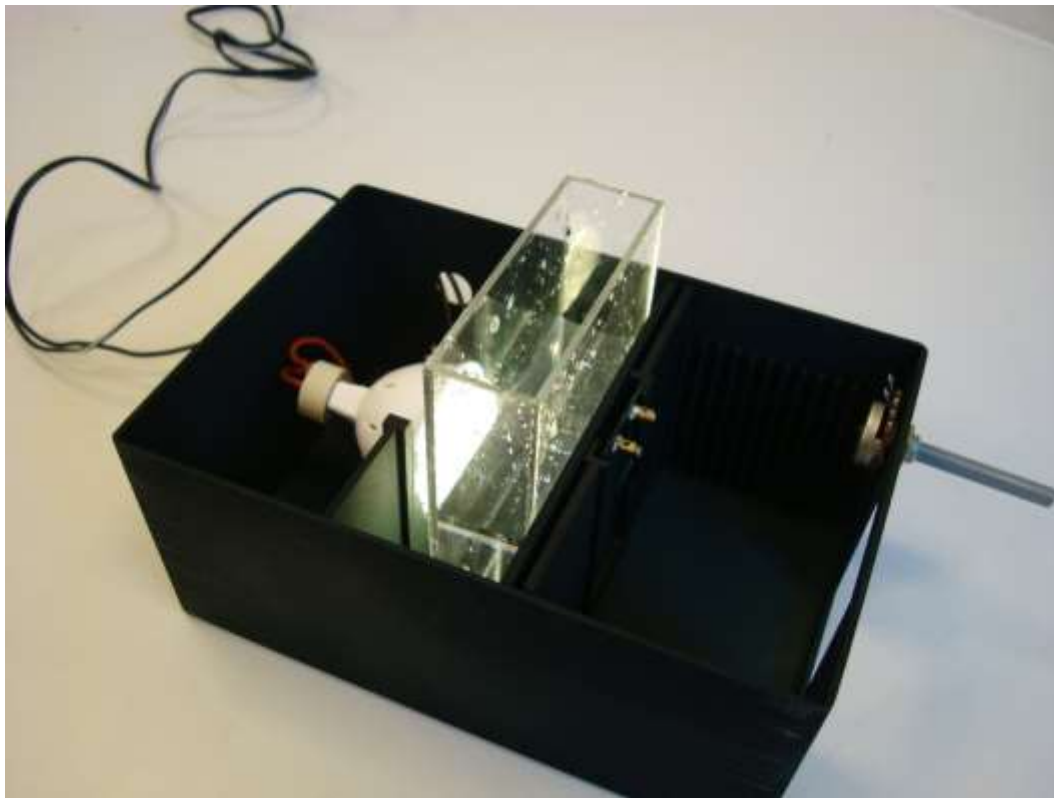


Рис. 2.8 Экспериментальная установка для задания 2.7.

2.7a	Измерьте силу тока I как функцию высоты уровня воды h в сосуде, рис. 2.8. Занесите данные в таблицу и постройте график.	1.0
2.7b	Объясните с помощью схематичных рисунков и символов почему график имеет именно такой вид.	1.0

Закрепите источник света в коробке. Поместите солнечный элемент А в держатель одного элемента. Расположите солнечный элемент на максимальном расстоянии от источника света. Разместите круговую диафрагму непосредственно перед солнечным элементом.

2.7c	Для этой конструкции выполните следующее: - Измерьте расстояние r_1 между источником света и солнечным элементом и ток I_1 . - Разместите пустой сосуд непосредственно перед круговой диафрагмой и измерьте ток I_2 . - Наполните сосуд водой почти доверху и измерьте ток I_3 .	0.6
2.7d	По измерениям из задания 2.7с, определите значение показателя преломления воды n_w . Опишите свой метод соответствующими схематическими рисунками и уравнениями. Вы можете включить какие-то дополнительные измерения.	1.6

Solution E1 /version 3 (Important: In this document decimal comma is used instead of decimal point in graphs and tables)

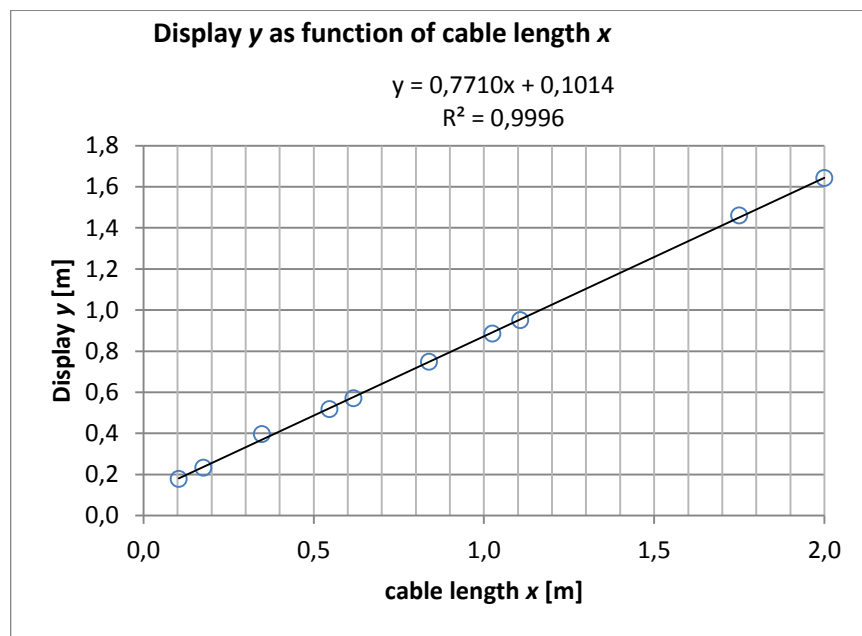
1.1

$H = 907 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. See the sketch in the figure corresponding to 1.3b. It must appear how the height is measured with the LDM in the rear mode.

1.2a

I used a 2 m cable but 1 m is sufficient. There should be about 8 lengths evenly distributed in the interval [0; 1 m].

x	y
m	m
0,103	0,177
0,176	0,232
0,348	0,396
0,546	0,517
0,617	0,570
0,839	0,748
1,025	0,885
1,107	0,950
1,750	1,459
2,000	1,642



1.2b

The refractive index is twice the gradient of the linear graph, $n_{co} = 2 \cdot 0.7710 = 1.542$.

The reason for that is that the travel time for a light pulse

$$t = \frac{x}{v_{co}} = \frac{xn_{co}}{c}$$

The display will therefore show $y = \frac{1}{2}ct + k \Leftrightarrow y = \frac{1}{2}n_{co}x + k$.

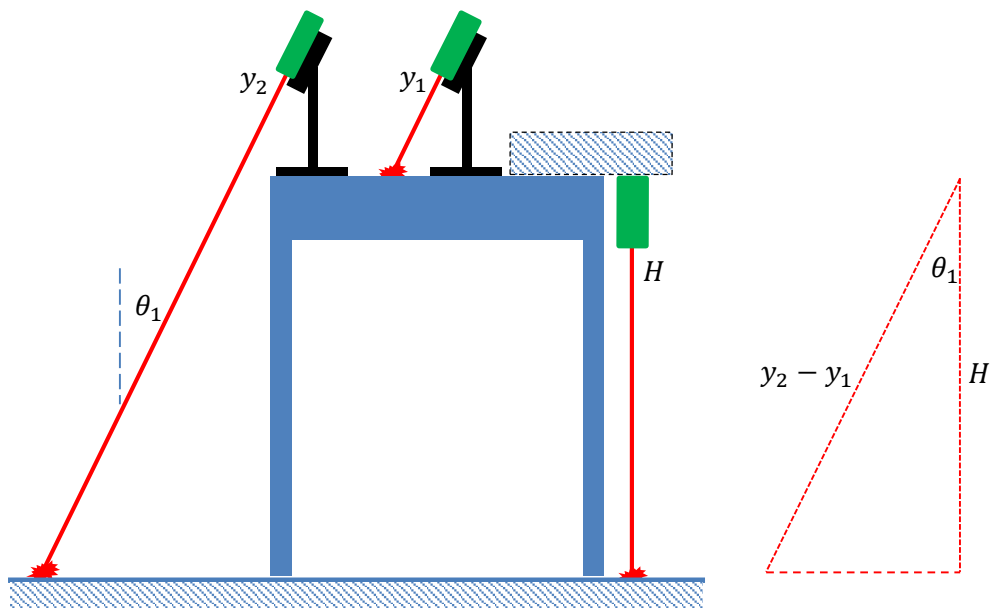
Lysets fart i lyslederkablet er $v_{co} = \frac{c}{n_{co}} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,542} = 1,95 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

1.3a

$$y_1 = 312 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}, y_2 = 1273 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$$

1.3b

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{H}{y_2 - y_1}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{907 \text{ mm}}{961 \text{ mm}}\right) = 19.30^\circ, \text{ se figure:}$$



Measuring the horizontal part of some triangle is very inaccurate because of the size of the laser dot. No marks will be awarded for that

Using $\delta = 2 \text{ mm}$ as the uncertainty of y_1 , y_2 and H , one can calculate the uncertainty of θ_1

$$\Delta \cos \theta_1 = \Delta\left(\frac{H}{y_2 - y_1}\right)$$

Using simple derivative, we get

$$\begin{aligned} \sin \theta_1 \cdot \Delta \theta_1 &= \frac{\delta}{H} + \frac{2\delta}{y_2 - y_1} \\ \Delta \theta_1 &= \frac{\left(\frac{\delta}{H} + \frac{2\delta}{y_2 - y_1}\right) \cdot 180^\circ}{\sin \theta_1 \cdot \pi} = \frac{\left(\frac{2}{907} + \frac{4}{961}\right) \cdot 180^\circ}{\sin 19,30^\circ \cdot \pi} = 1.1^\circ \end{aligned}$$

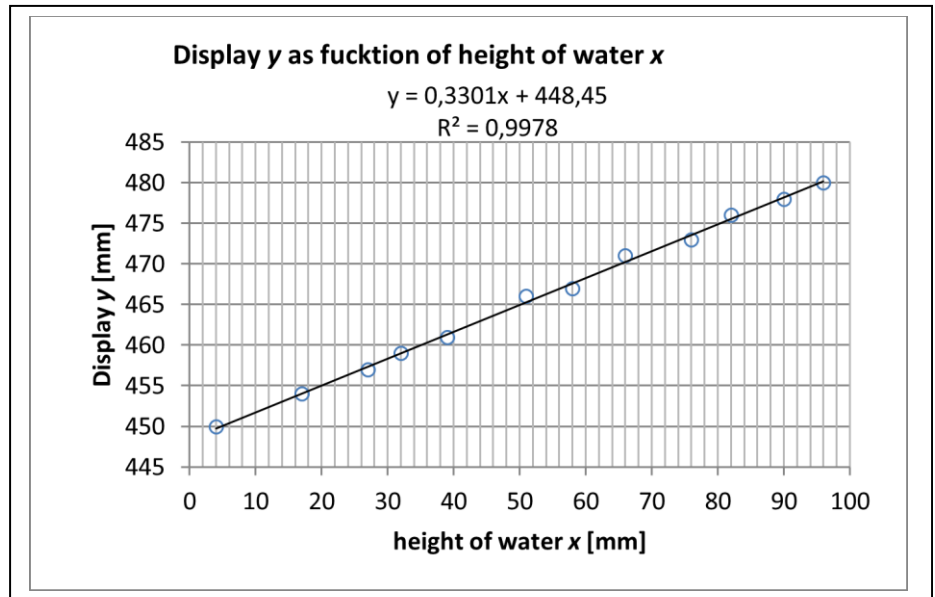
Otherwise, using min/max method

$$\Delta \theta_1 = \theta_{1\max} - \theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{H_{\min}}{y_{2\max} - y_{1\min}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{905 \text{ mm}}{965 \text{ mm}}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{907 \text{ mm}}{961 \text{ mm}}\right) = 1.0^\circ$$

Also, accept $\delta = 1 \text{ mm}$ and $\Delta \theta_1 = 0.5^\circ$

1.4a

x	y
mm	mm
4	450
17	454
27	457
32	459
39	461
51	466
58	467
66	471
76	473
82	476
90	478
96	480



1.4b

The time it takes the light to reach the water surface is

$$t_1 = \frac{(h - x) / \cos \theta_1}{c}$$

From the water surface to the bottom the light uses the time

$$t_2 = \frac{x / \cos \theta_2}{v}$$

Total travel time forth and back

$$t = 2t_1 + 2t_2 = 2 \frac{(h - x) / \cos \theta_1}{c} + 2 \frac{x / \cos \theta_2}{v} = 2 \frac{h - x}{c \cos \theta_1} + 2 \frac{nx}{c \cos \theta_2}$$

Hence, the display will show (we simply write $n = n_w$)

$$y = \frac{1}{2}ct + k = \left(\frac{n}{\cos \theta_2} - \frac{1}{\cos \theta_1} \right) x + \frac{h}{\cos \theta_1} + k$$

which is a linear function of x .

Using a trigonometric identity and Snell's law,

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n^2}}$$

we get the gradient to be

$$\alpha = \frac{n}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n^2}}} - \frac{1}{\cos \theta_1} = \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}} - \frac{1}{\cos \theta_1}$$

1.4c

Knowing the gradient α from the graph, we can find n solving this equation with respect to n .

Introducing a practical parameter,

$$p = \alpha + \frac{1}{\cos \theta_1}$$

our equation becomes

$$p = \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}$$

which can be written

$$n^4 - p^2 n^2 + p^2 \sin^2 \theta_1 = 0$$

and solved

$$n_w = \sqrt{\frac{p^2 \pm \sqrt{p^4 - 4p^2 \sin^2 \theta_1}}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} p \sqrt{1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{2 \sin \theta_1}{p}\right)^2}}$$

From our graph, we get $\alpha = 0.3301$. From there we find $p = 1.37865$ and hence $n_w = 1.3437$, omitting negative solutions and solutions less than 1.

The official value of n_w for pure water at normal conditions is $n_w = 1.331$ for the laser wavelength $\lambda = 635 \text{ nm}$.

Just for your interest, we have the following approximations:

For small angles, we have

$$n_w \approx \frac{\sqrt{2}}{2} p \sqrt{1 + 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2 \sin \theta_1}{p}\right)^2} \approx p \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta_1}{p}\right)^2} \approx p \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin \theta_1}{p}\right)^2\right)$$

For very small angles, we get

$$n_w \approx p \approx \alpha + 1$$

It is much simpler but not recommendable to do the experiment with very small $\theta_1 \approx 0$: Reflections in the water surface will ruin the signal from the bottom.

2.0 Introduction

Equipment used for this experiment is displayed in Fig. 2.1.

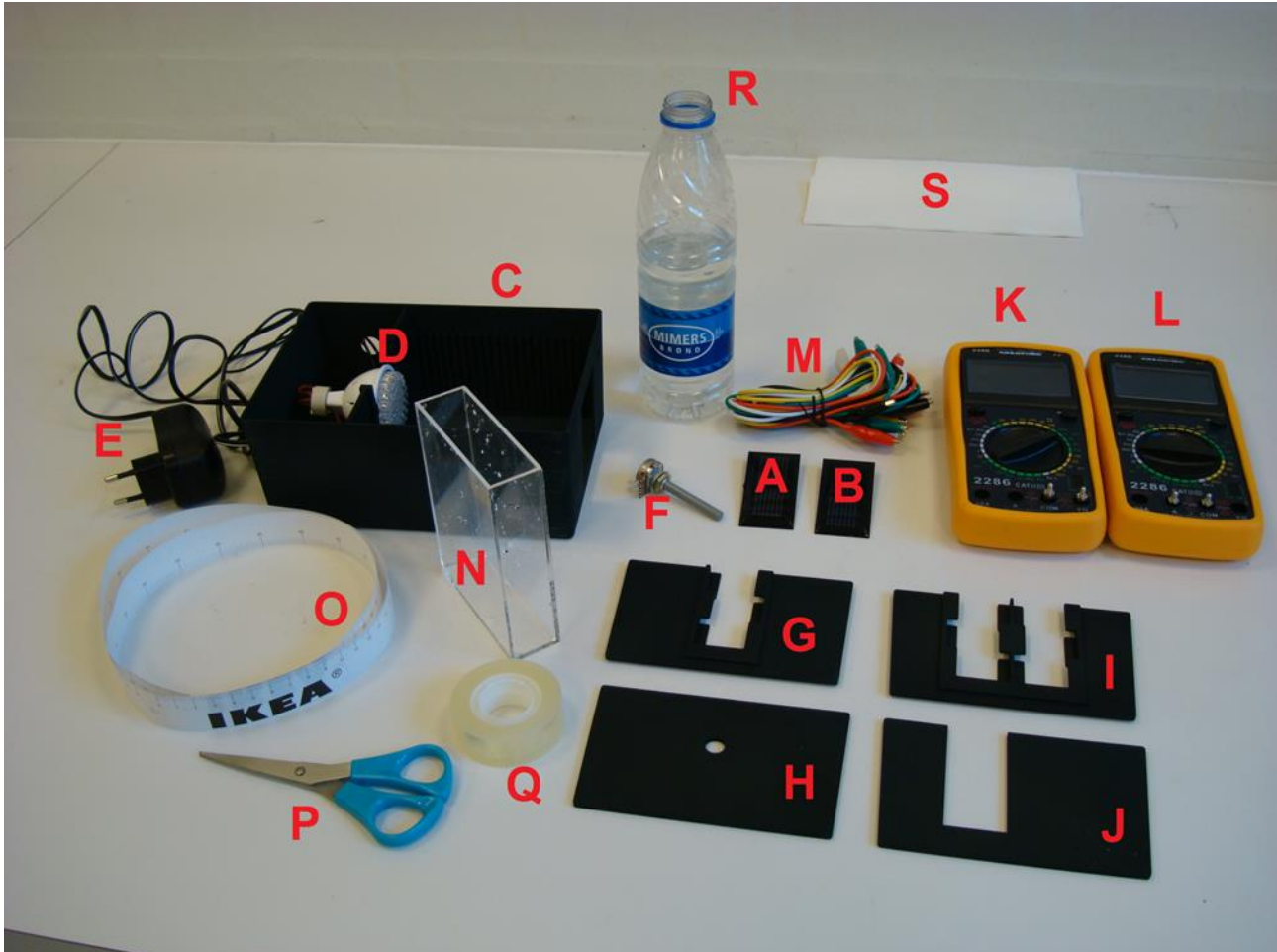


Figure 2.1 Equipment used for experiment E2.

List of equipment (see Fig. 2.1):

- A: Solar cell
- B: Solar cell
- C: Box with slots for the mounting of light source, solar cells, etc.
- D: LED-light source in holder
- E: Power supply for light source D
- F: Variable resistor
- G: Holder for mounting single solar cell in the box C
- H: Circular aperture for use in the box C
- I: Holder for mounting two solar cells in the box C

- J:** Shielding plate for use in the box C
- K:** Digital multimeter
- L:** Digital multimeter
- M:** Wires with mini crocodile clips
- N:** Optical vessel (large cuvette)
- O:** Measuring tape
- P:** Scissors
- Q:** Tape
- R:** Water for filling the optical vessel N
- S:** Paper napkin for drying off excess water
- T:** Plastic cup for water from the optical vessel N (not shown in Fig. 2.1)
- U:** Plastic pipette (not shown in Fig. 2.1)
- V:** Lid for the box C (not shown in Fig. 2.1)

Data sheet: table of fundamental constants

Speed of light in vacuum	$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Elementary charge	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Boltzmann's constant	$k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

A solar cell transforms part of the electromagnetic energy in the incident light to electric energy by separating charges inside the solar cell. In this way an electric current can be generated. Experiment E2 intends to examine solar cells with the use of the supplied equipment. This equipment consists of a box with holders for light source and solar cells along with various plates and a lid. The variable resistor should be mounted in the box, see Fig. 2.2. One of the three terminals on the resistor has been removed, since only the two remaining terminals are to be used. Also supplied are wires with mini crocodile clips and two solar cells (labeled with a serial number and the letter A or B) with terminals on the back. The two solar cells are similar but can be slightly different. The two multimeters have been equipped with terminals for designated use as ammeter and voltmeter, respectively, see Fig. 2.3. Finally, the experiment will make use of an optical vessel together with some drinking water from the bottle.

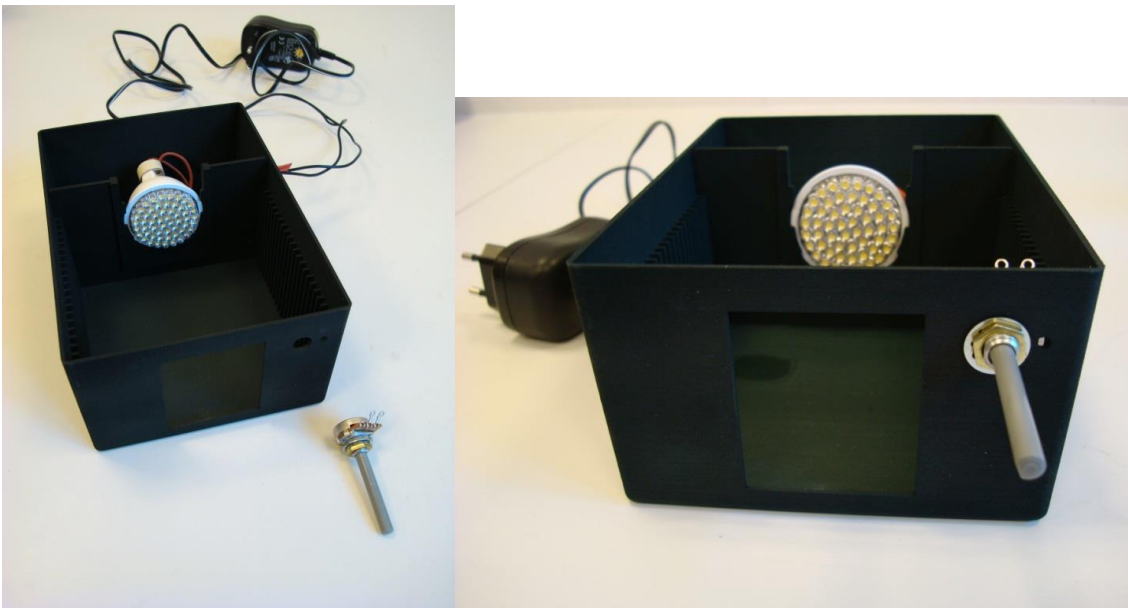


Figure 2.2 (a) Box with light source and resistor for mounting. (b) The resistor mounted in the box. Notice that the small pin on the resistor fits in the hole to the right of the shaft.



Figure 2.3 Multimeters equipped with terminals for use as ammeter (left) and voltmeter (right), respectively. The instrument is turned on by pressing “POWER” in the top left corner. The instrument turns off automatically after a certain idle time. It can measure direct current and voltage (=) as well as alternating current and voltage (~). The internal resistance in the voltmeter is 10 M Ω regardless of the measuring range. The potential difference over the ammeter is 200 mV at full reading, regardless of the measuring range. In case of overflow the display will show “1”, and you need to select a higher measuring range. The “HOLD” button (top right corner) should not be pushed, except if you want to freeze a measurement.

WARNING: *Do not use the multimeter as an ohmmeter on the solar cells since the measuring current can damage them. When changing the measuring range on the multimeters, please turn the dial with caution. It can be unstable and may break. Check whether there is a number under the decimal point when measuring – if the dial is not fully in place, the multimeter will not measure, even if there are digits in the display.*

Notice: **Do not change the voltage on the power supply. It must be 12 V throughout the experiment.** (The power supply for the light source should be connected to the outlet (230 V ~) at your table.)

Notice: **Uncertainty considerations are only expected when explicitly mentioned.**

Notice: **All measured and calculated values must be given in SI units.**

Notice: **For all measurements of currents and voltages in this experiment, the LED-light source is supposed to be on.**

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

For this question you will measure the current, I , generated by the solar cell when in a circuit with the ammeter, and determine how it depends on the distance, r , to the light source. The light is produced *inside* the individual light diodes and r is therefore to be measured as shown in Fig. 2.4.

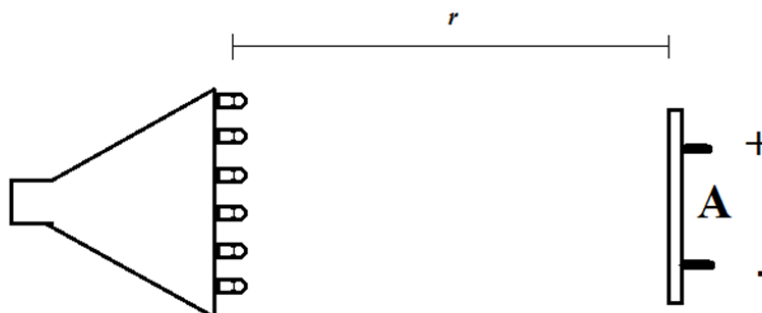


Figure 2.4 Top view of setup for question 2.1.

The distance is measured from inside the light diode to the surface of the solar cell. **ADD aperture in picture**

Do not change the measuring range on the ammeter in this experiment: the internal resistance of the ammeter depends on the measuring range and affects the current that can be drawn from the solar cell. State the serial numbers of the light source and of solar cell A on your answer sheet. Mount solar cell A in the single holder and place it together with the circular aperture immediately in front of the solar cell. The current I as a function of the distance r to the light source can, when r is not too small, be approximated by

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

where I_a and a are constants.

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

2.2 Characteristic of the solar cell

Remove the circular aperture. Mount the variable resistor in the box as shown on Fig. 2.2. Place the light source in slot number 0, furthest away from the resistor. Mount solar cell A in the single holder *without the circular aperture* in slot number 10. Build a circuit as shown in Fig. 2.5, so that you can measure the characteristic of the solar cell, i.e. the terminal voltage U of the solar cell as a function of the current I in the circuit consisting of solar cell, resistor and ammeter.

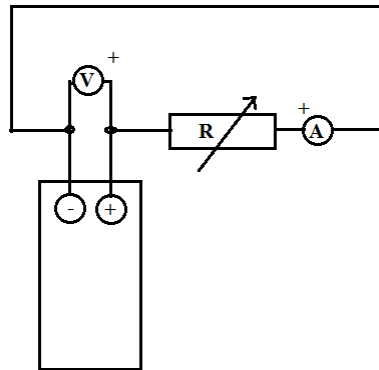


Figure 2.5 Electrical diagram for measuring the characteristic in question 2.2.

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

2.3 Theoretical characteristic for the solar cell

For the solar cells in this experiment, the current as function of the voltage is given by the equation

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

where the parameters I_{\max} , I_0 and η are constant at a given illumination. We take the temperature to be $T = 300$ K. The fundamental constants e and k_B are the elementary charge and Boltzmann's constant, respectively.

2.3a	Use the graph from question 2.2b to determine I_{\max} .	0.4
------	--	-----

The parameter η can be assumed to lie in the interval from 1 to 4. For some values of the potential difference U , the formula can be approximated by

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

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
------	--	-----

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

2.5 Comparing the solar cells

Mount both solar cells (A and B) in the double holder in slot number 15, see Fig. 2.6.

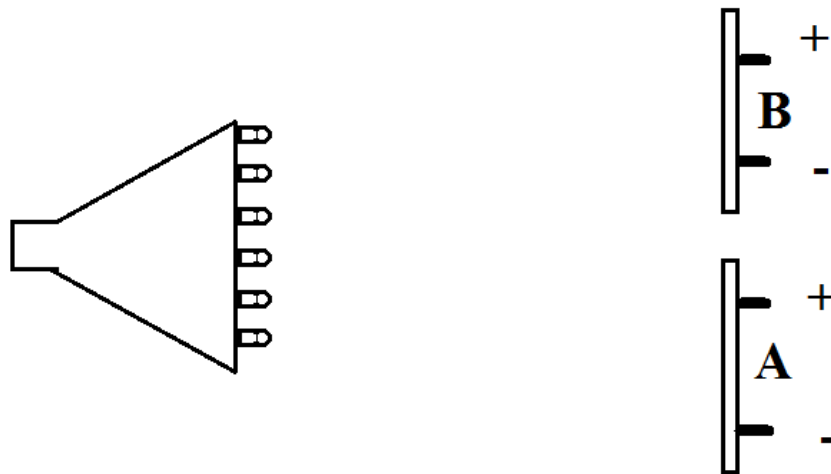


Figure 2.6 Top view of light source and solar cells in question 2.5.

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

2.6 Couplings of the solar cells

The two solar cells can be connected in series in two different ways as shown in Fig. 2.7. There are also two different ways to connect them in parallel (not shown in the figure).

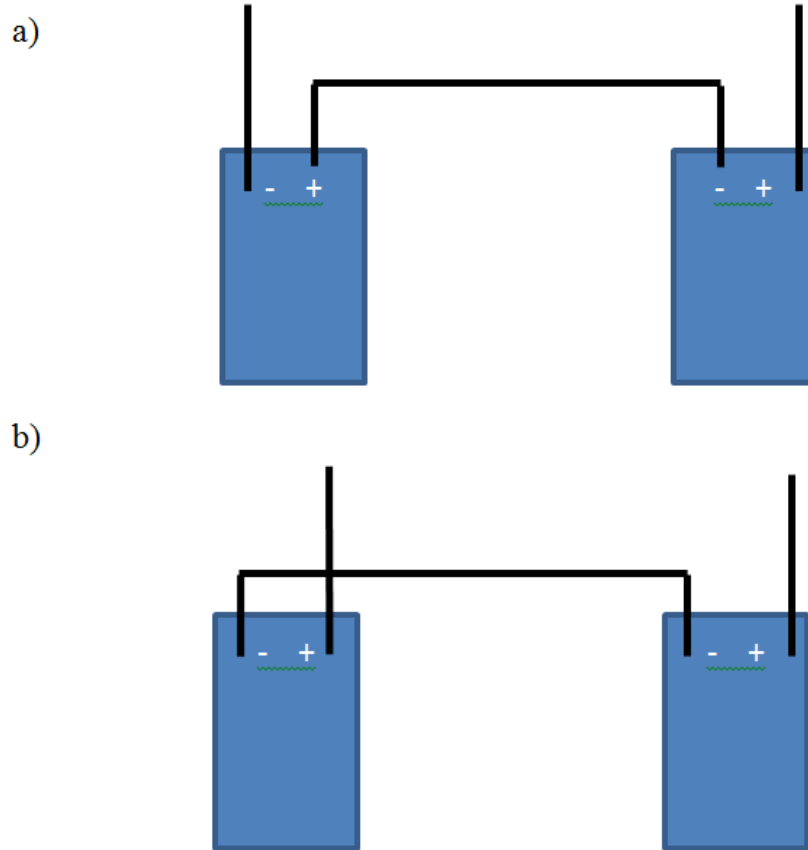


Figure 2.7 Two ways to connect the solar cells in series for question 2.6. The two ways to connect them in parallel are not shown.

2.6	<p>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). Hint: You can estimate the maximum power quite well by calculating it from the maximum voltage and maximum current measured from each configuration.</p> <p>Draw the corresponding electrical diagram.</p>	1.0
-----	---	-----

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

Mount the light source in the box and place solar cell A in the single holder with the circular aperture immediately in front, so that there is approximately 50 mm between the solar cell and the light source. Place the empty optical vessel immediately in front of the circular aperture as shown in Fig. 2.8.

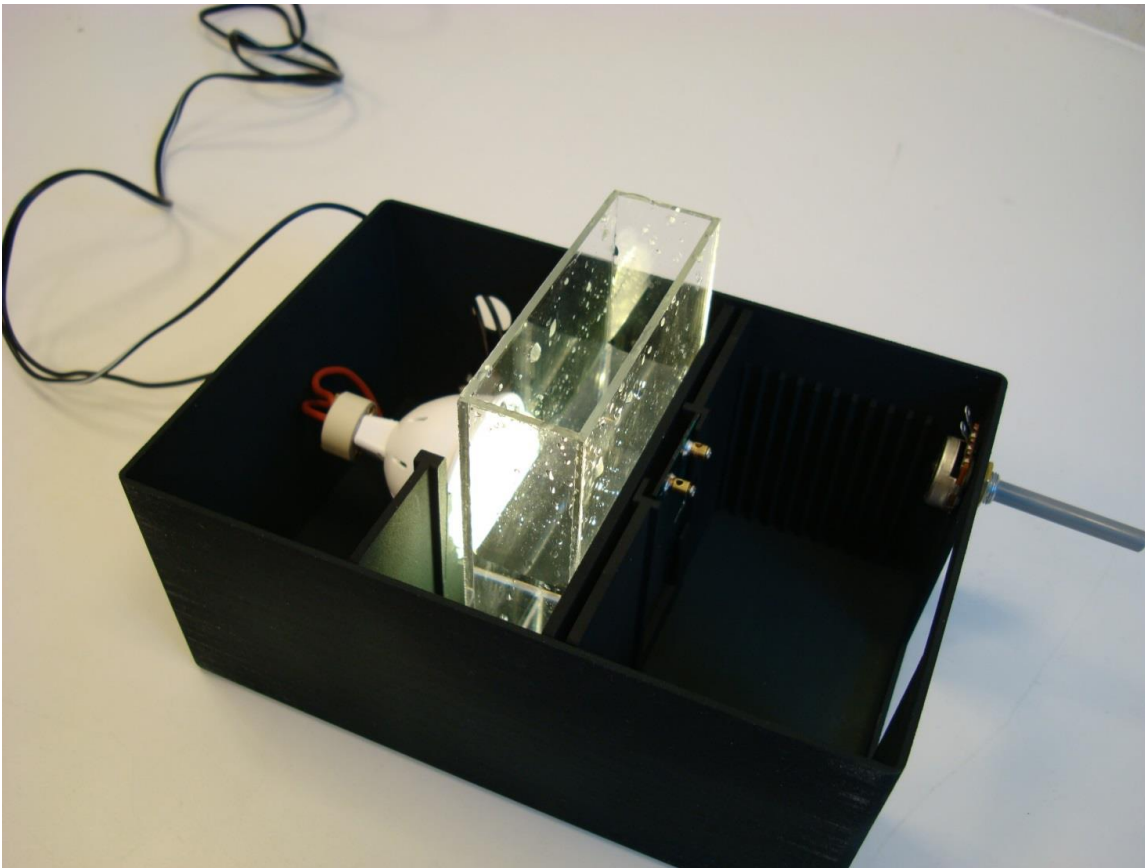


Figure 2.8 Experimental set-up for question 2.7.

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

Mount the light source in the box and place solar cell A in the single holder so that the distance between the solar cell and the light source is maximal. Place the circular aperture immediately in front of the solar cell.

2.7c	For this set-up do the following: <ul style="list-style-type: none"> - Measure the distance r_0 and the current I_0. - Place the empty vessel immediately in front of the circular aperture and measure the current I_1. - Fill up the vessel with water, almost to the top, and measure the current I_2. 	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