

Лабораторная работа 3-11

ЗАКОН ЛАМБЕРТА

С.И.Валянский

Цель работы

Экспериментальная проверка закона Ламберта.

Теоретическое введение

Воздействие света на глаз или какой-либо другой приемный аппарат состоит, прежде всего, в передаче этому регистрирующему аппарату энергии, переносимой световой волной.

Фотометрия – раздел физической оптики, в котором рассматриваются энергетические характеристики оптического излучения, распространяющегося в различных средах и взаимодействующего с веществом. При этом энергия электромагнитных колебаний оптического диапазона усредняется по малым интервалам времени, которые, однако, значительно превышают период этих колебаний. Фотометрия охватывает как экспериментальные методы и средства измерений фотометрических величин, так и относящиеся к этим величинам теоретические положения и расчёты.

Теоретические и экспериментальные методы фотометрии находят применение в светотехнике и технике сигнализации, в астрономии и астрофизике, при расчёте переноса излучения в плазме газоразрядных источников света и звёзд, при химическом анализе веществ, в пирометрии, при расчётах теплообмена излучением и во многих других областях науки и производства.

Фундаментальный для фотометрии закон

$$E = I t^2,$$

согласно которому освещённость E изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния l от точечного источника силой света I , был сформулирован И. Кеплером в 1604 г. Однако основоположником экспериментальной фотометрии следует считать П. Бугера, который опубликовал в 1729 г. описание визуального метода количественного сравнения различных источников света – установления (путём изменения расстояний до источников) равенства освещённостей соседних поверхностей с использованием в качестве прибора глаза.

В 1760 г. И. Ламберт приступил к развитию теоретических методов фотометрии.

Прежде всего, необходимо дать определение основных *фотометрических величин*, которые применяют в измерительной практике. Их выбор обусловлен особенностями приемных аппаратов, непосредственно реагирующих на ту или иную из этих величин. Обычно *световые величины* рассматриваются относительно спектральной чувствительности человеческого глаза, которая максимальна в зеленой области видимого спектра ($\lambda = 550$ нм).

Основным энергетическим понятием фотометрии является *световой поток излучения Φ* . Это энергия видимого излучения, переносимая потоком квантов света в единицу времени. Световой поток соответствует мощности излучения в системе энергетических величин. Единица измерения в СИ: люмен.

Световая энергия Q это энергия видимого излучения, переносимая потоком квантов. Под световой энергией понимается поток, получаемый за единицу времени от источника света. Единица измерения в СИ: люмен·сек.

Отношение светового потока к телесному углу, в пределах которого заключен этот поток, называется *силой света I* . Единица измерения в СИ: кандела (кд).

Яркость L это световая характеристика излучающего свет тела, отношению силы света, излучаемого поверхностью, к площади ее проекции в плоскости, перпендикулярной точке наблюдения (рис. 11.1). Единица измерения в СИ: кд/м².

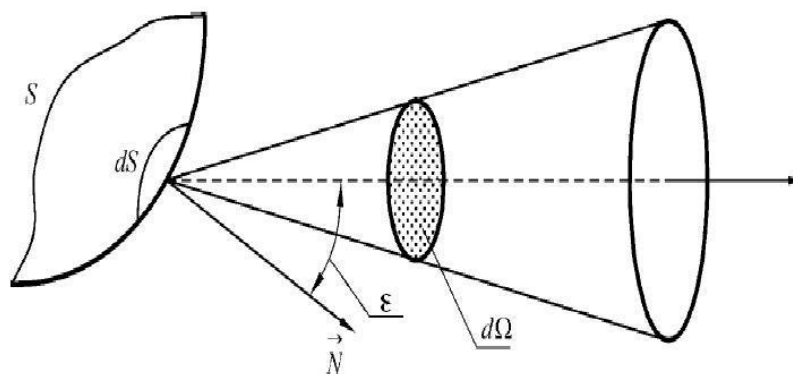


Рис. 11.1. Определение яркости излучающей поверхности.

Поверхность, у которой яркость не зависит от угла наклона площадки к лучу зрения, называется *ортотропной*. Испускаемый с единицы площади такой поверхности световой поток подчиняется *закону Ламберта*.

Плотность потока световой энергии M в заданном направлении называется *светимостью*.
Единица измерения в СИ: лм/м²

Освещение поверхности, создаваемое световым потоком, падающим на поверхность называется *освещённостью* E . Единицей измерения освещенности в СИ служит люкс (1 люкс = 1 люмен на квадратный метр).

Перечисленные величины и их характеристики представлены в табл. 11.1.

Таблица 11.1.

Основные фотометрические величины и их характеристики

Фотометрическая величина	Обозначение	Определение	Единица измерения (символ)	Единица энергетическая
Световой поток	Φ	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	люмен (лм)	Вт
Световая энергия	Q	$Q = \int \Phi dt$	люмен сек (лм с)	Дж

Сила света	I	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	кандела (кд)	Вт/ср
Яркость	L	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dS_1 \cos(\epsilon_1)}$	кандела/м ² (кд/м ²)	Вт/(ср м ²)
Светимость	M	$M = \frac{d\Phi}{dS_1}$	люмен/м ² (лм/м ²)	Вт/м ²
Освещенность	E	$E = \frac{d\Phi}{dS_2}$	люкс (лк)	Вт/м ²

Примечание. S_1 — элемент площади источника, S_2 — элемент площади приёмника, ϵ_1 — угол между нормалью к элементу площади источника и направлением наблюдения.

Источник излучения – это некоторая поверхность, излучающая энергию. Общими характеристиками источника излучения являются:

поток излучения; диаграмма силы света – показывает распределение силы света в пространстве $I(\varphi, \theta)$;

яркость $L(x, y, \varphi, \theta)$, где x, y – координаты на поверхности источника, φ, θ – углы в сферических координатах.

Особый интерес представляет так называемый *ламбертовский излучатель*. Это такой излучатель, у которого яркость постоянна и не зависит от направления (то есть не зависит от положения точки на поверхности и от угла наблюдения).

В 1760 г. И. Ламберт сформулировал закон, согласно которому яркость L рассеивающей свет диффузной поверхности одинакова во всех направлениях. Из определения **закона Ламберта** следуют простые соотношения между световыми величинами – светимостью M и яркостью L :

$$M = \pi L,$$

а также между силой света рассеивающей плоской поверхности по перпендикуляру к ней I_0 и под углом θ :

$$I_\theta = I_0 \cos\theta .$$

Последнее выражение означает, что сила света такой поверхности максимально по направлению перпендикулярному к ней и, убывает с увеличением θ по закону косинуса, становясь равной нулю в касательных к поверхности направлениях.

В действительности лишь немногие реальные тела рассеивают свет без значительного отступления от закона Ламберта даже в видимой области спектра. К ним относятся поверхности, покрытые окисью магния, серноокислым барием, гипс, матовые поверхности; из мутных сред – молочное стекло, некоторые типы облаков; среди самосветящихся излучателей – абсолютно черное тело, порошкообразные люминофоры. Тем не менее, закон Ламберта находит широкое применение не только в теоретических работах как схема идеального рассеяния света, но и для приближенных фотометрических и светотехнических расчетов.

Отражение света – явление, заключающееся в том, что при падении света на границу раздела двух сред, в результате взаимодействия его с веществом второй среды появляется световая волна, распространяющейся от границы раздела «обратно» в первую среду. Несамосветящиеся тела становятся видимыми вследствие отражения света от их поверхностей.

Пространственное распределение интенсивности отражённого света определяется отношением размеров неровностей поверхности (границы раздела) к длине волны λ падающего излучения. Если неровности малы по сравнению с λ , имеет место зеркальное отражение света. Когда размеры неровностей соизмеримы с λ или превышают её (шероховатые поверхности, матовые поверхности) и расположение неровностей беспорядочно, отражение света диффузно. Возможно также смешанное отражение света, при котором часть падающего излучения отражается зеркально, а часть – диффузно. Если же неровности с размерами $\sim \lambda$ и более расположены закономерно (регулярно),

распределение отражённого света имеет особый характер, близкий к наблюдаемому при отражении света от дифракционной решётки.

Ламбертовское рассеяние – это такое рассеяние, которое происходит по всем направлениям, равномерно распределенным в пределах телесного угла 4π . Яркость такой поверхности постоянна по всем направлениям и не зависит от направления падающего света, то есть полностью подчиняется закону Ламберта.

Часть падающего потока Φ поглощается поверхностью, и рассеивается лишь поток:

$$\Phi' = \alpha\Phi.$$

Коэффициент α называется *альбедо* (от лат. albus - белый), и является характеристикой отражательных свойств поверхности какого-либо тела.

Альбедо α изменяется в пределах от нуля до единицы. У абсолютно черного тела $\alpha = 0$ (ничего не рассеивает, все поглощает), у абсолютно белого тела $\alpha = 1$ (все рассеивает, ничего не поглощает)

Альбедо некоторых поверхностей приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2.

Альбедо некоторых поверхностей

Материал	Альбедо, α
Очищенный мел	0,85-0,95
Белая бумага для рисования	0,7-0,8
Свежевыпавший снег	0,78
Песок	0,25-0,3
Черный бархат	0,01-0,002

Сферический ламбертовский излучатель. По определению у ламбертовского излучателя яркость постоянна и не зависит от направления (то есть не зависит от положения точки на поверхности и от угла наблюдения (рис. 11.2).

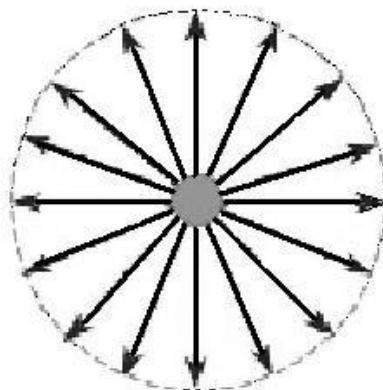


Рис. 11.2. Сферический ламбертовский излучатель

В случае плоского ламбертова излучателя каждая точка поверхности dS имеет яркость $L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dS_1 \cos \varepsilon_1}$, где $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ – сила света. Тогда $L = dI/dS = \text{const}$. В этом случае сила света постоянна во всех направлениях: $I = I_0 = \text{const}$.

Плоский ламбертовский излучатель. По определению у ламбертовского излучателя яркость постоянна и не зависит от направления (то есть не зависит от положения точки на поверхности и от угла наблюдения. В случае плоского ламбертова излучателя (рис. 11.3)

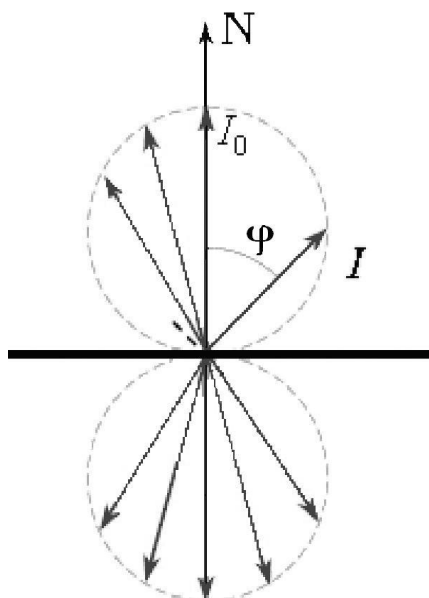


Рис. 11.3. Излучение плоского ламбертовского излучателя.

каждая точка поверхности dS имеет яркость $L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dS_1 \cos \epsilon_1}$, где $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ – сила света,

тогда $L = \frac{dI}{dS \cos \varphi}$. А поскольку яркость одинакова, то яркость в перпендикулярном

направлении равна яркости в направлении, составляющем угол φ с нормалью к

поверхности dS . То есть: $\frac{dI_0}{dS} = \frac{dI_\varphi}{dS \cos \varphi}$ или $dI_\varphi = dI_0 \cos \varphi$. Это и есть *закон Ламберта*

(*закон косинусов*): плоская поверхность, имеющая одинаковую яркость по всем направлениям, излучает свет, сила которого изменяется по закону косинуса:

$$I = I_0 \cos \varphi,$$

где I_0 – сила света в направлении нормали к поверхности, φ – угол между рассматриваемым направлением и нормалью.

Другими словами, площадь dS^* под которой видна излучающая поверхность dS есть: $dS^* = S \cos \varphi$ (рис. 11.4.)

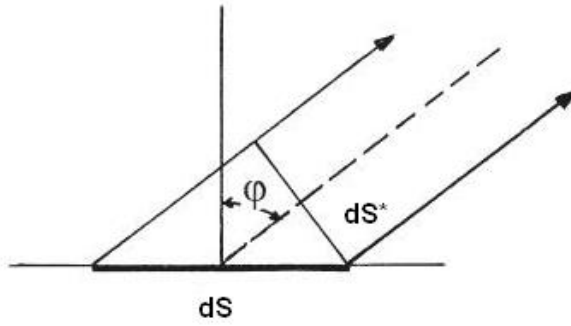


Рис. 11.4. Зависимость между силой света и углом наблюдения.

Описание экспериментальной установки

Общий вид установки представлен на рис. 11.5.

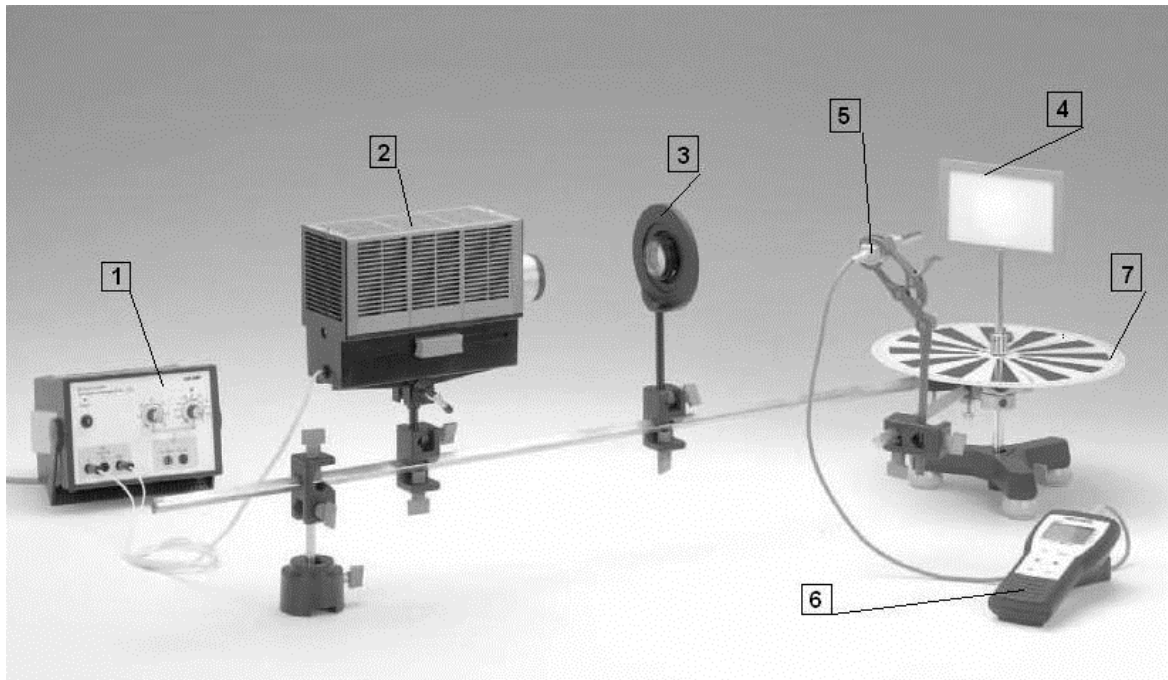


Рис.11.5. Общий вид установки для проверки закона Ламберта.

1- блок питания галогеновой лампы, 2 - осветительная галогеновая лампа в корпусе с конденсором, 3 - линза в держателе, 4 - сульфидо-цинковый экран, 5-измерительная головка люксметра, 6-измерительный модуль люксметра, 7 - диск с градуировкой.

На главном рельсе расположена галогеновая лампа 1 в корпусе. Свет от нее, с помощью линзы 3 формирует пятно на люминесцентном экране 4. Экран крепится в центре поворотного устройства оснащенного угловой шкалой 7, при повороте которой положение экрана не меняется. Из-за неровностей поверхности экран из цинкового сульфида предоставляет собой идеальную диффузную отражательную поверхность (источник Ламберта). Измерительная головка люксметра 6 крепится с помощью универсального зажима к поворотному устройству.

Расстояние между компонентами установки показаны на рис. 11.6.

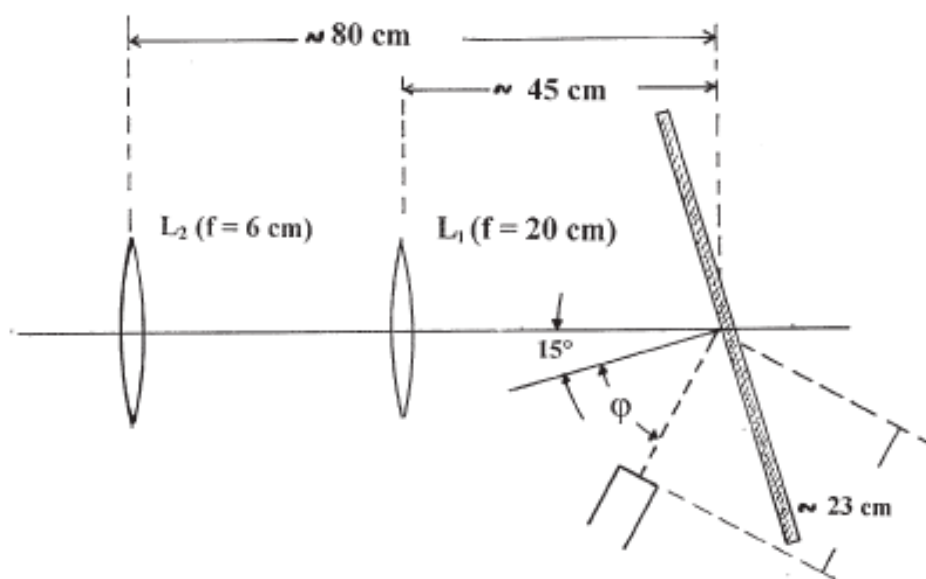


Рис. 11.6. Оптическая схема положения компонент установки

Таблица 11.3.

Название прибора	Пределы измерений	Число делений	Цена деления	Класс точности	Абсолютная приборная погрешность
Измерительный модуль люксметра					

Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с ее устройством и принципом действия.

Следует избегать попадания прямого света от галогеновой лампы в глаза.

1. Перемещая линзу L_1 , установить пятно на экране диаметром приблизительно 6 см. Экран надо повернуть так, чтобы перпендикуляр к его поверхности образовывал угол 15° с оптической осью. Люксметр надо направить к центру круга.

2. Перед выполнением основных измерений следует измерить интенсивность люминесценции экрана от внешнего излучения, не связанного с излучением лампы. Интенсивность люминесценции измеряется с угловым шагом 5° - 10° , при фиксированном положении экрана и выключенной лампе. Полученные результаты необходимо учитывать при проведении основных измерений.

3. После включения лампы проводится измерение светимости поверхности экрана освещенного галогеновой лампой при разных углах наблюдения. Причем углы наблюдения должны быть те же, что и при проведении измерений фонового излучения по п. 2 данного раздела.

Обработка результатов эксперимента

Видимый свет взаимодействует с диффузной отражающей поверхностью. Светимость этой поверхности определяется как функция угла наблюдения.

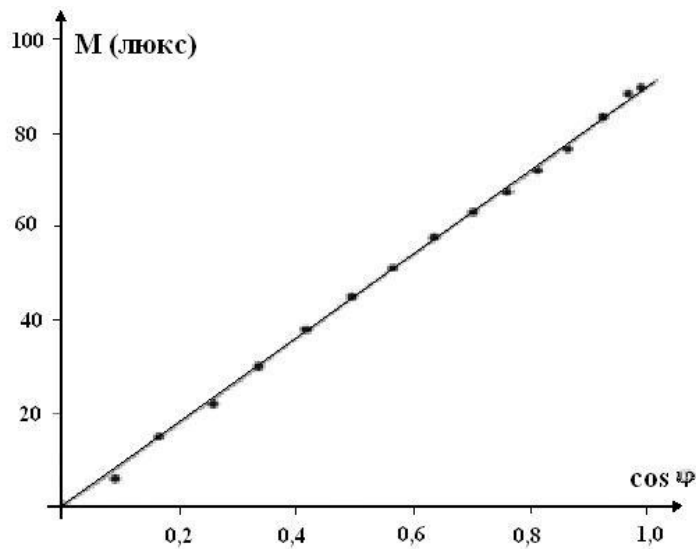


Рис. 11.7. Светимость излучения как функция $\cos \varphi$.

Согласно закону Ламберта сила света люминесценции пропорциональна $\cos \varphi$. Этот закон также применим для светимости, которая может быть определена посредством люксметра (рис. 11.7) – светимость, как функция $\cos \varphi$ есть линейная функция. Линейность полученных результатов – есть проверка закона Ламберта. Полученные результаты можно представить в полярных координатах. При этом величина светимости откладывается как длина радиус вектора. Если величины светимости представить как векторы интенсивности в полярной системе координат с углом $\varphi^* = 90^\circ - \varphi$ (рис. 11.8), то концы векторов будут расположены на круге с координатами центра $x = 0$; $y = R/2$. Преобразование к полярным координатам $x = \rho \cos \varphi^*$ и $y = \rho \sin \varphi^*$ дает $\rho = 2R \sin \varphi^*$, и с $\varphi^* = 90^\circ - \varphi$ приводит к зависимости $\rho = 2R \cos \varphi$.

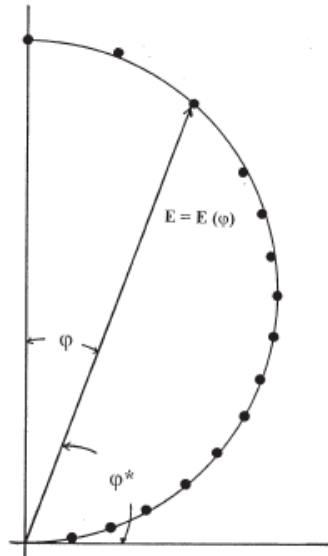


Рис. 11.8. Светимость как функция φ^* в полярных координатах.

Результаты измерений следует занести в табл. 11.4.

Точность измерения угла $\Delta\varphi$ составляет $0,5^\circ$. Относительная погрешность измерения светимости $\Delta M/M$ составляет $0,5\%$. Из этого соотношения можно найти ΔM . Эти данные необходимо использовать при построении экспериментального графика.

Таблица 11.4.

Результаты измерений

Угол наблюдения φ^* , град	$\cos\varphi^*$	Светимость при выключенной лампе M , люкс	Светимость при включенной лампе M^* , люкс	$M^* - M$, люкс

Библиографический список

а) основной

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики: учебник для вузов. В 3 т. Т 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. / И. В. Савельев. – СПб.: Лань, 2006. – С. 327–332.

б) дополнительный

2. *Капуткин Д.Е.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ: учебное пособие. / Д.Е. Капуткин, А.Г. Шустиков. – М.: МИСиС, 2007. – 108 с.

Контрольные вопросы

1. Какие основные фотометрические величины и их единицы?
2. Какие источники называют ламбертовскими?
3. Как формулируется закон Ламберта?
4. С помощью какой оптической схемы проверяется закон Ламберта?
5. Как выглядит в декартовых координатах светимость как функция φ^* ?