

Лабораторная работа № 3

Изучение фотометрических характеристик источника света

Цель работы: освоение методики измерений освещённости при помощи люксметра, определение силы света точечного источника и построение индикатрисы свечения лампы накаливания.

Оборудование: электрическая схема из 2 ламп, источника и реостата, люксметр Ю16, деревянная линейка длиной 1 м, оптическая скамья.

Теоретическое введение

Одной из основных фотометрических характеристик является световой поток – количество энергии излучения или лучистой энергии, протекающей через какую-либо площадку в единицу времени.

$$\Phi = \frac{dW}{dt}, [\Phi] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}, W = \int \Phi dt. \quad (3.1)$$

В СИ световой поток измеряется в люменах (лм).

Источники света характеризуются силой света, светимостью, яркостью и спектральным составом излучения. Далее рассматриваются только источники белого света, излучающие сплошной спектр в видимом диапазоне длин электромагнитных волн.

Точечным называется источник, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

Сила света точечного источника – поток, приходящийся на единицу телесного угла.



Рис. 3.1

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, [I] = \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}, I = \frac{dW}{dt d\Omega}, \Phi = \int I d\Omega. \quad (3.2)$$

Основной оптической единицей в СИ является единица силы света – кандела¹ (кд).

¹ Кандéла (от лат. *candela* — свеча; русское обозначение: кд; международное: cd) — единица силы света, одна из семи основных единиц Международной системы единиц (СИ). Определена как «сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср» точно.

Принято на XXVI ГКМВ в 2018 году. Вступило в силу с 2019 года.

Le Système international d'unités (SI) / The International System of Units (SI) : [фр., англ.]. — 9-е изд. — BIPM, 2019. — ISBN 978-92-822-2272-0. URL: <https://www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9.pdf>.

Если сила света не зависит от направления (источник изотропный), то из (3.2) следует, что полный световой поток будет равен

$$\Phi = \int_0^{4\pi} I d\Omega = I \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi I. \quad (3.3)$$

Протяжённые источники света характеризуются яркостью и светимостью.

Яркостью в данном направлении называется поток, посылаемый в данном направлении единицей видимой поверхности источника внутри единичного телесного угла.

$$B = \frac{d\Phi}{d\Omega dS \cos \theta} = \frac{I}{dS \cos \theta}, \quad (3.4)$$

где dS – площадь светящейся поверхности, θ – угол между нормалью к элементу dS и данным направлением. Яркость

измеряется в канделах на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$). Источники, яркость которых по всем направлениям одинакова, называются ламбертовскими².

Светимостью M называют суммарный поток, посылаемый единицей поверхности источника наружу по всем направлениям

$$M = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (3.5)$$

Единицей светимости является люмен/кв. метр ($\text{лм}/\text{м}^2$).

Основной характеристикой приёмника света является освещённость.

Освещённостью в точке поверхности называется величина потока, приходящегося на единицу поверхности

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (3.6)$$

где $d\Phi$ – падающий световой поток, dS – площадь освещаемой поверхности.

Единицей освещённости является люкс (лк).

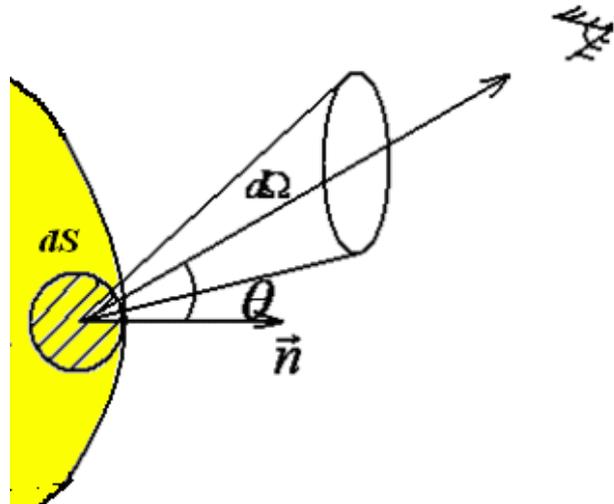


Рис. 3.2

² Ламберт Иоганн Генрих (Johann Heinrich Lambert) (26.08.1728-26.09.1777) – немецкий учёный, один из создателей фотометрии. В математике доказал иррациональность числа π (1766 г.). В астрономии исследовал кометные орбиты, строение Вселенной. Автор идеи универсального языка знаков.

Точечный изотропный источник света создаёт освещённость в точке плоской поверхности, которая определяется законом Кеплера³-Ламберта

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \theta, \quad (3.7)$$

где r – расстояние от источника до точки освещаемой поверхности, θ – угол между нормалью к поверхности и направлением на источник.

Определение силы света источников, которые по своим параметрам близки к точечным, производится путём сравнения с источником с известной силой света. Для этого создают равенство освещённости каких-либо смежных поверхностей или пластинок, освещаемых различными источниками. Тогда

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2} \cos \theta_1, \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2} \cos \theta_2.$$

Если $\theta_1 = \theta_2$ и $E_1 = E_2$, то

$$I_2 = \frac{I_1 r_2^2}{r_1^2}. \quad (3.9)$$

Такой способ определения силы света источников называется фотометрическим. Равенство освещённостей поверхностей можно фиксировать либо визуально, либо при помощи приборов, которые называют люксметрами.

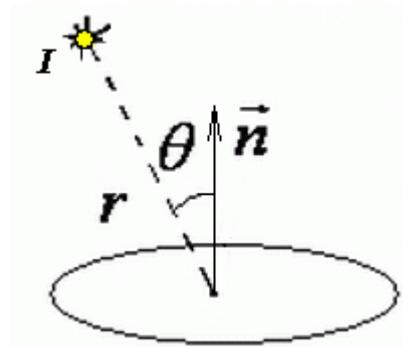


Рис. 3.3

Описание установки

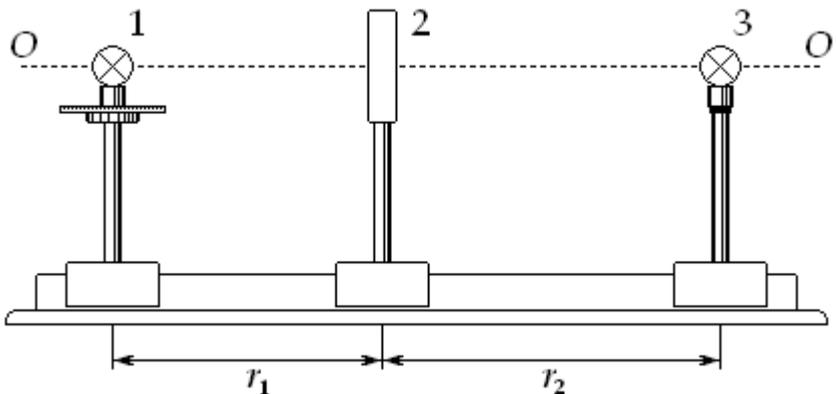


Рис. 3.4. Схема экспериментальной установки

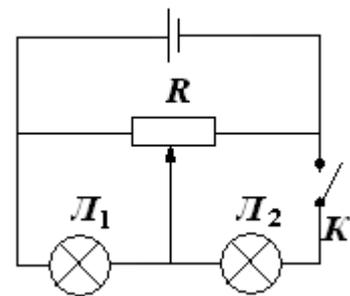


Рис. 3.5. Схема электрическая

³ Кеплер Иоганн (Johannes Kepler) (27.12.1571-15.11.1630) — немецкий математик, астроном, оптик и астролог, первооткрыватель законов движения планет Солнечной системы. В 1604 году издал трактат по оптике «Дополнения к Вителлию», а в 1611 году — ещё одну книгу «Диоптрика».

Установка для проведения измерений состоит из оптической скамьи, на которой на рейтерах расположены: лампа накаливания 1 с устройством поворота её вокруг вертикальной оси; фотоэлемент 2 люксметра и неподвижная лампа накаливания 3 (рис. 3.4).

Лампы накаливания подключены к источнику питания ВС-4-12. Имеется ключ, позволяющий включать только одну (вращающуюся) или обе лампы. Величина тока, проходящего через нить лампы 3, может изменяться реостатом, который включен в электрическую цепь последовательно с лампой. Лампа 1 снабжена лимбом для определения угла поворота лампы вокруг вертикальной оси. В работе используются лампы с короткими нитями накала, что позволяет в ряде случаев считать их точечными источниками света. Плоскость фотоэлемента люксметра устанавливается на оптической скамье перпендикулярно оси OO' .



Рис. 3.6. Люксметр Ю16

Инструкция по применению люксметра Ю16 с фотоэлементом Ф102 прилагается к работе.

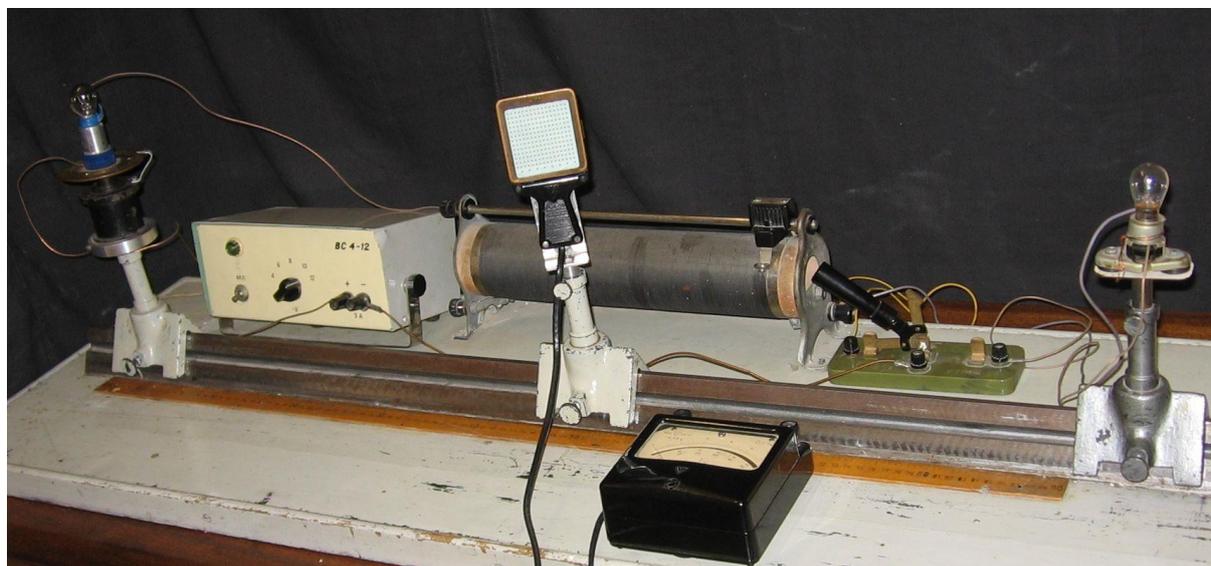


Рис. 3.7. Общий вид установки

Методика выполнения работы

Внимание! Работа проводится в тёмном помещении!

Каждое измерение необходимо выполнять при оптимальном верхнем пределе измерений люксметра!

I. Определение зависимости освещённости от расстояния до лампы

1. Включить источник питания. Установить ключ в положение, при котором лампа 3 выключена. Повернуть лампу 1 так, чтобы её спираль была вдоль оптической скамьи и оси OO' .
2. Установить фотоэлемент люксметра на оптической скамье на расстоянии 0,2 м от лампы 1. Светочувствительный слой элемента должен быть обращен к лампе 1 и перпендикулярен оси OO' .
3. Снять защитную крышку с фотоэлемента и для стрелочного люксметра с помощью реостата установить оптимальную яркость лампы. Измерить освещённость.
4. Последовательно увеличивать расстояние между лампой 1 и фотоэлементом, выполняя пункт 3 для каждого расстояния. Результаты измерений внести в таблицу 1. Выключить источник.
5. Рассчитать силу света лампы, используя формулу (3.7) на основе измеренных освещённостей для трёх последних расстояний и определить среднее значение. Оценить погрешность.
6. Используя вычисленное значение силы света, определить теоретические значения освещённости для соответствующих расстояний и заполнить последнюю строку таблицы.
7. Построить графики зависимости освещённости от расстояния по измеренным и рассчитанным данным.
8. Объяснить сходство и различия экспериментальной и расчётной кривых.
- 9^{*4}. Для силы света, рассчитанной при $r = 1$ м рассчитать погрешности как для косвенных измерений.

II. Построение индикатрисы⁵ излучения света лампы накаливания

1. Включить источник питания. Установить ключ в положение, при котором лампа 3 выключена.
2. Повернуть лампу 1 так, чтобы спираль была перпендикулярна оси OO' . Это положение анализатора считать за начало отсчёта ($\varphi = 0$).
3. Установить фотоэлемент на расстоянии 1 м от лампы.
4. Измерить освещённость. Результат внести в таблицу 2.

⁴ Дополнительное задание для студентов физических специальностей.

⁵ Индикатриса (франц. *indicatrice*, букв. — указывающий), в оптике — графическое изображение зависимости характеристик светового поля (яркости, поляризации света) или оптических характеристик среды (показателей преломления, отражательной способности) от направления.

5. Повторить п.4, измеряя освещённость для углов от 0° до 180° через 15° .
6. Для каждого угла поворота рассчитать силу света и заполнить третью строку таблицы 2.
7. Выбрать максимальное значение силы света и отнормировать на него все остальные данные. Заполнить последнюю строку таблицы 2.

$$I_n = \frac{I}{I_{\max}}$$

8. По полученным данным построить индикатрису распределения силы света в зависимости от угла поворота лампы 1, откладывая по радиусам соответствующие этим углам значения нормированной силы света, взятые в определённом масштабе (полярные координаты).

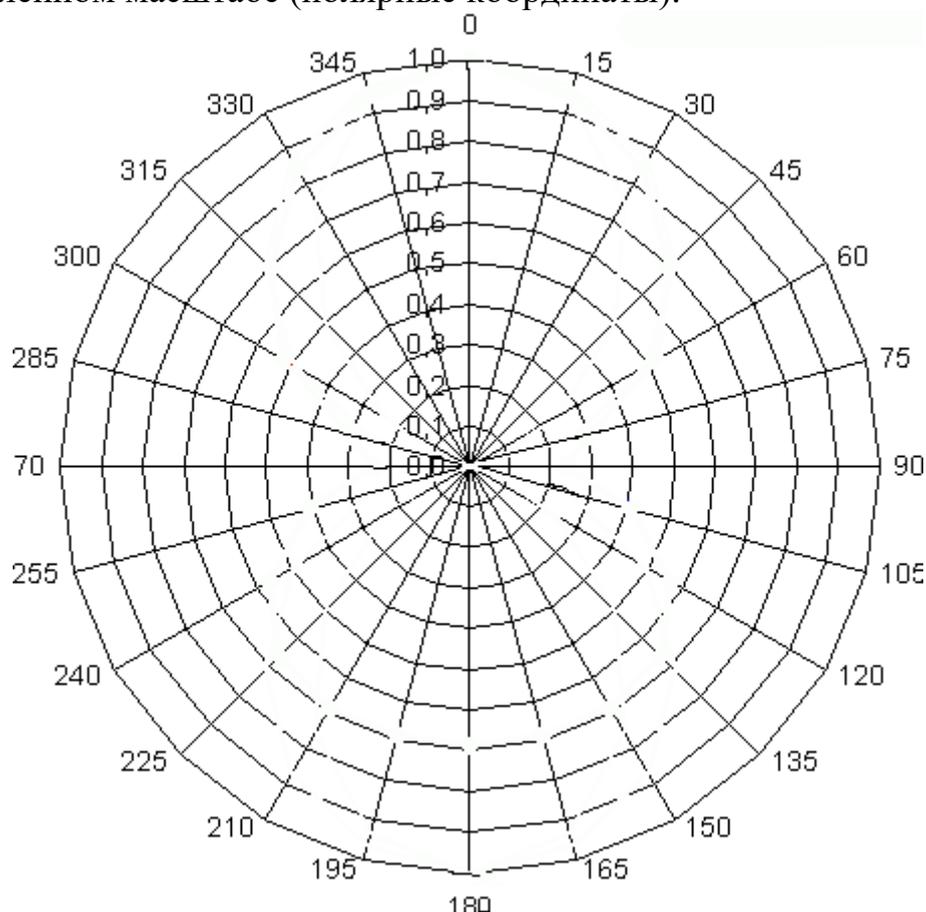


Рис. 3.8. К построению индикатрисы

9. Объяснить ход экспериментальной кривой.

III. Измерение освещённости от двух точечных источников

1. Включить источник питания. Установить ключ в положение, при котором горят обе лампы. Установить нити ламп параллельно друг другу и перпендикулярно OO' . С помощью реостата выровнять силы света ламп.
2. Поворачивая фотоэлемент поочерёдно к каждой лампе, измерить освещённости, создаваемые каждой лампой в точке B (рис. 3.9) и рассчитать силы света ламп I_1 и I_2 . Результаты внести в таблицу 3.

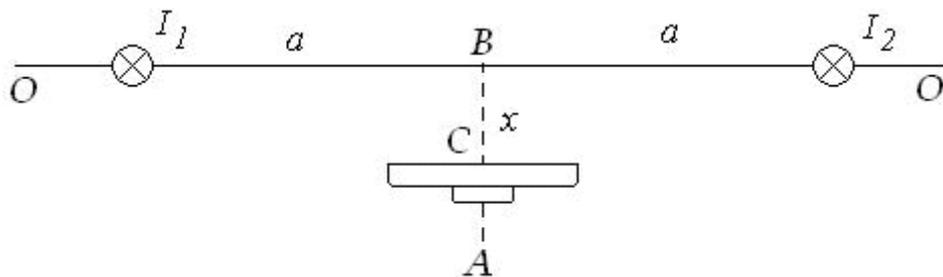


Рис. 3.9. Схема опыта

3. Снять фотоэлемент с оптической скамьи и расположить, как показано на рис. 3.9 и рис. 3.10 на расстоянии 5 см от прямой OO' . Для этого использовать деревянную линейку длиной 1 м. Измерить освещённость.

4. Перемещая фотоэлемент по линейке по прямой BA , через каждые 5 см записывать показания прибора. Результаты внести в таблицу 4.

Внимание! Будьте аккуратны при отсчёте расстояния.

5. Построить график зависимости освещённости фотоэлемента E_{Σ} от расстояния $BC = x$.

6. Теоретически получить формулу зависимости освещённости от двух источников E_T в произвольной точке C на перпендикуляре BA . Сделать расчёт и заполнить третью строку таблицы.

7. Для сравнения экспериментальной и теоретической зависимостей к графику $E_{\Sigma} = E_{\Sigma}(x)$ добавить график $E_T = E_T(x)$.

9. Объяснить сходство и различия экспериментальной и расчётной кривых.



Рис. 3.10. Эксперимент 3

Контрольные вопросы

1. Дайте определения силы света, светового потока, освещённости. Назовите их световые и энергетические единицы измерения.
2. Какие источники света называют точечными?
3. Сформулируйте законы освещённости.
4. Какие приборы называют фотометрами?

Литература

(см. список литературы)

Лабораторная работа № 3. Лист отчёта
Изучение фотометрических характеристик источника света

Выполнил студент _____
 Факультет _____ курс _____ группа _____
 Проверил _____
 Показания сняты _____
 Зачтено _____

Погрешности измерительных приборов. $\alpha = \underline{\hspace{2cm}}\%$

Измерительный прибор	ω – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}$ – субъективная	Единицы измерения
люксметр			10%		лк
линейка	1			5	мм

I. Определение зависимости освещённости от расстояния до лампы

Таблица 1

r , м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$E_{\text{экс}}$, лк									
	I , кд								
$E_{\text{теор}}$, лк									

$I_{\text{сред}} = (\underline{\hspace{1cm}} \pm \underline{\hspace{1cm}}) \text{ кд}, \quad \varepsilon = \underline{\hspace{1cm}}\%.$

$I(r=1\text{ м}) = (\underline{\hspace{1cm}} \pm \underline{\hspace{1cm}}) \text{ кд}, \quad \varepsilon = \underline{\hspace{1cm}}\%.$

II. Построение индикатрисы излучения света лампы накаливания

Таблица 2

φ	0	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
E , лк													
I , кд													
I_n													

III. Измерение освещённости от двух точечных источников

Таблица 3

E_{01} , лк		I_1 , кд	
E_{02} , лк		I_2 , кд	

Таблица 4

x , м	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	...	1,00
$E_{\text{э}}$, лк	0													
$E_{\text{т}}$, лк	0													