

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Кафедра «Светотехника»

*О.П. Меламед*

**СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Часть 1

**ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ СВЕТА**

*Учебное электронное издание*

для студентов, обучающихся по направлению  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

**ISBN 978-5-7046-2780-7**  
**ISBN 978-5-7046-2781-4 (Ч. 1)**

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

УДК 535  
ББК 22.34  
М 321

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ», в качестве учебного издания*

Рецензенты: докт. техн. наук, проф. А.А. Григорьев;  
канд. физ.-мат. наук, М.В. Рыжков

Меламед, О.П.

М 321 Световые измерения: В 4 ч. Ч. 1. Измерение силы света  
[Электронный ресурс] / О.П. Меламед. – Электрон. дан. – М.: Издательство  
МЭИ, 2023. – 1 электрон. опт. диск (DVD-R).

Рассмотрены основные понятия фотометрии и положения в области стандартизации измерений в фотометрии, методы измерения световых величин.

Приведено описание основного фотометрического оборудования и стандартные способы представления фотометрических данных.

Основное назначение учебного электронного издания – обеспечить целенаправленную подготовку к проведению световых измерений, помочь студентам в усвоении основ фотометрии, научить их проводить фотометрические измерения.

Для студентов, обучающихся по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

### **Минимальные системные требования:**

Тип ЭВМ: ПК на базе Pentium IV и выше.

ОС: Windows XP и выше.

Веб-браузер: Google Chrome, Internet Explorer.

**ISBN 978-5-7046-2780-7**

**ISBN 978-5-7046-2781-4 (Ч. 1)**

© Национальный исследовательский университет МЭИ, 2023

Для навигации по разделам учебного пособия используются гиперссылки, указанные в оглавлении.

Для просмотра видео в соответствующих разделах пособия даны ссылки для запуска внешнего содержимого.

*Редактор Т.А. Феокистова*

---

Дата подписания – 24.01.2023

Объём издания – 11,5 Мбайт.

Продолжительность видеофрагментов – 5 мин.

Тираж – 10 электронных оптических дисков DVD-R

Издательство МЭИ  
111250, Москва, Красноказарменная, д. 14  
[izdatmpei@gmail.com](mailto:izdatmpei@gmail.com)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b><u>1. Основные определения</u></b> .....	5
<u>Диапазон оптического излучения. Поток излучения</u> .....	5
<u>Световые величины. Глаз как приемник излучения</u> .....	6
<u>Точечный источник. Закон квадратов расстояний</u> .....	11
<u>Фотометрическое тело</u> .....	12
<b><u>2. Виды измерений в светотехнике</u></b> .....	13
<b><u>2.1. Визуальные измерения. Конструкция зрительного фотометра</u></b> .....	14
<u>Визуальные измерения силы света</u> .....	20
<u>Метод непосредственного сравнения</u> .....	20
<u>Метод замещения</u> .....	22
<u>Точность визуальных измерений и основные источники погрешности</u> .....	23
<b><u>2.2. Объективные методы измерения</u></b> .....	25
<u>Общий подход при измерении световых величин объективными методами</u> .....	25
<u>Основные типы приемников излучения, используемых для фотометрических измерений</u> .....	26
<u>Фотодиод</u> .....	26
<u>Основные характеристики приемника излучения и требования к ним</u> .....	28
<u>Метод пропорциональных отклонений</u> .....	31
<u>Равносигнальный метод</u> .....	33
<u>Телецентрический метод измерения силы света</u> .....	34
<u>Матричные приемники излучения</u> .....	36
<u>Системы с расширенным динамическим диапазоном</u> .....	41
<u>Схемы измерения силы света с помощью матричного приемника излучения</u> .....	43
<u>Основные источники погрешности при объективном измерении силы света</u> .....	46
<b><u>3. Представление фотометрических данных</u></b> .....	47
<b><u>4. Распределительные фотометры</u></b> .....	49
<b><u>5. Стандартизация фотометрических измерений</u></b> .....	53
<u>Государственные поверочные схемы и эталоны для фотометрии</u> .....	53
<u>Образцовые и рабочие лампы для измерения силы света</u> .....	55

# 1. Основные определения

## Диапазон оптического излучения. Поток излучения

Одним из способов количественного описания излучения является представление в виде потока фотонов, распределенных по направлениям в пространстве (так называемое лучевое приближение), и характеризующееся мощностью (испускаемой, передаваемой или получаемой) – потоком излучения ( $\Phi_e$ , [Вт]).

Особенностью излучения помимо мощности является распределение по длинам волн, которое можно характеризовать спектральной плотностью потока излучения ( $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ ):

$$\Phi_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}, \quad (1)$$

т.е. потоком излучения в пределах диапазона длин волн  $d\lambda$ , отнесенной к величине этого спектрального диапазона.

Под оптическим излучением принято понимать диапазон длин волн от примерно 100 нм (соответствует вакуумному УФ излучению) до примерно 10 мкм (дальнее ИК излучение), рис. 1.

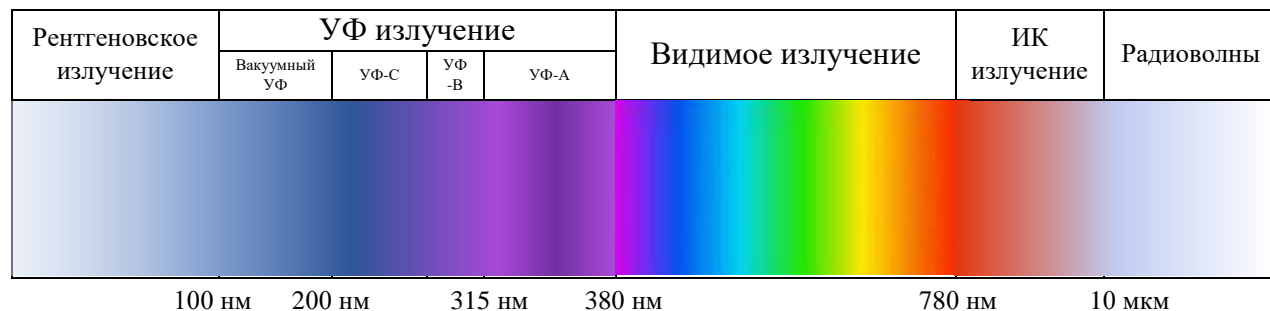


Рис. 1. Диапазон длин волн оптического излучения

Таким образом, если известно распределение излучения по спектру  $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ , можно записать формулу для расчета полного энергетического потока этого излучения, которая непосредственно следует из формулы (1):

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива для излучения с непрерывным спектром, если излучение имеет линейчатый спектр, то формула (2) преобразуется к виду:

$$\Phi_e = \sum_i \Phi_{e,\lambda_i}, \quad (3)$$

где  $\Phi_{e,\lambda_i}$  – поток излучения линии с длиной волны  $\lambda_i$ .

### Световые величины. Глаз как приемник излучения

Для большинства практических задач фотометрии необходимо оценивать энергию излучения с точки зрения ее зрительного восприятия, т.е. воздействия на глаз человека – для этого вводится понятие световой величины.

Световые величины – это особый способ описания характеристик излучения, так как они являются физико-психо-физиологической величиной, т.е. количественной оценкой физиологического процесса зрительного восприятия – зрительного ощущения.

Глаз как приемник излучения обладает двумя основными особенностями, прежде всего, его чувствительность ограничена так называемым видимым диапазоном излучения (примерно от 380 до 780 нм, см. рис. 1), кроме того, чувствительность глаза к различным длинам волн внутри видимого диапазона различна (см. рис. 2).

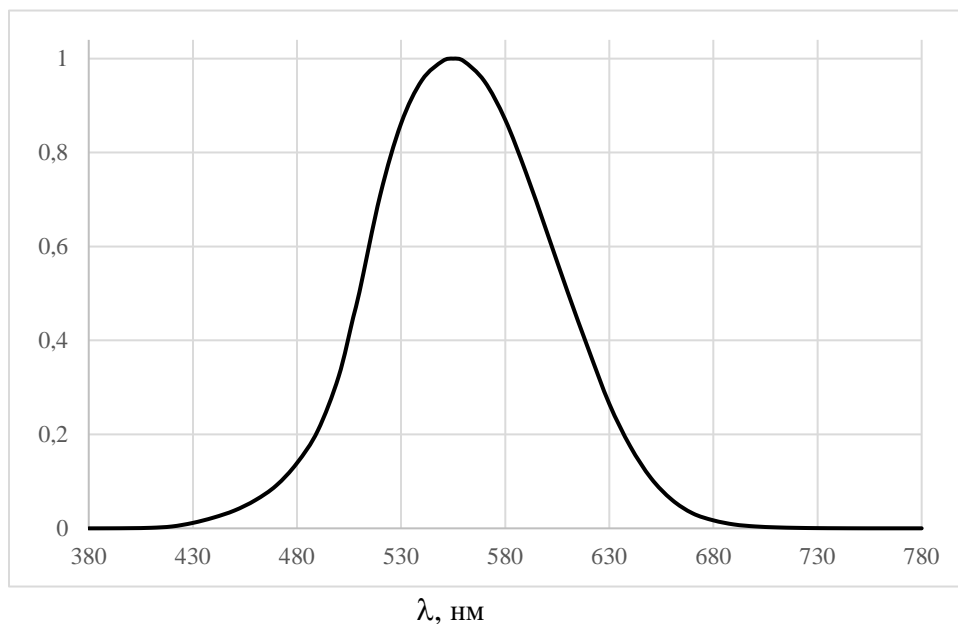


Рис. 2. Относительная спектральная световая эффективность излучения  $V(\lambda)$

Таким образом, чтобы количественно оценить световую величину, необходимо ограничиться только видимым диапазоном оптического излучения (рис. 1), поэтому в формуле (2) необходимо указать пределы интегрирования, соответствующие видимой области излучения (380 – 780 нм), а также учесть тот факт, что восприимчивость глаза к излучению с различными длинами волн – различна и характеризуется функцией относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$  с максимальным значением на

длине волны 555 нм (рис. 2) и для заданной спектральной плотности излучения световой поток будет определяться как:

$$\Phi_V = K \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где  $K = 683$  лм/Вт – коэффициент, позволяющий перейти от единиц измерения энергетического потока (Вт) к единицам светового потока (лм).

Световые величины имеют особенное значение для практических задач светотехники, поскольку подавляющее большинство задач нормирования и расчета световых приборов, осветительных установок, характеристик светотехнических материалов и т.д. связано именно с производимым зрительным ощущением (восприятием человеческого глаза), поэтому они выделены в отдельную систему эффективных величин и единиц, т.е. для световых величин введены собственные единицы измерения: люмены (лм) – для светового потока, люксы (лк) – для освещенности и канделы (кд) – для силы света).

### Примечание

Поскольку в случае световых величин речь идет именно о субъективном зрительном восприятии (ощущении) света, а характеристики зрения для различных наблюдателей различны, то был принят ряд допущений для целей единообразия и стандартизации как методов измерений, так и представления, сравнения и интерпретации полученных результатов:

1) значения относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$  для условий дневного зрения были приняты МКО в 1931 г. и представляют собой статистические данные по множеству наблюдателей для устранения влияния индивидуальных особенностей (в РФ (и странах, входящих в Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации) значения функции относительной спектральной световой эффективности утверждены межгосударственным стандартом ГОСТ 8.332—2013 «Световые измерения»).

В 1951 г. МКО были утверждены значения кривой чувствительности глаза в условиях ночного зрения  $V'(\lambda)$ , вид которой обусловлен эффектом Пуркинье (рис. 3) и в целом, важно отметить, что при реальных наблюдениях и организации визуальных измерений может наблюдаться существенный разброс значения чувствительности от наблюдателя к наблюдателю.

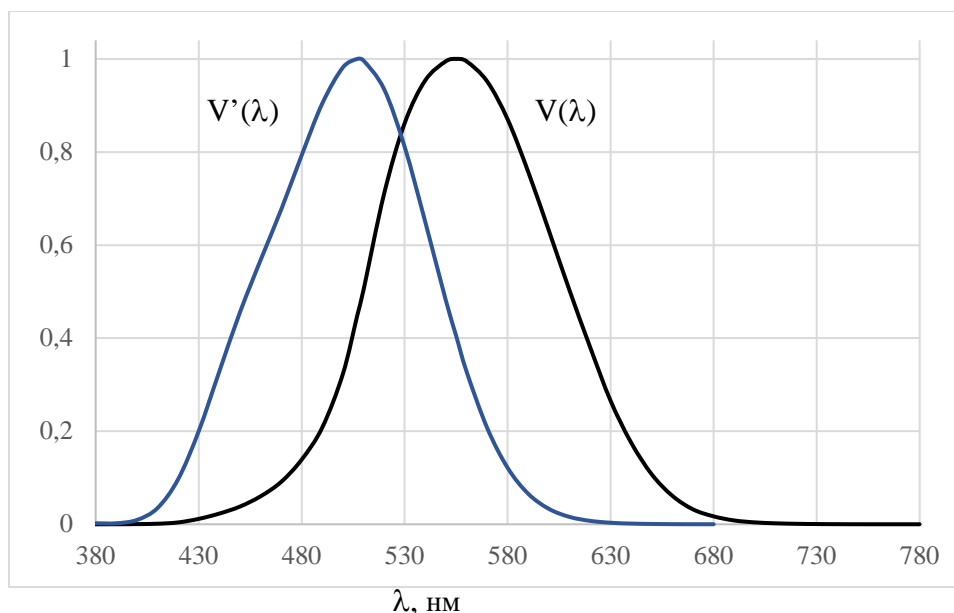


Рис. 3. Кривые, соответствующие относительной спектральной чувствительности глаза стандартного наблюдателя в условиях дневного  $V(\lambda)$  и ночного  $V'(\lambda)$  зрения.

Кроме того, необходимо отметить, что на рис. 3 показаны именно относительные значения чувствительности, так как абсолютные значения чувствительности колбочкового световоспринимающего аппарата (условия дневного зрения) и палочкового световоспринимающего аппарата (условия ночного зрения) значительно различаются. В условиях сумеречного зрения (промежуточный уровень между условиями ночного и дневного зрения) одновременно задействованы и колбочковая, и палочковая световоспринимающие системы, спектральная чувствительность глаза будет определяться не только длиной волны, но и яркостью наблюдаемых объектов (яркостью адаптации).

2) диапазон видимой области (380 – 780 нм) задан условно, в реальности существует разброс между наблюдателями и диапазон может быть несколько больше или меньше указанного, но это не имеет принципиального значения, так как чувствительность глаза на границах относительно невелика;

3) фактические значения чувствительности глаза имеют разброс от наблюдателя к наблюдателю, изменяются с возрастом, зависят от размера поля зрения, а также других факторов (яркости окружающего фона, времени наблюдения и т.п.), также необходимо учитывать эффекты, связанные с инерцией зрения и переадаптацией, имеющими место в реальных условиях наблюдения, например, когда при работе в офисе наблюдатель постоянно переводит взгляд с экрана монитора, на лежащий перед ним документ и т.п.

Таким образом, важно отметить, что, говоря об определении световой величины в рамках принятых допущений по формуле (3), определяется не реальная величина, соответствующая величине зрительного ощущения каждого конкретного наблюдателя, а некое стандартизованное значение, принятое в рамках модели, утвержденной в стандартах, однако этого достаточно с практической точки зрения, учитывая, что типичная погрешность фотометрических измерений составляет от 5 до 20%, а также эти допущения обеспечивают единый подход к измерению и оценке световых величин.



Важно отметить, что ощущение света определяется именно мгновенным значением светового потока в единицу времени – мощностью световой энергии, условно полагая его постоянство (т.е. не учитывается изменение за время одного периода колебаний, соответствующего длине волны излучения, поскольку для видимой области это время во много раз меньше, чем постоянная времени человеческого глаза).

Световой поток является основной характеристикой излучения и основной величиной для формирования остальной базы понятий в фотометрии. Именно на его основании, как базовой величины, вводятся понятия других световых величин: освещенности, силы света, светимости и яркости.

Основные понятия и термины фотометрии в РФ (и странах, входящих в Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации) приведены в межгосударственном стандарте ГОСТ 8.654-2016 «Фотометрия. Термины и определения».

Для решения практических задач, например, расчета осветительных установок, необходимо знать не только абсолютную величину светового потока от светового прибора, но и то каким образом он распределен в пространстве, поскольку чаще всего излучение от источника света распространяется неравномерно по различным направлениям в пространстве.

Обычно для представления распределения излучения от светового прибора задают точку, называемую фотометрическим центром, которую рассматривают в качестве начала координат, относительно которой ведут отсчет расстояния от светового прибора и направления распространения излучения в пространстве – обычно за эту точку условно принимают геометрический центр источника излучения, в общем случае, положение фотометрического центра зависит от количества и взаимного расположения источников света в световом приборе, а также от свойств элементов его оптической системы.

Таким образом, можно считать, что для представления распределения излучения в пространстве, реальный световой прибор условно заменяется точечным источником света, расположенным в его фотометрическом центре.

Далее необходимо выбрать направление, проходящее через фотометрический центр, которое будет принято за начало отсчета (в практических задачах фотометрии в качестве такого направления принято использовать фотометрическую (оптическую) ось светового прибора – направление перпендикулярно освещаемой поверхности (в том числе

и для представления фотометрических данных светильников в светотехнических каталогах, более подробно о представлении фотометрических данных будет рассказано в разделе «Представление фотометрических данных»).

Для описания распространения световой энергии в данном направлении используют приближение лучевой оптики (т.е. излучение представляется в виде лучей, исходящих из точки фотометрического центра источника и имеющих определенную энергию, зависящую от количества фотонов, распространяющихся в данном направлении) и представляют распространение излучения в виде конической поверхности (см. рис. 4), образованной лучами, исходящими из источника излучения (с вершиной в источнике излучения), из такого определения понятно, что световой поток, заключенный внутри такой конической поверхности (переносимый лучами в данном направлении) будет одинаков на любом расстоянии от источника (рис.), так как в предположении однородности среды свет распространяется прямолинейно и с учетом того, что пренебрегают поглощением и рассеянием излучения средой, в которой оно распространяется.

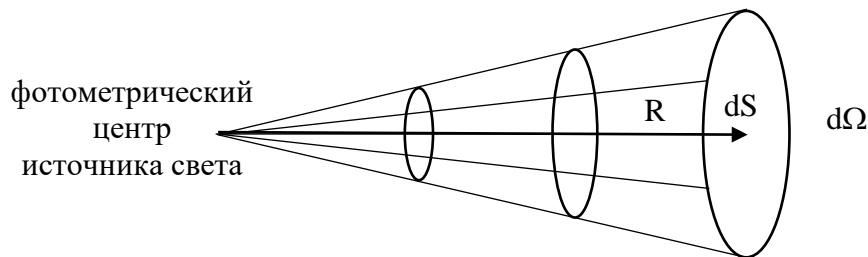


Рис. 4. К определению телесного угла

Пространство, заключенное внутри такой конической поверхности, обозначается  $d\Omega$  и носит название телесного угла и измеряется в стерadianах ([ср]) и определяется как отношение площади части сферы ( $dS$ ), вырезаемой этой конической поверхностью к квадрату радиуса этой сферы  $R$ :

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2}. \quad (4)$$

Когда рассматривают распределение излучения в пространстве, выбирают направление от источника света, определяемое полярным и азимутальным углами ( $\theta, \phi$ ) (отсчитываются от направления, выбранного за начало отсчета), заключенное внутри элементарного телесного угла ( $d\Omega$ ), внутри которого заключен определенный световой

поток ( $d\Phi$ , здесь и далее речь пойдет только о световых величинах, поэтому индекс «V» опускаем), отношение этого потока к величине телесного угла, содержащего выбранное направление ( $\theta, \varphi$ ), называется силой света и измеряется в канделах ([кд]):

$$I(\theta, \varphi) = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (5)$$

### Примечание

Сила света (наряду с длиной, массой, временем, силой тока, термодинамической температурой и количеством вещества) является основой Международной системы величин, а кандела, таким образом, – основной единицей Международной системой единиц (СИ).

Из определения телесного угла и силы света следует, что практическое использование понятия силы света (для расчета освещения) возможно в том случае, если источник можно «разместить» в вершине телесного угла (т.е. пренебречь реальной конфигурацией источника и рассматривать лишь его фотометрический центр), такой источник носит название точечного. При этом важно отметить, что само понятие силы света источника сформулировано вне зависимости от расстояния до него и определяется только свойствами самого источника, а именно, величиной светового потока, распространяющегося от него в разных направлениях (далее данный вопрос будет рассмотрен более подробно в разделе «Телецентрический метод измерения силы света»).

Действие излучения на приемник излучения, ориентированный определенным образом (задается направлением ( $\theta, \varphi$ )) относительно источника излучения, характеризуется поверхностной плотностью части светового потока от источника, попадающей на приемную поверхность приемника излучения, и носит название освещенности:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}. \quad (6)$$

### Точечный источник. Закон квадратов расстояний

Для точечных источников выполняется так называемый закон квадратов расстояний, связывающий освещенность  $E$ , создаваемую точечным источником с осевой силой света  $I$  в точке, расположенной на оптической оси на расстоянии  $l$  от него, что следует непосредственно из определения телесного угла и допущения о постоянстве силы света в пределах этого телесного угла (что возможно, если угол выбран достаточно малым

или изменение силы света в пределах выбранного телесного угла невелико). Таким образом для осевой силы света точечного источника выполняется равенство:

$$I = El^2. \quad (7)$$

### Примечание

1. Нужно отметить, что в случае протяженного источника излучения, такого, как например, световое окно или небосвод выделить точку, которую можно считать фотометрическим центром протяженного источника излучения не представляется возможным, т.е. такой источник излучения не может считаться точечным и применять закон квадратов расстояния для расчета освещенности от него нельзя. Метод определения силы света для протяженных источников будет рассмотрен в разделе «Телецентрический метод измерения силы света».

2. Зачастую также представляют сложности критерии выбора расстояния, на котором могут считаться точечным световые приборы с концентрирующей оптикой (например, прожекторного типа). В этом случае, чтобы определить возможность применения к таким световым приборам закона квадратов расстояния, необходимо измерить произведение  $El^2$  на нескольких расстояниях от светового прибора, начиная с некоторого расстояния  $l_\phi$  (называемое расстоянием фотометрирования) это произведение будет оставаться неизменным (см. рис. 5) – это означает, согласно (7), что начиная с этого расстояния данный световой прибор может считаться точечным источником излучения и для расчетов освещенности от него можно применять закон квадратов расстояния. Если расстояние до светового прибора меньше, чем  $l_\phi$ , то источник нельзя считать точечным и нельзя применять закон квадратов расстояний для расчета его характеристик.

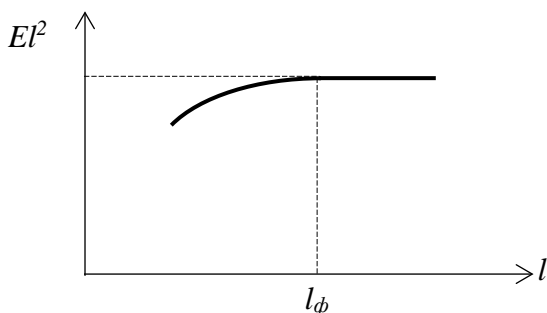


Рис. 5. К определению расстояния фотометрирования

3. Критерий того, какую величину изменения силы света (или любой другой величины) можно считать достаточно малой с практической точки зрения, можно получить из следующих соображений. Допущение о неизменности величины предполагает на практике такие изменения, которыми в данных условиях можно пренебречь. Это может следовать как из практических соображений о допустимой погрешности измерений, так и из ограничений, накладываемых остальными источниками принципиально неисключаемых погрешностей (чаще всего, это погрешности аттестации эталонов или калибровки средств измерения).

## Фотометрическое тело

Поскольку сила света имеет определенное значение в заданном направлении, то ее можно представить в виде вектора с началом в точке, соответствующей точечному источнику излучения и с длиной, равной величине силы света в данном направлении (однако стоит отметить, что сила света – скалярная величина и к ней неприменимы правила для векторных величин, в данном случае понятие радиус-вектора удобно использовать лишь в том смысле, что рассматривается сила света в определенном направлении (направление в пространстве, угол между рассматриваемым направлением и направлением, выбранным за начало отсчета (чаще всего нормаль к светящей поверхности), которая имеет определенное значение (модуль радиус-вектора)). Если теперь соединить концы всех таких векторов, то получится трехмерная поверхность, называемая фотометрическим телом и характеризующая распределение силы света в пространстве (см. рис. 6).

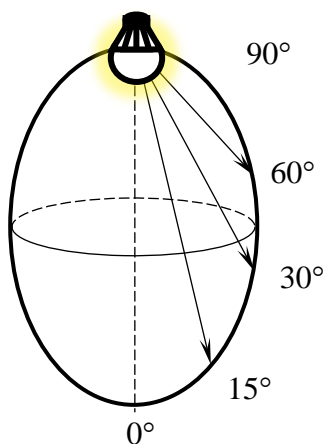


Рис. 6. Фотометрическое тело

Обычно для описания светотехнических характеристик световых приборов используют кривые силы света (КСС) – сечение фотометрического тела (зависимость силы света от направления излучения) в главных плоскостях (продольная и поперечная плоскости, проходящие через фотометрическую ось светового прибора).

## 2. Виды измерений в светотехнике

Методы измерения, используемые в фотометрии, можно разделить на два вида:

- 1) визуальные – методы, основанные на возможностях зрительной системы человека;
- 2) объективные – методы, основанные на использовании фотоэлектрических приемников излучения.

## 2.1. Визуальные измерения. Конструкция зрительного фотометра

Зрительное ощущение, возникающее под действием излучения определяется:

- 1) яркостью светящейся поверхности;
- 2) свойствами глаза (физиологические свойства такие как глубина, показатель преломления стекловидного тела, величина зрачка и т.п.)

В рамках данного пособия мы не будем подробно останавливаться на физиологических свойствах зрения, поскольку основной задачей является изложить методы и подходы к измерению световых величин, однако, при проведении конкретных измерений безусловно необходимо принимать во внимание субъективные свойства человеческого зрения, естественный разброс характеристик среди наблюдателей, а также различные эффекты органа зрения, влияющие на точность визуальных измерений (такие как адаптация, возникновение последовательных образов, инерция зрения и т.п.).

Важно отметить, что количественное значение световой величины (например, светового потока или силы света) не несет информации о воздействии излучения на глаз, оно связано со сравнением измеренной величины с величиной, принятой за единицу в данной системе величин и единиц. Так, например, если известно, что световой поток одного источника излучения в два раза выше, чем другого, то это не означает, что первый источник будет выглядеть для наблюдателя в два раза ярче.

Кроме этого, необходимо также учитывать, что зрительное ощущение пропорционально логарифму яркости. Этот (и ряд других – попадание излучения на одно и то же место сетчатки, угловой размер изображения, яркость фона (в идеале, должна быть равна 0), установившиеся условия зрения без переадаптации, постоянство зрительных стимулов) факт необходимо учитывать при определении субъективных погрешностей визуальных измерений.

Основой визуальных измерений является использование глаза для оценки яркости полей сравнения, создаваемых исследуемыми излучениями. Очевидно, что с помощью визуальных измерений невозможно провести непосредственную количественную оценку сравниваемых величин, можно лишь дать оценку, какое из полей сравнения выглядит более ярким, либо, что разница в яркостях на глаз неразличима. Здесь на первое место выходят вопросы понимания физиологии зрительного восприятия, т.е. то, каким образом

необходимо организовать визуальные измерения, чтобы обеспечить сравнение яркостей с наивысшей точностью.

Прежде всего, нужно отметить, что легче всего сделать вывод о различии (либо равенстве) яркостей, если поля сравнения непосредственно соприкасаются, а также находятся в центре поля зрения – именно эти принципы являются базовыми при построении визуального фотометра.

### **Примечание**

Как уже рассматривалось ранее, чувствительность глаза у разных наблюдателей может отличаться значительно и между собой, и от стандартизованного значения  $V(\lambda)$ , кроме того чувствительность глаза и у одного и того же человека не является постоянной и может меняться в зависимости от целого ряда причин: адаптации (изменения чувствительности в зависимости от уровня яркости поля зрения), угловых размеров поля зрения, мест сетчатки, на которые попадает изображение рассматриваемой поверхности, самочувствия, в том числе зрительного утомления в процессе измерения и т.д.

Таким образом конструкция визуального фотометра должна обеспечивать удобное и точное сравнение яркости двух полей сравнения, создаваемых эталонным и исследуемым излучением.

Для обеспечения максимальной точности визуальных измерений, необходимо обеспечить ряд условий:

- условия дневного зрения, т.е. уровень яркости полей сравнения должен обеспечивать оптимальные условия для работы колбочковой световоспринимающей системы (не менее  $4 - 10 \text{ кд/м}^2$ ), т.е. реализовывать воспроизведение чувствительности  $V(\lambda)$ , что требуется, исходя из самого понятия световой величины;
- расположение изображения границы полей сравнения на фовеоле, т.е. в зоне на сетчатке с максимальным оптическим разрешением;
- оптимальная яркость полей, окружающих поля сравнения (она должна быть ниже, чем яркость сравниваемых полей сравнения, значение окружающей яркости должно быть подобрано так, чтобы не вызывать переадаптацию, влияя тем самым на пороговые характеристики чувствительности органа зрения) и возможность плавного регулирования яркостей полей сравнения для установления их тождества;
- совпадение полей сравнения по цветности (даже при различии в спектральном составе излучения);

**Примечание:** при значительном отличии цветностей полей сравнения задача уравнивания яркостей становится достаточно сложной и практически не может быть выполнена с высокой точностью, есть различные приемы выполнения таких измерений, но, в основном, в таких случаях применяются методы объективной фотометрии;

- размер поля зрения так же должен примерно соответствовать размеру желтого пятна (около  $2^\circ$ , в некоторых случаях до  $4 - 6^\circ$ ).

Исходя из данных требований к устройству визуального фотометра, рассмотрим пример конструкции визуального фотометра.

Простейшая конструкция визуального фотометра может представлять собой призму из светорассеивающего материала (призма Ритчи) (например, гипса), грани которой равномерно освещаются исследуемым и эталонным излучением. Поле зрения наблюдателя размещается на ребре этой призмы (см. рис. 7) и перемещением исследуемого и эталонного источников относительно призмы (регулирование яркости полей сравнения за счёт изменения расстояния) наблюдатель добивается визуального совпадения яркости полей сравнения.

Необходимо, чтобы материал, из которого выполняется светорассеивающая пластина, был неселективным, т.е. его коэффициент отражения не должен зависеть от длины волны излучения, чтобы при отражении не изменялся спектральный состав излучения. Вторым важным требованием к материалу пластины является равномерное отражение (матовая поверхность) – так, чтобы яркость отраженного излучения была одинакова во всех направлениях и не зависела от условий ее освещения и наблюдения.

Важно отметить здесь и далее, что когда мы говорим о соблюдении некоторых условий (воспроизведение необходимой чувствительности, неселективности материалов и т.п.), то нужно понимать, что идеальное совпадение с требованиями обеспечить невозможно, критерий, которым нужно руководствоваться, когда мы говорим о соблюдении тех или иных требований, это сравнение с требуемой погрешностью (точностью) измерений, либо с величиной максимальной неисклЮчимой погрешности



измерения (чаще всего это величина погрешности аттестации или калибровки образцовых средств измерений).

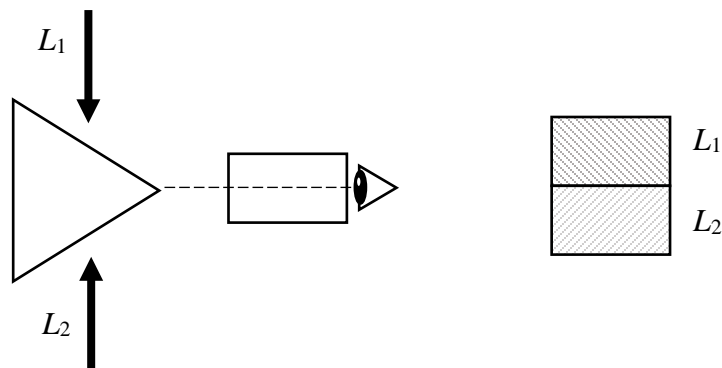


Рис. 7. Простейшая схема визуальных измерений

В конструкции визуального фотометра на основе рассеивающей призмы уравнивание яркости наблюдателем производится на основании разницы яркостей по обе стороны от ребра призмы, являющегося границей между смежными полями сравнения. Однако такая простейшая конструкция хоть и наглядна для понимания принципов визуальных измерений, не лишена недостатков, так как в ней сложно обеспечить равномерное освещение граней призмы и удобство наблюдения полей сравнения (формирование оптимального размера поля сравнения, исключения внешних засветок и т.п.)

Поэтому, чаще для визуальных измерений используют специальные зрительные фотометры, оборудованные специальными приспособлениями – зрительными трубками (визирными устройствами), с помощью которых наблюдатель оценивает яркость полей сравнения. Кроме того, очень важно обеспечить неподвижность глаза во время измерений, так как изменение его положения может приводить к виньетированию световых пучков, идущих от полей сравнения, к отклонению линии наблюдения от оптической оси, а, следовательно, изменению наблюдаемой яркости полей сравнения вследствие свойств оптической системы визирного устройства. Поскольку освещенность сетчатки зависит от яркости поля зрения и площади зрачка, а размер зрачка, в свою очередь, определяется яркостью адаптации (зрачковый рефлекс), то размер отверстия зрительной трубки, через которую происходит наблюдение полей сравнения подбирают так, чтобы он был сопоставим с размером зрачка в условиях дневного зрения (около 2 мм в диаметре) или немного больше, чтобы исключить виньетирование (срезание, затенение) световых

пучков, которое может привести к неправильному определению равенства яркости полей сравнения.

Ряд эффектов, связанных с физиологией зрения (последовательные образы, усталость органа зрения и т.п.) ограничивают точность визуальных измерений, особенно если речь идёт о длительных измерениях. Чтобы повысить точность визуальных измерений, используют более сложную конструкцию визуального фотометра с использованием фотометрического кубика (Люммера-Бродхуна), создающую более сложную конфигурацию полей сравнения, поскольку точность определения различия в яркости значительно выше для непосредственно примыкающих полей, т.е. на их границе.

Фотометрический кубик представляет собой конструкцию из двух призм полного внутреннего отражения соприкасающихся диагональным плоскостями (см. рис. 8). В месте соприкосновения призм обеспечивается оптический контакт, поэтому излучение в этой части свободно проходит. На гранях призмы, контактирующих с воздухом, излучение претерпевает полное внутреннее отражение и лучи поворачиваются на  $90^\circ$ . Таким образом лучи от двух источников, расположенных под углом  $90^\circ$  после прохождения фотометрического кубика идут параллельно и создают поля сравнения, лежащие в одной плоскости.

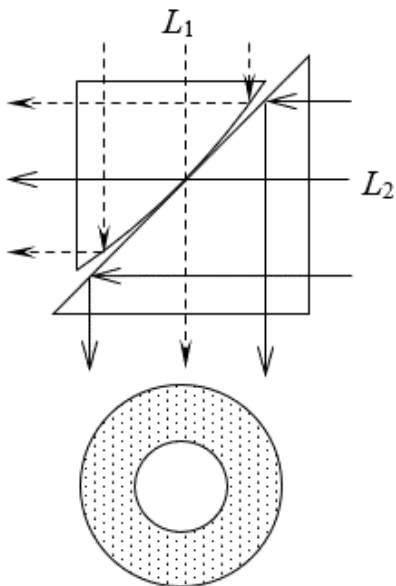


Рис. 8. Получение полей сравнения двух яркостей ( $L_1$  и  $L_2$ ) с помощью фотометрического кубика

За счёт использования нейтральных светофильтров и создания полей сравнения более сложной формы (см. рис. 9), увеличивается периметр границы между полями сравнения, для которых необходимо визуально определить тождество яркости, что значительно повышает точность визуальных измерений, так как позволяет снизить погрешность визуальных измерений, связанную с неравномерностью свойств (чувствительности) сетчатки даже в средней ее части.

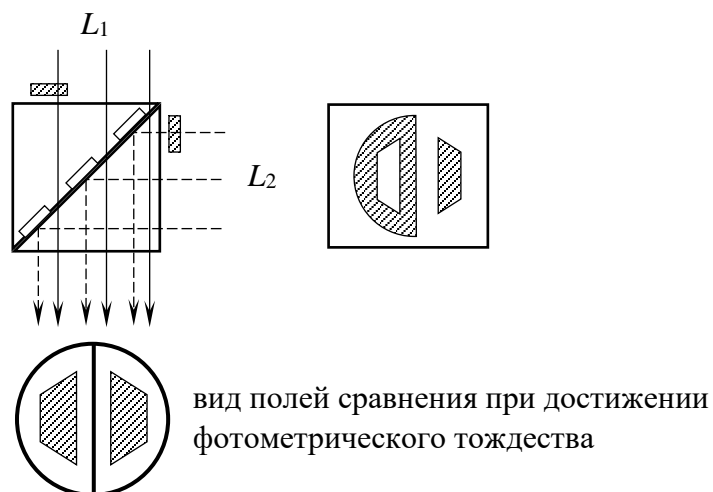


Рис. 9. Получение полей сравнения сложной формы для повышения точности визуальных измерений

На рис. 10 показан пример конструкции визуального фотометра. Два источника, освещают светорассеивающую пластину с противоположных сторон через отверстия в корпусе – входные апертуры, далее излучение отражается от светорассеивающей пластины каждого измерительного канала, после чего с помощью фотометрического кубика создаются поля сравнения с яркостью  $L_1$  и  $L_2$ , которые наблюдают через окуляр визирного устройства (зрительной трубки). Для устранения влияния рассеянного света все внутренние поверхности фотометрической головки покрыты черной матовой краской.

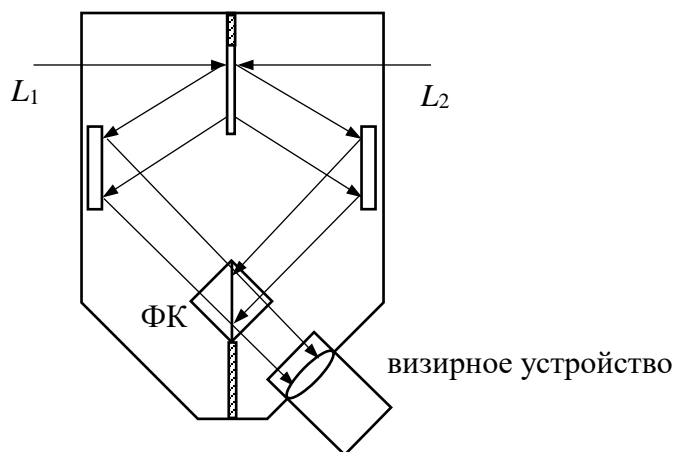


Рис. 10. Конструкция визуального фотометра

В конструкции фотометрической головки стремятся предусмотреть максимально одинаковые условия для получения обоих полей сравнения (прохождения излучений в двух измерительных каналах), поскольку это влияет на точность измерений, так как наблюдатель сравнивает яркости излучений, отраженных пластинами каждого из измерительных каналов и прошедших через фотометрический кубик.

Также в конструкции визуального фотометра должно быть предусмотрено удобное измерение истинного расстояния от плоскости светорассеивающей пластины фотометрической головки до источника излучения.

Дополнительно стоит отметить, что при наблюдении полей сравнения сквозь трубку окуляра с непрозрачными стенками, точность зрительных измерений увеличивается, так как при этом блокируется боковой свет, создающий рассеянный свет в глазу, накладывающийся на изображение рассматриваемой поверхности в середине сетчатки и, таким образом, снижающий контрастность изображения. Дополнительно также используют черные непрозрачные экраны на пути излучения для устранения рассеянного и отраженного излучения.

### **Визуальные измерения силы света**

Измерение силы света визуальным методом проводят на фотометрической скамье, поскольку она позволяет удобно располагать и перемещать элементы схемы, производить их юстировку (установку на одной оптической оси).

### **Метод непосредственного сравнения (сличение с эталоном)**

При измерении силы света методом непосредственного сравнения эталонный источник (с известной силой света  $I_0$ ) и исследуемый источник, силу света которого  $I_x$

необходимо определить, устанавливают с противоположных сторон от визуального фотометра (см. рис. 11).

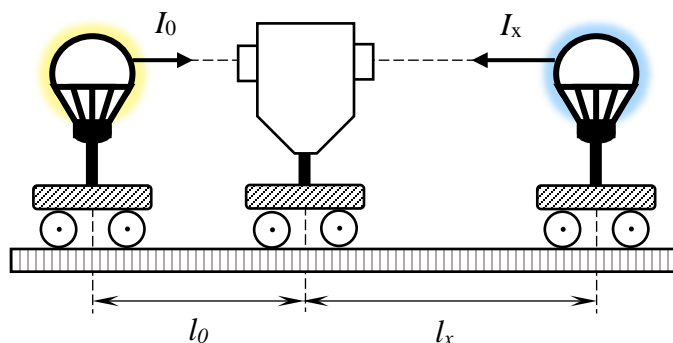


Рис. 11. Расположение элементов схемы (эталона, исследуемого источника и фотометрической головки) при измерении силы света методом непосредственного сравнения

Далее, перемещают фотометрическую головку до тех пор, пока не получат визуального тождества (т.е. совпадения) яркости полей сравнения, создаваемых эталонным и исследуемым источниками света. Визуальное тождество означает, что яркости, создаваемые эталонным источником, находящимся на расстоянии  $l_0$  от фотометрической головки  $L_0$  и исследуемым источником, находящимся на расстоянии  $l_x$  от фотометрической головки  $L_x$  совпадают, т.е.

$$L_0 = L_x. \quad (8)$$

В предположении, что измерительные каналы для излучения эталонной и исследуемой лампы идентичны, из (8) следует, что освещенности, создаваемые источниками света на светорассеивающей пластине так же будут одинаковы:

$$E_0 = E_x. \quad (9)$$

Если для источников света применим закон квадратов расстояния (т.е. их можно считать точечными), то (9) можно представить в виде:

$$I_0 l_0^2 = I_x l_x^2, \quad (10)$$

откуда искомую силу света  $I_x$  исследуемого источника излучения можно определить по формуле:

$$I_x = I_0 \left( \frac{l_x}{l_0} \right)^2. \quad (11)$$

Выражение (9) записано в предположении об одинаковых свойствах измерительных каналов фотометрической головки (т.е., как уже было сказано ранее, для случая, когда этими отличиями можно пренебречь). Если это допущение не выполняется с необходимой точностью, то можно провести две серии измерений, когда исследуемый и эталонный источник устанавливают поочередно с разных сторон от фотометрической головки (либо разворачивают фотометрическую головку на  $180^\circ$ ) или используют метод замещения.

### Метод замещения

В методе замещения и эталонный и исследуемый источник устанавливают так, чтобы их излучение проходило через один и тот же измерительный канал визуального фотометра, а для уравнивания их яркости используют дополнительный источник (лампу сравнения), который устанавливают на фиксированном расстоянии с противоположной стороны фотометрической головки (см. рис. 12). Расстояние между фотометрической головкой и лампой сравнения выбирают так, чтобы создаваемая ею яркость поля сравнения соответствовала условиям дневного зрения, а также в зависимости от диапазона силы света измеряемых источников.

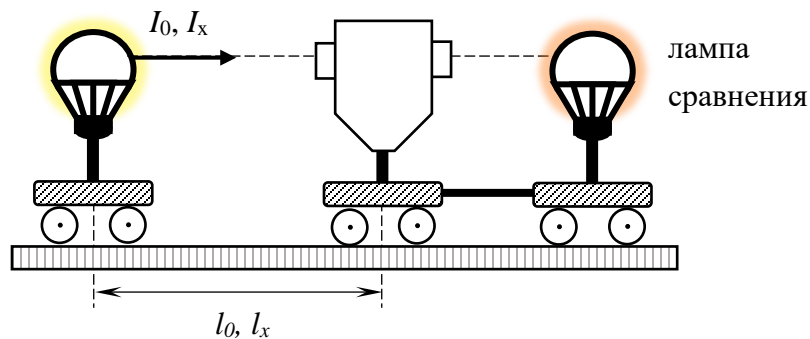


Рис. 12. Расположение элементов схемы (эталона, исследуемого источника, лампы сравнения и фотометрической головки) при измерении силы света методом замещения

Перемещением фотометрической головки и жестко скрепленной с ней лампы сравнения добиваются визуального уравнивания яркости поля сравнения, создаваемого лампой сравнения  $L_{\text{ср}}$  поочередно с эталонным и исследуемым источниками света и измеряют соответствующие фотометрическому тождеству расстояния  $l_0$  и  $l_x$  между эталонным или исследуемым источником и фотометрической головкой соответственно.

Таким образом, установление визуального равенства полей сравнения означает, что

$$L_{\text{ср}} = L_0 = L_x. \quad (12)$$

Откуда следует выражение (11) для расчета силы света исследуемого источника, но в данном случае точность измерений будет выше, поскольку излучение и эталонного, и исследуемого источника изменяются одинаково при прохождении одного и того же измерительного канала.

### **Точность визуальных измерений и основные источники погрешности**

Как отмечалось ранее, наибольшей точности сравнения яркости визуальным методом можно добиться при совпадении цветности полей сравнения, поэтому желательно подбирать эталонную лампу и лампу сравнения близкими по цветности к исследуемому источнику.

Также при визуальных измерениях необходимо учитывать следующие факторы, которые будут приводить к погрешности определения силы света:

- 1) методическая погрешность использования закона квадратов расстояний, величина которой будет зависеть от расстояния до источника излучения и его геометрии (формы и размеров);
- 2) субъективная погрешность наблюдателя, связанная с индивидуальными особенностями зрения и отличием чувствительности глаза от стандартизованных значений  $V(\lambda)$ ;
- 3) погрешность юстировки всех элементов измерительной схемы (несоосность фотометрических центров источников и фотометрической головки, отклонение расположения плоскостей и направляющих фотометрической скамьи от нормали и параллельности);
- 4) погрешность измерения расстояния от ламп до фотометрической головки;
- 5) погрешность аттестации эталона и воспроизведения паспортной величины силы света  $I_0$  из-за нестабильности как самого эталона, так и параметров электрического питания (кроме того, погрешность установки этих параметров – тока и/или напряжения в зависимости от используемых для их контроля средств измерения);
- 6) внешние факторы – отраженное и рассеянное излучение.

Часть этих погрешностей, например, методическая погрешность, погрешности аттестации эталонов и средств измерения, является систематической, т.е. ее можно определить либо из известных закономерностей (как методическую погрешность закона

квадратов расстояний), либо из справочных данных (например, значения погрешностей средств измерений указывают в их свидетельстве о поверке или калибровке).

Другие погрешности, например, такие как погрешность определения расстояния включают в себя как систематическую составляющую, погрешность используемого для их определения средства измерения (чаще всего это шкала фотометрической скамьи, в этом случае систематическая погрешность измерения расстояния определяется половиной цены деления шкалы), так и случайную, поскольку расстояние измеряется при достижении фотометрического тождества полей сравнения, устанавливаемого визуально.

Для уменьшения случайной составляющей погрешности, а также для того, чтобы возможно было проводить обработку результатов измерения статистическими методами, проводят несколько измерений этого расстояния и затем обрабатывают полученные результаты.

Визуальные измерения необходимо выполнять, нарушая равенство яркостей сравниваемых полей и восстанавливая его, поочередно меняя переменную яркость в сторону увеличения и уменьшения, поскольку пороговое значение при различении яркости так же зависит от множества факторов и является некоторым интервалом значений, а не конкретным значением, такой метод измерения позволяет найти искомое значение внутри границ найденного интервала. Также важно, чтобы в процессе измерения глаз наблюдателя не отрывался от исследуемых полей сравнения для устранения влияния изменения положения изображения на сетчатке и яркостной переадаптации.

Для устранения влияния отраженного и рассеянного излучения устанавливают экраны с черным матовым покрытием и круглым отверстием в центре (принцип установки экранов показан на рис. 13)

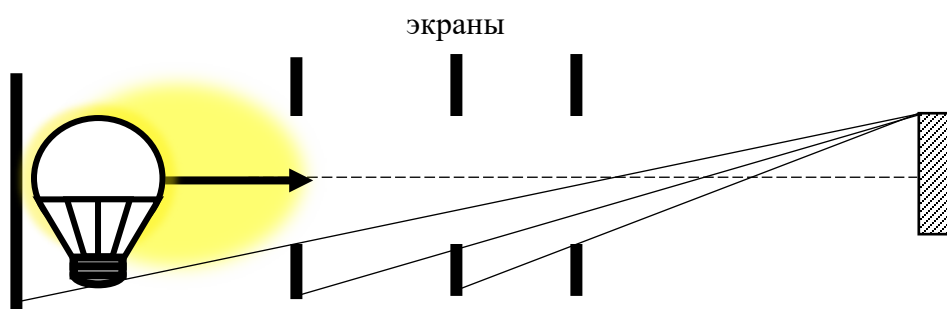


Рис. 13. Расположение экранов для устранения влияния отраженного света



### **Примечание**

На точность визуальных измерений также влияет эффект возникновения последовательных образов, который заключается в том, что зрительное ощущение не исчезает мгновенно после прекращения воздействия света на сетчатку, а продолжается ещё некоторое время, при этом поочередно возникают отрицательные и положительные последовательные образы. Время возникновения последовательных образов может меняться в довольно широких пределах, и зависит от различных факторов (яркости и размера наблюдаемой поверхности и т.д.) При визуальных измерениях, особенно при быстрой смене яркостей полей сравнения, последовательные образы могут накладываться на исследуемые поля сравнения и влиять на точность измерений, необходимо это учитывать и минимизировать это влияние (в основном, за счет более длительного времени измерения, медленного изменения яркости, обеспечения неподвижности глаза в процессе измерения, исключения возможности засветки сетчатки излучением с высокой яркостью, избегание длительного наблюдения полей сравнения с неравной яркостью и т.д.)

Из вышеизложенного может сложиться неверное представление о невысокой точности визуальных измерений, хотя в реальности опытные наблюдатели обеспечивают измерение световых величин с погрешностью всего около 0,2%. Однако с учетом имеющихся ограничений организации и проведения визуальных измерений, объективные методы измерений являются предпочтительными, а визуальные методы используются преимущественно для исследования свойств органа зрения и процесса зрительного восприятия.

## **2.2. Объективные методы измерения**

### **Общий подход при измерении световых величин объективными методами**

Методы объективной фотометрии построены на использовании специальных устройств – приемников излучения для преобразования энергии излучения в электрический сигнал и его последующее преобразование и измерение. Здесь следует отметить, что измерение электрических сигналов осуществить значительно проще и точность их измерений так же выше, чем при измерении излучения.

Общий принцип работы большинства устройств, используемых в качестве приемников излучения, основан на том, что под действием излучения в них возникают те или иные электрические эффекты или изменяются их электрические свойства.

Чаще всего используют приемники излучения, основанные на явлении фотоэффекта, т.е. возникновении электрического сигнала (тока (часто его ещё называют фототоком, чтобы подчеркнуть природу происхождения) или напряжения) при попадании излучения на чувствительную поверхность приемника излучения.

Очевидно, что электрический сигнал приемника будет зависеть от освещенности и от площади освещаемой поверхности, т.е. потока излучения, попавшего на приемник. Поскольку излучение с различными длинами волн имеет различную энергию, то очевидно, что реакция приемника излучения будет определяться не только энергией падающего на него излучения, но и его спектральным составом (формула):

$$i \sim \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (13)$$

где  $i$  – фототок,  $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  – спектральная плотность потока излучения,  $S(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность приемника излучения.

Пределы интегрирования в выражении (12) определяются как спектральным диапазоном длин волн излучения (зависят от вида кривой  $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ ), так и диапазоном длин волн для относительной спектральной чувствительности приемника излучения  $S(\lambda)$ .

### **Основные типы приемников излучения, используемых для фотометрических измерений**

Спектр фотоприемников, используемых для фотометрических измерений и в составе фотометрических приборов в качестве приемников излучения, довольно широк, но в рамках данного пособия мы остановимся на двух типах, которые используются в подавляющем большинстве случаев, это – фотодиоды и матричные приемники на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС – технология CCD (coupled charged device)) или технологии комплементарный металл-окисел-полупроводник (КМОП – CMOS (complementary metal oxide semiconductor)).

#### **Фотодиод**

Фотодиод представляет собой полупроводниковый приемник излучения с  $p$ - $n$ -переходом. Принцип работы фотодиода основан на внутреннем фотоэффекте, заключающемся в возникновении фото-ЭДС под действием энергии излучения.

На  $p$ - $n$ -переходе (контакте полупроводников  $p$  и  $n$  типа), за счет градиента концентраций (поскольку концентрация электронов в  $n$ -области больше, чем в  $p$ -области) происходит диффузия основных носителей заряда (дырочек в  $p$ -области и электронов в  $n$ -области), за счет этого в зоне контакта ( $p$ - $n$ -перехода) возникает область пространственного заряда (потенциальный барьер), которая мешает дальнейшему перемещению свободных носителей и устанавливается равновесное состояние –

диффузионный ток основных носителей уравнивается дрейфовым током неосновных и темновой ток (в отсутствии освещения) во внешней цепи равен нулю.

Фотодиод может работать в двух режимах:

- 1) фотогальваническом (без внешнего источника напряжения);
- 2) фотодиодном (с подключением внешнего обратного смещения к  $p$ - $n$ -переходу).

При подключении к фотодиоду внешнего источника напряжения в обратной полярности (плюс со стороны  $n$ -области и минус со стороны  $p$ -области), внешнее напряжение складывается с внутренним напряжением области пространственного заряда и дополнительно повышает потенциальный барьер для основных носителей заряда, препятствуя их диффузии, таким образом диффузионный ток уменьшается и во внешней цепи возникает темновой ток, обусловленный неосновными носителями.

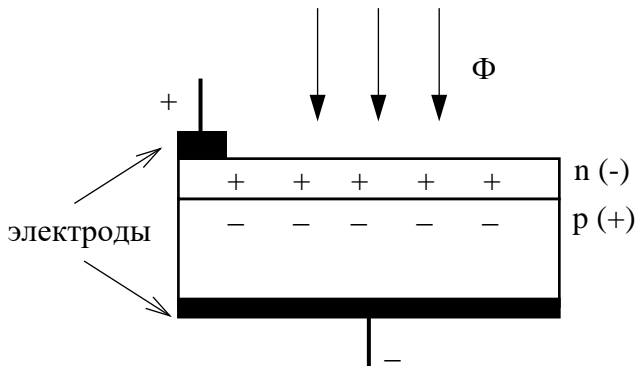


Рис. 14. Конструкция фотодиода

При освещении  $p$ - $n$ -перехода (например, со стороны  $n$ -области, рис. 14), за счет поглощения излучения возникает градиент концентрации неосновных носителей (больше всего носителей возникает в освещаемой области и затем концентрация уменьшается за счет роста поглощения), который создает диффузионный ток от освещенной поверхности к  $p$ - $n$ -переходу. Часть носителей рекомбинирует в объеме полупроводника, но большая часть носителей, образовавшихся на расстоянии меньше диффузионной длины, будут разделены контактным полем, которое является тормозящим для основных носителей и ускоряющим для неосновных, таким образом во внешней цепи возникнет ток неосновных носителей, пропорциональный величине светового потока, попавшего на фотодиод.

Как приемник излучения фотодиод обладает рядом преимуществ. Прежде всего, это простая схема подключения в фотогальваническом режиме. При этом фотодиод характеризуется небольшими значениями темновых токов (в зависимости от типа от  $10^{-6}$

до  $10^{-9}$  А), высокими значениями интегральной чувствительности и компактными размерами (площадь приемной поверхности обычно составляет 6 – 10 мм<sup>2</sup>).

Также важным преимуществом фотодиода является большой динамический диапазон измеряемых сигналов ( $i_{\max}/i_{\min}$ ), составляющий обычно от  $10^6$  до  $10^{10}$ .

### **Основные характеристики приемника излучения и требования к ним**

Основными характеристиками приемника излучения с точки зрения применимости его для тех или иных измерений в фотометрии являются:

1) интегральная чувствительность:

$$S \sim \frac{R}{\Phi}, \quad (14)$$

под которой будем условно понимать отношение реакции приемника излучения  $R$  (обычно ток или напряжение) к величине светового потока  $\Phi$ , попадающего на его поверхность.

Интегральная чувствительность приемника излучения должна быть достаточной для измерения фототока выбранным электроизмерительным прибором (вольтметр или амперметр) с заданной точностью;

2) (относительная) спектральная чувствительность  $S(\lambda)$ , т.е. чувствительность к излучению с длиной волны  $\lambda$ .

Сопоставляя выражение для определения световой величины (3) и выражение (13) для выходного сигнала фотоприемника (фототока), можно сделать вывод, что фототок будет пропорционален световой величине (световому потоку, освещенности, силе света или яркости), если значения относительной спектральной чувствительности  $S(\lambda)$  будут совпадать со значениями относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$ .

### **Примечание**

Обычно относительная спектральная чувствительность приемника  $S(\lambda)$  не совпадает с функцией  $V(\lambda)$  и для того, чтобы добиться их совпадения используют так называемые корректирующие (исправляющие) светофильтры  $\tau_{\text{кор}}(\lambda)$ , которые помещают на приемной поверхности приемника излучения и подбирают индивидуально в зависимости от вида кривой  $S(\lambda)$  так, чтобы выполнялось равенство:  $\tau_{\text{кор}}(\lambda)S(\lambda) \cong cV(\lambda)$ , где  $c$  – коэффициент пропорциональности (также важно отметить, что для длин волн вне видимой области произведение  $\tau_{\text{кор}}(\lambda)S(\lambda)$  должно быть равно 0).

Использование корректирующих светофильтров не только изменяет вид спектральной чувствительности, приближая его к  $V(\lambda)$ , но и уменьшает интегральную чувствительность приемника излучения, что необходимо учитывать для правильного выбора приемника при измерении излучения с заданными параметрами.

3) шумы, темновой ток ( $i_t$ ), т.е. величина выходного сигнала приемника излучения, определяющаяся тепловой генерацией, шумами электронной схемы усилителя и т.п., и которая не связана с падающим на фотоприемник излучением.

Эта характеристика определяет минимальное (пороговое) значение световой величины, которое можно измерить, хотя фактически, как будет показано дальше, минимальная измеряемая величина для конкретного типа приемника излучения будет определяться диапазоном линейности световой характеристики.

4) световая характеристика, т.е. зависимость выходного сигнала от освещенности приемной поверхности приемника излучения (светового потока, попадающего на приемную поверхность) (рис. 15)

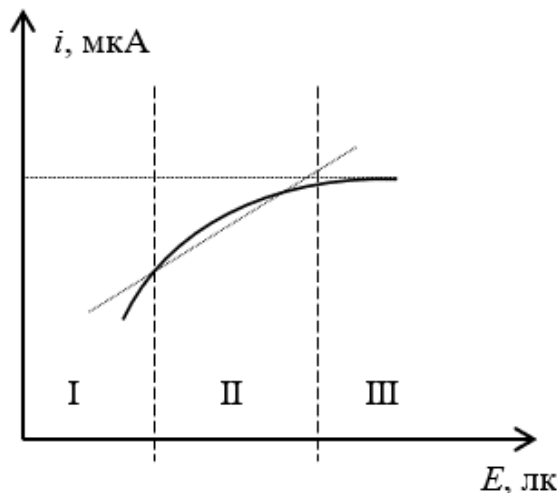


Рис. 15. Световая характеристика приемника излучения.

На рис. 15 видно, что для световой характеристики можно выделить три типичных области:

I — область малых значений освещенности (светового потока), где величина полезного и темнового сигнала сопоставимы, погрешность измерения будет очень большой и световая характеристика нелинейна, поэтому в данной области световой характеристики измерения не проводят;

II — область линейности световой характеристики (т.е. с ростом освещенности приемной поверхности, выходной сигнал фотоприемника также изменяется прямопропорционально), которая и определяет рабочий (динамический диапазон) приемника излучения, т.е. минимальное и максимальное значение освещенности

приемной поверхности, для которых можно проводить корректные измерения с заданной точностью;

**Примечание:** на рис. 15 видно, что в области II световая характеристика не является идеально линейной, как уже ранее отмечалось, полное соответствие реальных характеристик средств измерения принятым моделям и допущениям достичь невозможно, поэтому говоря о том, что в области II графика выполняется требование линейности световой характеристики, мы делаем допущение о том, что отклонением от линейности на этом участке можно пренебречь по сравнению с требуемой точностью измерения, либо другими принципиально неисключаемыми источниками погрешности. Как проводить измерения в случае, когда нельзя использовать допущение о линейности световой характеристики приемника излучения, будет рассказано далее в обзоре методов объективных измерений.

III – область насыщения, для которой характерно отсутствие (либо незначительное) изменения выходного сигнала при дальнейшем увеличении освещенности – понятно, что в этом случае измерения световой величины также невозможны;

5) временные характеристики (инерционность), описываемые постоянной времени приемника излучения и его утомляемостью (т.е. изменением чувствительности со временем в зависимости от уровня освещенности).

Эта характеристика имеет особенно важное значение при измерении характеристик модулированного излучения (например, излучения источников, питаемых от сети переменного тока и напряжения, излучения светодиодных источников излучения с широтно-импульсной модуляцией и т.п.) – должна подбираться так, чтобы не было влияния инерционности приемника излучения на результат измерений;

б) зонная характеристика (неравномерность распределения чувствительности по поверхности приемника излучения).

Чтобы не было влияния зонной характеристики на результат измерений, необходимо полностью заполнять входную апертуру приемника излучения, особенно это важно в случае измерения силы света источников излучения с узкой КСС, в этом случае необходимо правильным подбором расстояния фотометрирования обеспечить достаточную величину телесного угла для полного заполнения входной апертуры приемника излучения;

Таким образом, в основе объективных измерений лежит связь величины выходного сигнала приемника излучения (чаще всего, фототока) и величины освещенности его поверхности (светового потока, попадающего на приемную поверхность), приняв допущение о линейности этой зависимости (световой характеристики), можно, проводя

калибровку фотоприемника по эталону с известной световой характеристикой, в дальнейшем определять неизвестные световые величины. На основе данных рассуждений построен метод пропорциональных отклонений.

### Метод пропорциональных отклонений

При измерении световой величины методом пропорциональных отклонений используют эталонный источник, создающий известную освещенность  $E_0$  (или другую световую величину) на приемнике излучения, при этом в цепи приемника излучения возникает фототок  $i_0$  (рис. 16).

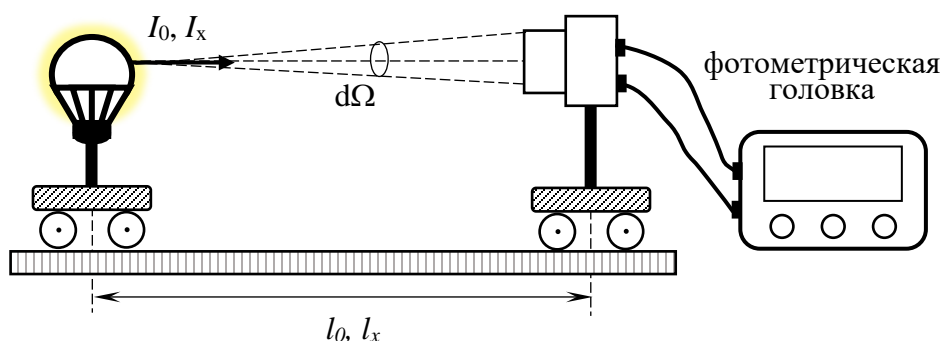


Рис. 16. Схема измерения силы света объективным методом

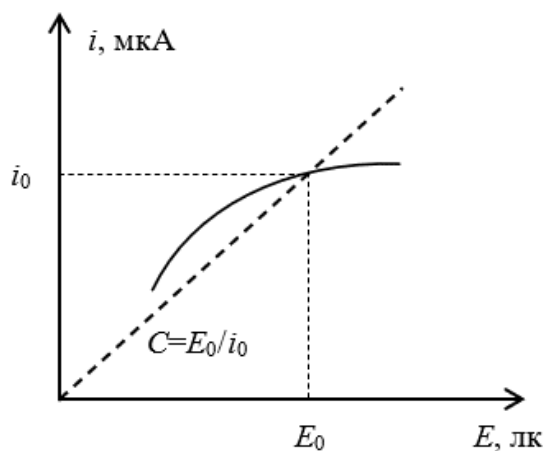


Рис. 17. Измерение градуировочного коэффициента по световой характеристике методом пропорциональных отклонений

В предположении о линейности световой характеристики, можно записать уравнение пропорциональности между освещенностью приемной поверхности  $E$  и фототоком  $i$ , который возникает в измерительной цепи фотоприемника:

$$E = C_E \cdot i, \quad (15)$$

где  $C_E = \frac{E_0}{i_0}$  – коэффициент пропорциональности – градуировочный коэффициент (определение градуировочного коэффициента называется градуировкой (калибровкой) приемника излучения).

Таким образом, неизвестное значение освещенности  $E$  по измеренному значению фототока  $i$  определяется из выражения (15). По известному значению освещенности, при условии выполнения допущения о точечном источнике излучения, сила света определяется из закона квадратов расстояний (выражение (7)).

На рис. 17 видно, что реальная световая характеристика приемника излучения отличается от линейной, поэтому допущение о ее линейности будет выполняться фактически только при величине освещенности  $E_0$  (соответствующей фототоку  $i_0$ ), а далее использование расчета по формуле (15) (метод пропорциональных отклонений) будет приводить к увеличению погрешности измерения, связанной с отклонением световой характеристики от линейной зависимости.

В зависимости от величины допустимой погрешности измерений, это может сократить возможный диапазон величины освещенности, которая может быть измерена данным фотоприемником в выбранных условиях калибровки ( $E_0$ ).

Чтобы расширить диапазон измеряемых освещенностей, можно разбить нелинейную световую характеристику на несколько участков, для каждого из которых отдельно определить коэффициент пропорциональности  $C_1$ ,  $C_2$  и т.д. (см. рис. 18).

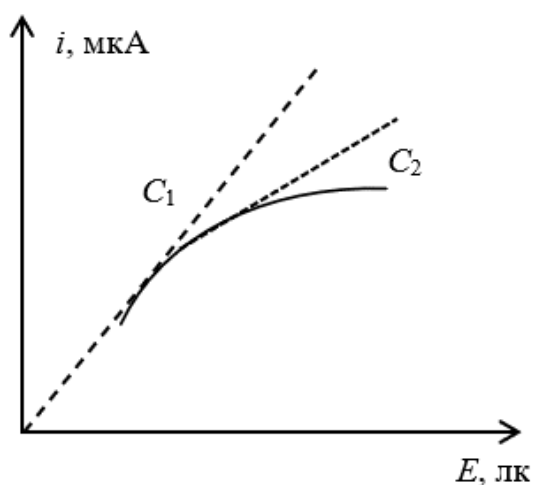


Рис. 18. Представление световой характеристики в виде совокупности линейных функций



Величина и количество участков определяются видом реальной световой характеристики приемника излучения и требованиями к допустимой погрешности измерения.

В случае, когда невозможно соблюсти допущение о линейности световой характеристики фотоприемника, применяют так называемый равносигнальный метод измерения.

**Примечание.** Важно отметить, как было указано ранее, что под диапазоном линейности световой характеристики, с практической точки зрения, понимаются такие значения нелинейности, которыми можно пренебречь в рамках конкретной измерительной задачи. Т.е. световая характеристика одного и того же приемника излучения, в зависимости от требуемой точности измерения, может быть признана линейной в одних условиях, и нелинейной – в других.

### **Равносигнальный метод**

Как было показано ранее, в методе пропорциональных отклонений допущение о линейности световой характеристики соблюдается для значений освещенности (фототока), при которых была проведена калибровка приемника излучения (см. рис. 17), при небольшом отклонении от этих значений, это допущение выполняется с небольшой погрешностью.

Поэтому в случае, когда световую характеристику нельзя считать линейной, излучение от исследуемого источника регулируют так, чтобы создаваемый им фототок  $i$  был равен значению фототока  $i_0$  при калибровке фотоприемника:

$$i \equiv i_0. \quad (16)$$

Из равенства фототоков следует равенство освещенностей от эталонного и исследуемого источников излучения:

$$E = E_0. \quad (17)$$

В предположении, что источники света являются точечными, и эталонный источник с силой света  $I_0$  находится на расстоянии  $l_0$ , а исследуемый источник с силой света  $I_x$  находится на расстоянии  $l_x$ , при этом они создают фототок одинаковой величины, силу света исследуемого источника  $I_x$  определяют по формуле (11).

Таким образом, объективный фотометр для измерения силы света точечных источников излучения на базе интегрального приемника представляет собой простейшую измерительную схему, состоящую из приемника излучения и регистрирующего устройства (например, цифрового амперметра).

Важно отметить, что измеренное значение силы света является усредненным в пределах телесного угла, определяющегося расстоянием от источника до приемника излучения и размером приемной поверхности приемника излучения. Т.е. фундаментальным свойством подобных типов приемников излучения является возможность получения единственного (интегрального, усредненного) значения световой величины для выбранного направления. Кроме того, как было рассмотрено выше, выбор допустимого размера телесного угла, в пределах которого можно проводить усреднение (т.е. считать силу света неизменной), определяется исходя из требуемой точности измерения и практических соображений при проведении измерений.

В том случае, если источник света является протяженным или в рамках выбранной измерительной схемы невозможно обеспечить условия, необходимые для выполнения закона квадратов расстояния, для определения его силы света можно использовать телецентрический метод.

### **Телецентрический метод измерения силы света**

Согласно определению понятия силы света (5), для ее измерения необходимо учесть весь поток от источника в заданном направлении ( $\theta, \varphi$ ). Если применимо допущение о точечности источника излучения, то, как было показано ранее, схема измерения строится таким образом, что точечный источник помещается в вершину телесного угла, основанием которого является входная апертура приемника излучения. Выходной сигнал приемника излучения естественным образом определяется долей потока, попавшего на его приемную поверхность, т.е. в пределах телесного угла  $d\Omega$ , определяющегося размерами входной апертуры приемника излучения и расстоянием между приемником и источником излучения (см. рис. 16).

Понятно, что в случае протяженного источника, такой подход к измерению силы света применить невозможно, если его нельзя считать точечным. Поэтому для протяженных источников, исходя из определения понятия силы света (5) схема измерения организуется следующим образом: между протяженным источником излучения и приемником излучения располагается оптическая система таким образом, чтобы ее задняя фокальная плоскость совпадала с плоскостью входной апертуры приемника излучения (см. рис. 19).

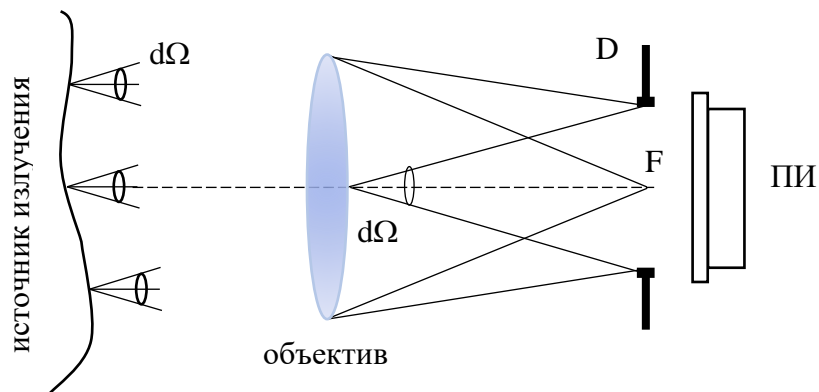


Рис. 19. Схема измерения силы света телецентрическим методом

В задней фокальной плоскости оптической системы устанавливается круглая диафрагма  $D$ , диаметр которой выбирают таким, чтобы можно было пренебречь влиянием aberrаций и дифракции (т.е. больше кружка рассеяния), но достаточно малый (значительно меньше фокусного расстояния), чтобы, с достаточной с практической точки зрения точностью, можно было считать, что через нее проходят только те лучи, которые падают на оптическую систему параллельно оси, т.е. учитывая конечные размеры диафрагмы  $D$ , в пределах малого угла  $d\Omega$ . Такие узкие пучки, главные лучи которых параллельны оптической оси, называются телецентрическими.

Таким образом, при телецентрическом ходе лучей выходной сигнал приемника излучения будет пропорционален световому потоку, распространяющемуся от протяженного источника света в направлении, совпадающем с оптической осью объектива в пределах малого телесного угла  $d\Omega$ , размеры которого определяются диаметром отверстия диафрагмы  $D$ :

$$i \sim C \cdot d\Phi, \quad (18)$$

где  $d\Phi$  – элементарный поток, заключенный в пределах угла  $d\Omega$ ,  $C$  – коэффициент пропорциональности.

Из определения силы света (5) следует, что

$$d\Phi = I \cdot d\Omega. \quad (19)$$

Учитывая, что величина телесного угла  $d\Omega$  для данной измерительной схемы определяется свойствами оптической системы и размерами отверстия диафрагмы  $D$ , можем считать эту величину постоянной, тогда выражение (18) для выходного сигнала приемника излучения можно переписать в виде:

$$i = C_I \cdot I, \quad (20)$$

где  $C_I$  – градуировочный (калибровочный) коэффициент, определяющийся при проведении калибровки по эталону силы света.

### Матричные приемники излучения

В основе работы матричных приемников излучения также лежит явление внутреннего фотоэффекта. Отдельный элемент матричного приемника (пиксель) представляет собой МОП (или МДП)-структуру (металл-оксид-полупроводник или металл-диэлектрик-полупроводник).

На кремниевой подложке  $p$ -типа формируются каналы из полупроводника  $n$ -типа, над которыми располагаются электроды. При подаче на электрод напряжения образуется потенциальная яма, в которую попадают электроны, образовавшиеся в результате внутреннего фотоэффекта под воздействием излучения, количество электронов (накопленный элемент заряд) пропорционально величине светового потока и времени накопления (время интегрирования) (рис. 20).

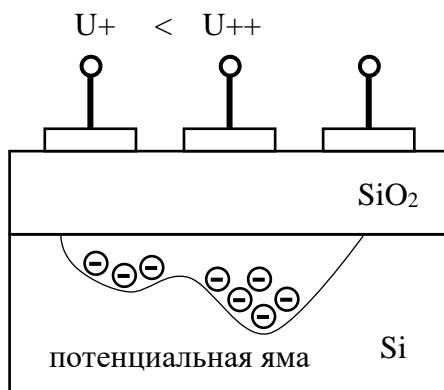


Рис. 20. Схема элемента матричного приемника излучения

По сути, каждый такой элемент является самостоятельным приемником излучения (т.е. электрический заряд, накопленный в каждом элементе, соответствует величине упавшего на него светового потока), а его размер обычно составляет от нескольких

единиц до десятков микрон, и в составе матричного приемника их используется несколько тысяч. Также элементы могут быть расположены в один ряд, тогда такой приемник носит название, например, ПЗС-линейки.

Принципиальной разницей между ПЗС и КМОП технологиями является дальнейшее преобразование полученного сигнала.

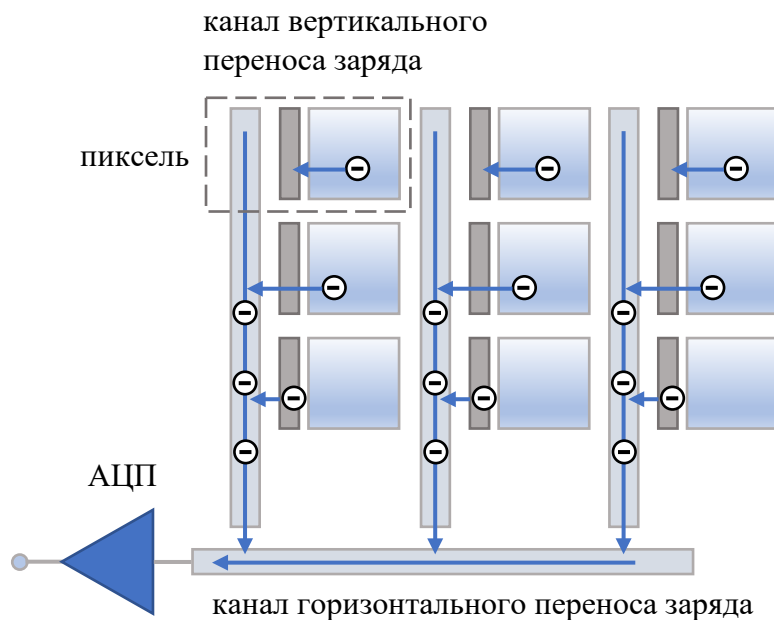


Рис. 21. Преобразование сигнала в ПЗС-матрице

В ПЗС-матрице под действием управляющего напряжения происходит попиксельный или построчный последовательный перенос заряда, далее аналоговый сигнал отдельной строки (или пикселя) преобразуется в цифровой (рис. 21).

В отличие от ПЗС-технологии, в технологии КМОП каждый пиксель содержит свою собственную схему АЦП (рис. 22), поэтому информация от каждого пикселя может обрабатываться отдельно в режиме реального времени, кроме того, она сразу преобразуется в цифровую форму.

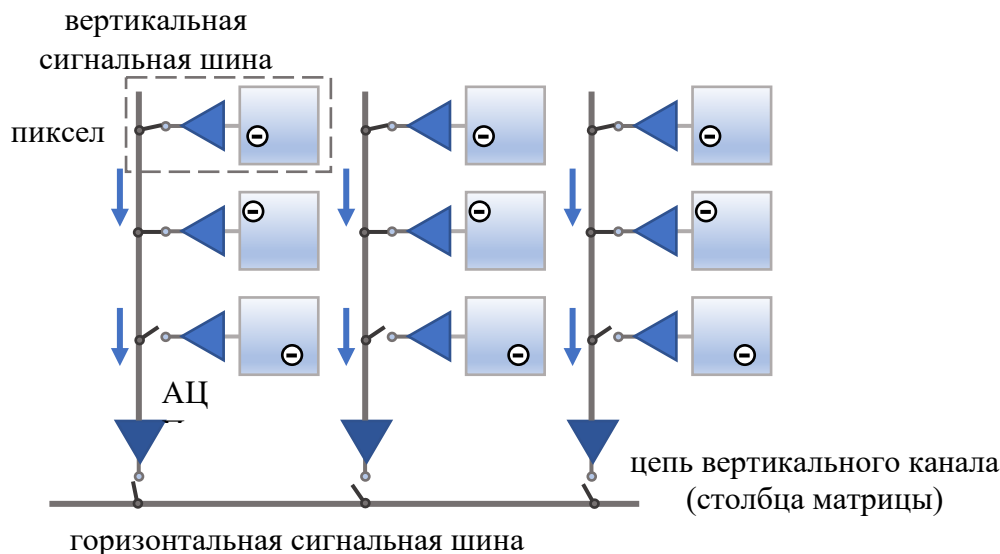


Рис. 22. Преобразование сигнала в КМОП-матрице

Конструкция КМОП-матрицы позволяет обеспечить высокое быстродействие (поскольку сигнал каждого чувствительного элемента обрабатывается встроенным АЦП), однако это приводит к необходимости размещения на каждом отдельном элементе матрицы электронной схемы преобразователя, а, следовательно, уменьшению площади чувствительного элемента, также при этом увеличивается уровень шума.

Таким образом, поскольку матричный приемник представляет собой совокупность большого количества отдельных приемников (пикселей), то результатом отдельного измерения (в отличие от интегрального приемника) является пространственное распределение измеренной величины в пределах входной апертуры матричного приемника излучения.

Основные характеристики матричных приемников в целом схожи с характеристиками интегральных приемников, но с некоторыми особенностями, связанными с их конструкцией и принципом работы.

Общий подход к реализации измерения световой величины с помощью матричных приемников излучения схож с подходом, применяемым для интегральных приемников, т.е. спектральная чувствительность матричного приемника с помощью корректирующих светофильтров приводится в соответствие с функцией относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$ , но с учетом специфики конструкции и принципа работы (рис. 23).

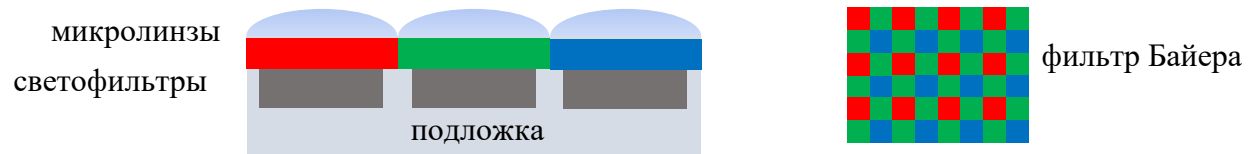


Рис. 23. Структура матричного приемника излучения

Для обеспечения максимального поглощения излучения падающего на поверхность матричного приемника на каждом элементе (пикселе) располагается микролинза и светофильтры, размещаемые в виде «мозаики» (фильтр Байера), которые позволяют производить коррекцию спектральной чувствительности расчетными методами в предположении о близости сигнала соседних пикселей (данное предположение выполняется с достаточной точностью с практической точки зрения, поскольку размеры пикселя невелики).

Таким образом, сигнал отдельного элемента матричного приемника определяется выражением:

$$i \sim (\int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) S(\lambda) d\lambda) \cdot t_{\text{и}}, \quad (21)$$

где  $t_{\text{и}}$  – время интегрирования (накопления) сигнала, т.е. в случае матричного приемника речь идет об измерении не самого значения освещенности (светового потока, попадающего на поверхность пикселя), а экспозиции, т.е. накопленного значения световой энергии, полученного за время интегрирования.

Световой характеристике матричного приемника (зависимости выходного сигнала от освещенности пикселя) также свойственна нелинейность, для снижения погрешности, связанной с нелинейностью используется метод  $\gamma$ -коррекции – калибровка с помощью диаграммы Макбета (рис. 24).

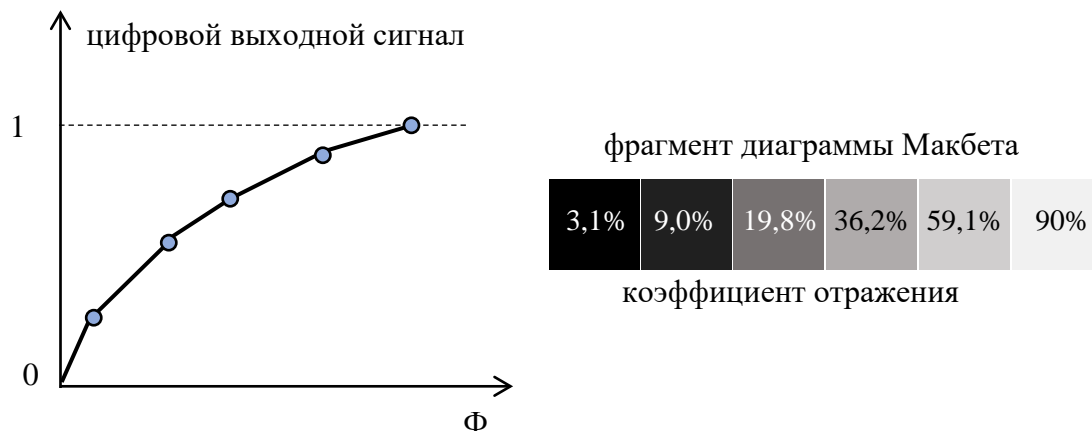


Рис. 24.  $\gamma$ -коррекция световой характеристики матричного приемника излучения с использованием фрагмента диаграммы Макбета.

Как видно из рис. 24, фактически методика  $\gamma$ -коррекции с помощью фрагмента диаграммы Макбета (набор образцов с известными коэффициентами отражения для создания известных градаций яркости) представляет собой моделирование реальной световой характеристики матричного приемника излучения линейной кусочно-заданной функцией.

Минимальная и максимальная величины сигнала (и соответствующая им световая величина), которая может быть измерена с помощью элемента матричного приемника излучения, определяется временем интегрирования. При этом наименьшее измеряемое значение, которое можно определить с помощью данного типа приемника, будет зависеть в основном от шумов, определяющихся, в основном, тепловой генерацией носителей, также важно отметить, что величина темнового сигнала (за счет шумов) также будет накапливаться с увеличением времени интегрирования, поэтому в большинстве измерительных устройств предусмотрено предварительное измерение темнового сигнала для выбранного времени интегрирования для последующей корректировки (исключения этого значения из величины выходного сигнала).

Второй особенностью матричных приемников излучения является цифровой сигнал на выходе, который кодируется одним байтом, что приводит к ограничению числа градаций световой величины (от 0 до 255), т.е. ограничению динамического диапазона и разрешающей способности.

Данное ограничение является достаточно серьезным с точки зрения организации измерений, поскольку для практических задач фотометрии необходимый динамический



диапазон (соотношение максимальной и минимальной измеряемой величины) составляет в среднем  $10^3 - 10^5$ .

Существует два основных способа увеличения динамического диапазона измерительных систем на базе матричных приемников.

### **Системы с расширенным динамическим диапазоном (HDR – high dynamic range systems)**

#### **Сочетание различного времени интегрирования**

Для выбранного времени интегрирования в предположении о линейности световой характеристики график зависимости выходного сигнала от светового потока будет иметь вид, показанный на рис. 25.

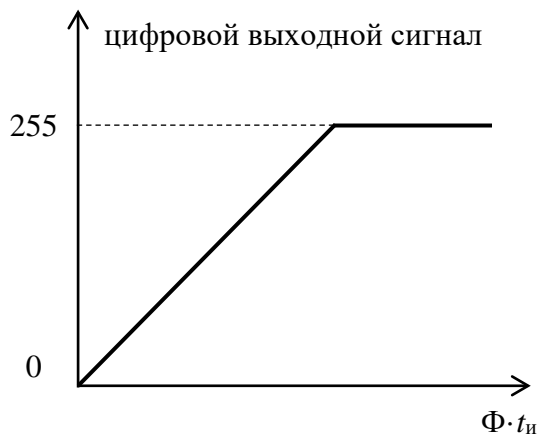


Рис. 25. Градации световой величины в цифровом формате представления выходного сигнала

Соответственно для того, чтобы измерить большие значения световой величины, необходимо уменьшать время интегрирования (при этом значение наименьшей измеряемой величины также будет увеличиваться). Таким образом, чтобы расширить динамический диапазон матричного приемника излучения, проводят измерения для нескольких значений времени интегрирования  $t_0 > t_1 > t_2 > t_3$  (рис. 26) и затем объединяют полученные результаты (рис. 27), что позволяет значительно расширить динамический диапазон матричного приемника излучения.

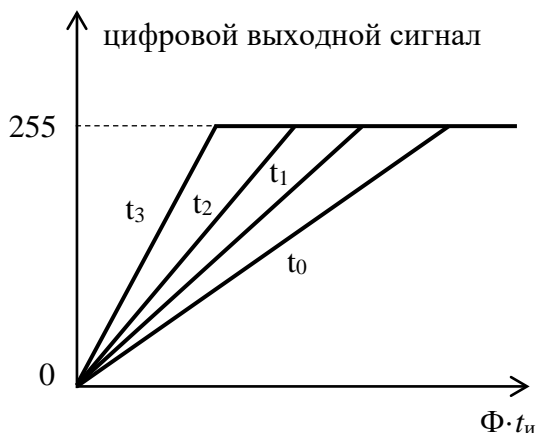


Рис. 26. Последовательные измерения выходного сигнала пространственного распределения одной и той же световой величины с различным временем интегрирования

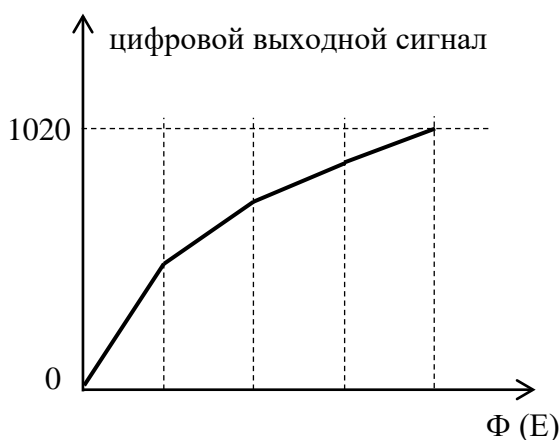


Рис. 27. Совокупный выходной сигнал (объединение результатов, полученных для различного времени интегрирования)

Недостатком данного метода является длительное время измерения, что может приводить к возникновению значительных погрешностей при измерении в динамическом режиме или нестабильности источника излучения, кроме того, как было отмечено выше, шумовой сигнал так же изменяется при изменении времени интегрирования. Если необходимо проводить измерения с единым значением времени интегрирования для всех градаций световой величины, то широко используется второй метод расширения динамического диапазона, основанный на применении нейтральных светофильтров с различными коэффициентами пропускания.

### **Расширение динамического диапазона с помощью маски из нейтральных светофильтров (assorted pixels)**

Данный метод расширения динамического диапазона основан на том, что на приемной поверхности матричного приемника дополнительно располагается светофильтр, составленный из нейтральных светофильтров с различными коэффициентами пропускания (рис. 28).

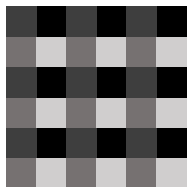


Рис. 28. Конструкция фильтра для расширения динамического диапазона матричного приемника

Таким образом, обрабатывая сигналы соседних пикселей, освещенность которых примерно одинакова, а коэффициент пропускания нейтральных светофильтров, установленных перед их поверхностью, отличается, можно получить значение коэффициента пропорциональности для различных градаций световой величины и, тем самым, расширить динамический диапазон и увеличить разрешающую способность.

### **Схемы измерения силы света с помощью матричного приемника излучения**

Как было отмечено выше, объективные измерения световых величин основаны на использовании преобразования излучения в электрический сигнал в приемнике излучения. Далее необходимо обеспечить пропорциональность измеренного электрического сигнала световой величине, которую требуется измерить.

Общим требованием при измерении световой величины является совпадение формы кривой относительной спектральной чувствительности приемника излучения  $S(\lambda)$  с функцией относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$ , это требование обусловлено самим определением понятия световой величины как некоторой эффективной величины, характеризующей действие излучения сложного спектрального состава  $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  на средний глаз.

Исходя из принципа работы матричных приемников излучения, можно сделать вывод, что их выходной сигнал будет пропорционален величине светового потока, попавшего на их поверхность за время интегрирования (т.е. произведению средней

освещенности, создаваемой источником на приемной поверхности  $E_{\text{ср}}$ , времени интегрирования  $t_{\text{и}}$  и площади приемной поверхности  $A_{\text{пи}}$ ):

$$i \sim E_{\text{ср}} \cdot t_{\text{и}} \cdot A_{\text{пи}}. \quad (22)$$

Для того чтобы обеспечить измерение (пропорциональность выходного сигнала) силы света, необходимо учесть, что выходной сигнал каждого пикселя обусловлен попадающим на него потоком  $\Phi_{\text{рх}}$  в пределах телесного угла  $\Omega_{\text{рх}}$  с вершиной в фотометрическом центре источника излучения и основанием, соответствующем площади пикселя. Поскольку площадь пикселя мала, то усреднение значения светового потока, а, следовательно, и силы света проводится в пределах очень малого угла, соответствующего отдельному пикселю, поэтому в данном случае допущение о точечном источнике излучения выполняется автоматически.

Чаще всего при построении фотометрических головок на базе матричных приемников излучения для того, чтобы обеспечить независимость выходного сигнала фотометрической головки от расстояния до источника излучения (т.е. чтобы не требовалось соблюдение критериев закона квадратов расстояния), используют оптическую систему. С помощью оптической системы получают изображение источника излучения на входной апертуре (матрице чувствительных элементов) матричного приемника излучения (рис. 29) и таким образом, выходной сигнал отдельного пикселя будет пропорционален освещенности изображения источника излучения, создаваемого оптической системой фотометрической головки, умноженной на время интегрирования.

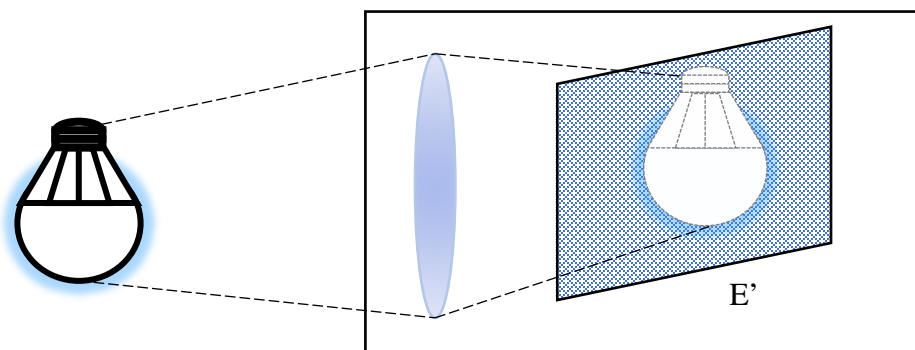


Рис. 29. Схема расположения элементов фотометрической головки с объективом на базе матричного приемника излучения

Согласно закону Манжена, освещенность изображения  $E'$ , создаваемого оптической системой, пропорциональна яркости  $L$  источника излучения:

$$E' = K \cdot L \cdot \Omega', \quad (23)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от характеристик оптической системы (коэффициента пропускания оптических материалов и т.д.),  $\Omega'$  – телесный угол, соответствующий размеру входной апертуры фотометрической головки.

Поскольку выходной сигнал каждого элемент матричного приемника излучения регистрируется и обрабатывается отдельно, выражение (23) справедливо для каждого отдельного элемента, с учетом того, что  $L$  в таком случае будет яркостью участка источника излучения, изображение которого попадает на данный пиксель, а под  $\Omega'$  следует понимать телесный угол, соответствующий отдельному пикселю.

Поскольку размер отдельного элемента матричного приемника излучения мал и в его пределах можно считать яркость постоянной, а также учитывая соотношение между яркостью источника  $L$  и его силой света  $I$ :

$$L = I \cdot A_{px}, \quad (24)$$

где  $A_{px}$  – площадь проекции участка источника излучения, соответствующая размеру изображения, попадающего на отдельный элемент матричного приемника излучения, можно записать выражение для определения силы света по выходному сигналу матричного приемника излучения:

$$i = K \cdot E' \cdot t_n \cdot A_{px} = C_L \cdot L \cdot t_n = C_I \cdot I \cdot t_n, \quad (25)$$

где  $C_L$ ,  $C_I$  – коэффициенты пропорциональности (калибровочные коэффициенты) для измерения яркости и силы света соответственно.

Таким образом выходной сигнал каждого элемента фотометрической головки на базе матричного приемника излучения с фокусирующей оптической системой пропорционален яркости (силе света) источника излучения и, следовательно, не зависит от расстояния до источника излучения и не требует соблюдения критериев закона квадратов расстояния, а, значит, позволяет сделать измерительную установку более компактной.

Отдельно следует отметить, что так как матричный приемник излучения состоит из большого количества элементов независимых элементов, то даже единичное измерение (без сканирования по углу) с его помощью световых параметров осветительных устройств позволяет получить распределение измеряемой световой величины в пределах направлений внутри входной апертуры матричного приемника или фотометрической головки на его основе. Использование панорамных оптических систем открывает

дополнительные возможности проведения фотометрических измерений, например, КСС отдельных типов осветительных приборов без использования распределительных фотометров.

### **Основные источники погрешности при объективных измерениях силы света**

При измерении силы света объективными методами основные источники погрешности будут связаны со свойствами используемого приемника излучения, а именно:

1) погрешность спектральной коррекции чувствительности приемника излучения  $S(\lambda)$  под функцию относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$ . Эту погрешность можно оценить по формуле:

$$f_1 = a - 1, \quad (26)$$

где  $a$  – относительная актиничность излучения, рассчитываемая по формуле:

$$a = \frac{\int \Phi_{e,\lambda x}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e,\lambda x}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int \Phi_{e,\lambda 0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e,\lambda 0}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}, \quad (27)$$

где  $\Phi_{e,\lambda x}(\lambda)$ ,  $\Phi_{e,\lambda 0}(\lambda)$  – спектральная плотность излучения исследуемого и эталонного источника соответственно; пределы интегрирования в выражении (27) определяются пределами функций в подынтегральных выражениях.

Из (27) следует, что погрешность спектральной коррекции зависит не только от близости между собой кривых  $S(\lambda)$  и  $V(\lambda)$ , но и то насколько подобны кривые спектральной плотности излучения исследуемого и эталонного источников. В том случае, если калибровка проводится по эталонному источнику идентичному (или подобному) исследуемому, даже при невысоком качестве спектральной коррекции, погрешность спектральной коррекции, определяемая по формуле (26), может иметь небольшое значение.

Также важно отметить, что помимо совпадения формы кривых  $S(\lambda)$  и  $V(\lambda)$ , также важно учитывать, что при спектральной коррекции с помощью светофильтров неизбежно остается остаточная чувствительность приемника излучения вне видимого диапазона (в ближней УФ и ИК области), которая также вносит дополнительную погрешность измерения, если у источника есть излучение в этой области.

- 2) нелинейность световой характеристики приемника излучения;
- 3) влияние температуры;

- 4) погрешность установки электрических параметров и их измерения;
- 5) влияние направления падения излучения на приемную поверхность и неравномерность чувствительности приемника внутри входной апертуры;
- 6) шумы приемника излучения и погрешности преобразования в измерительных каналах.

### **3. Представление фотометрических данных**

Полученные в результате измерений данные о фотометрических параметрах светильников, источников света и других светотехнических изделий используются, в основном, для проектирования осветительных установок и других применений, подразумевающих последующие расчеты в программах автоматизированного проектирования, поэтому важно представлять их в некотором едином стандартизованном виде для удобства использования или сравнения различных вариантов осветительных устройств, например, в каталогах производителей.

На сегодняшний день стандартным представлением фотометрических данных являются КСС в главных плоскостях, при этом приняты следующие способы представления данных, называемые системами фотометрирования и описанные, например, в Межгосударственном стандарте ГОСТ Р 54350 (ГОСТ 34819) «Приборы осветительные».

Существует три основных системы фотометрирования  $(A, \alpha)$ ,  $(B, \beta)$  и  $(C, \gamma)$ , отличающихся расположением плоскостей, в которых проводятся измерения и направлениями (и способами) отсчета углов.

В рамках данного пособия рассмотрим две наиболее распространенные системы фотометрирования  $(B, \beta)$  (используется в основном для осветительных приборов прожекторного типа, рис. 30) и  $(C, \gamma)$  (используется в основном для светильников, рис. 31).

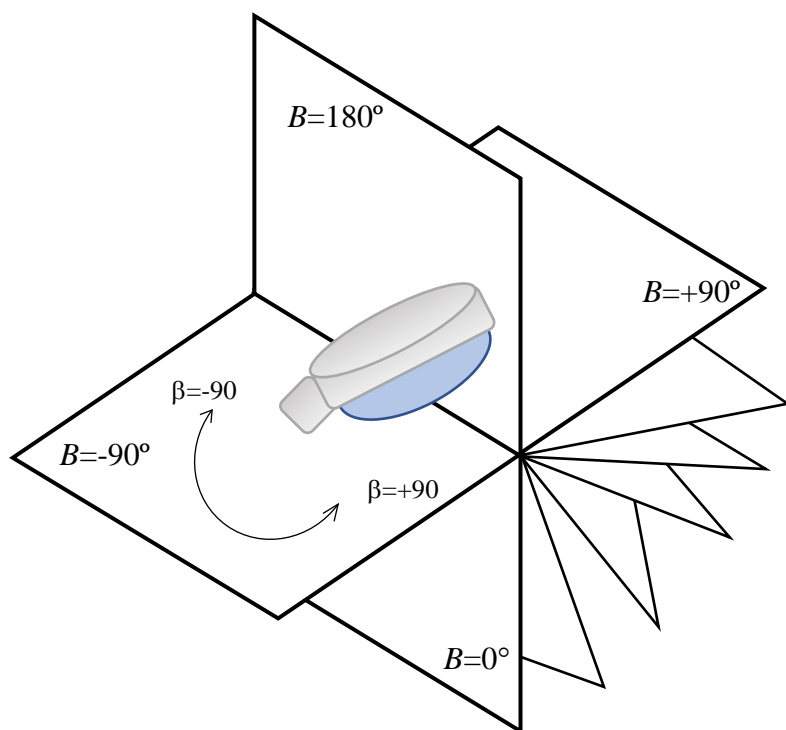


Рис. 30. Система фотометрирования ( $B, \beta$ )

В системе фотометрирования ( $B, \beta$ ) диапазон значений азимутальных углов  $\beta = -90 \div +90$ , главной продольной плоскости соответствуют полуплоскости  $B_0$  и  $B_{180}$ .

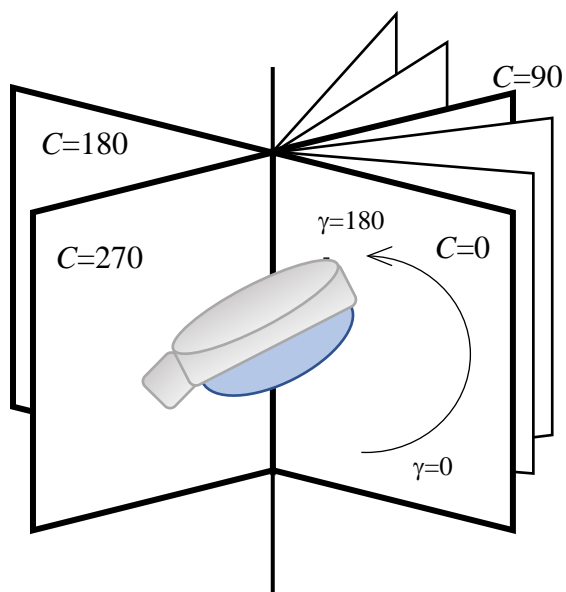


Рис. 31. Система фотометрирования ( $C, \gamma$ )

В системе фотометрирования ( $C, \gamma$ ) диапазон значений азимутальных углов  $\gamma = 0 \div +180$ , главной продольной плоскости соответствуют полуплоскости  $C_{90}$  и  $C_{270}$ .



Поскольку при проектировании осветительных установок используются в основном специализированные программы проектирования и визуализации (DIALux, Lightscape и т.п.), были разработаны различные стандарты форматов файлов представления фотометрических данных осветительных приборов, среди которых наиболее употребимым является формат \*.ies.

Структура ies-файла формируется в соответствии со стандартом IESNA:LM-63-1995, разработанным Светотехническим обществом Северной Америки (IESNA), и представляет собой текстовый файл в кодировке ASCII, в котором соблюдается определенный формат и порядок записи строк, каждая из которых содержит информацию об отдельном типе характеристик осветительного прибора.

В файле обязательно содержится следующая информация:

- наименование стандарта (IESNA:LM-63-1995);
- наименование осветительного прибора и информация о нем (производитель, описание, обозначение и т.п.);
- число ламп в осветительном приборе;
- световой поток лампы;
- число полярных и азимутальных углов;
- тип системы фотометрирования для представленных данных  $((A,\alpha), (B,\beta))$  или  $(C,\gamma)$ );
- система единиц (метрическая или английская);
- габаритные размеры осветительного прибора;
- значения азимутальных и полярных углов и соответствующей им силы света (в относительных (кд/кЛм) или абсолютных (кд) единицах).

Также в файле опционально может содержаться дополнительная информация о месте и времени проведения испытаний, типе используемых ламп и т.д.

#### **4. Распределительные фотометры**

Для измерения КСС используют измерительные установки – распределительные фотометры, которые представляют собой гониометр (устройство для установки и измерения определённого углового положения при измерении силы света в данном направлении) и фотометрической головки.

Различают две основных схемы распределительных фотометров:

- 1) схема с неподвижным источником;

2) схема с неподжным приемником.

**Схема с неподжным источником** – при измерениях источник излучения (светильник и т.п.) устанавливается в рабочем положении (либо неподжно, либо с возможностью вращения вокруг азимутальной оси), а приемник излучения (фотометрическая головка) перемещается в процессе измерения КСС с заданным шагом (рис. 3) или сканирование КСС по углу осуществляется с помощью зеркала (рис. 33), а приемник излучения также установлен неподжно.

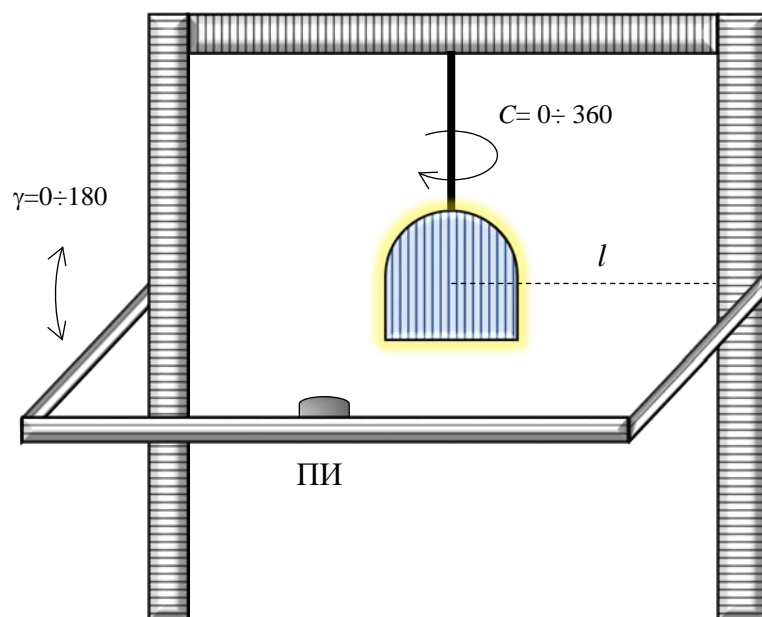


Рис. 32. Схема распределительного фотометра с перемещением приемника излучения, реализована система фотометрирования  $(C, \gamma)$

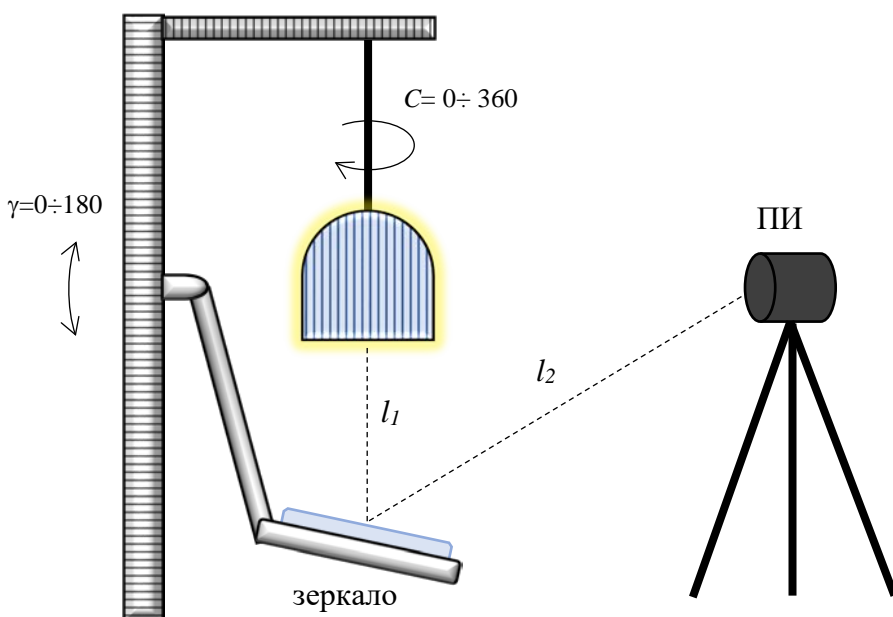


Рис. 33. Схема распределительного фотометра с зеркалом, реализована система фотометрирования ( $C, \gamma$ )

Схема измерения с неподвижным источником используется в тех случаях, когда светотехнические характеристики источника излучения зависят от рабочего положения (например, все виды разрядных ламп).

Преимуществом схемы зеркального фотометра является увеличенное по сравнению со схемой, показанной на рис. 32, расстояние фотометрирования, которое составляет  $l = l_1 + l_2$ , однако использование зеркал в схеме распределительного фотометра не лишено некоторых недостатков:

- неравномерность чувствительности по площади апертуры из-за различия характеристик зеркального покрытия и деградации характеристик со временем;
- искажение спектрального состава, за счет поляризации и отражения;
- сложности юстировки, так как необходимо, чтобы при всех положениях сканирующего зеркала соблюдалась соосность всех элементов;
- ограничение размеров фотометрируемых светотехнических изделий размерами зеркала (входной апертуры фотометра).

**Схема с неподвижным приемником излучения** – в этом случае приемник (фотометрическая головка) установлен в фиксированном положении на расстоянии  $l$  от оси вращения гониометра, а установка угла для измерения КСС осуществляется с помощью поворотного устройства (гониометра), на котором установлен светильник (рис. 34).

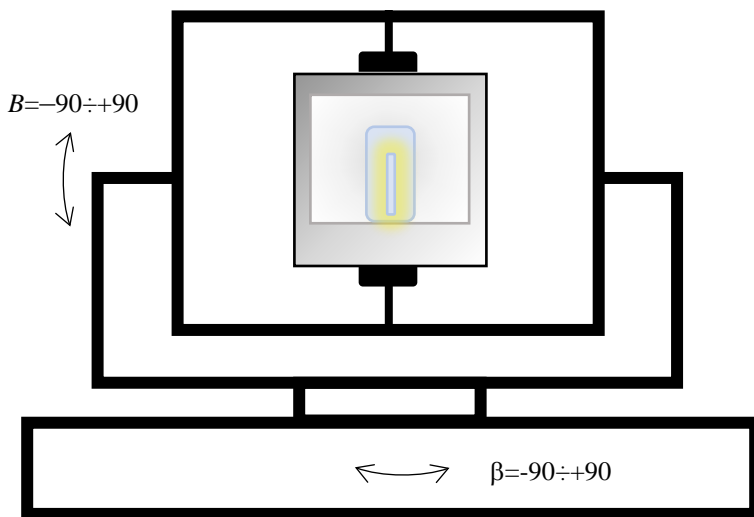


Рис. 34. Пример конструкции гониометра для схемы распределительного фотометра с неподвижным приемником, реализована система фотометрирования ( $B, \beta$ )

Данная схема более удобна с точки зрения обеспечения необходимого расстояния фотометрирования, которое необходимо для выполнения закона квадратов расстояния при измерении силы света, однако ее нельзя использовать, если световые параметры осветительного прибора зависят от угла наклона.

Рекомендуемые методы испытаний, а также бюджеты неопределенности и рекомендации по погрешностям измерения используемого оборудования приводятся в соответствующих стандартах, так, например, в ГОСТ 34819 «Приборы осветительные. Технические требования и методы испытаний» для гониофотометра рекомендовано значение погрешности измерения  $\pm 8\%$ .

При выборе шага изменения угла при измерении КСС светового прибора, как было сказано ранее, необходимо руководствоваться величиной допустимой погрешности измерения, т.е. чтобы изменением силы света в пределах выбранного угла можно было пренебречь. Обычно для представления фотометрических данных измерения проводят с шагом не более  $5^\circ$ .

## **5. Стандартизация фотометрических измерений**

Согласно федеральному закону №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» под единством измерений понимается «состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы». Понятно, что с практической точки зрения, удобство единообразия заключается в том, что позволяет использовать единую терминологию (наименования) и единицы измерения (количественное выражение результатов измерений), однако также понятно, что необходимо создание базовых стандартизованных эталонов, сравнение с которыми позволяло бы делать заключение о соответствии конкретного светотехнического изделия принятой системе единиц.

Общепринятая практика обеспечения единства измерений заключается в том, что на уровне государства создаются метрологические организации, которые занимаются разработкой стандартов и эталонов, а также методик оценки соответствия их характеристик и характеристик светотехнических изделий принятой системе единиц величин.

### **Государственные поверочные схемы и эталоны для фотометрии**

ГОСТ 8.023 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств и измерений световых величин непрерывного и импульсного излучений – устанавливает порядок передачи единиц силы света (кд), пространственного распределения силы света (кд), светового потока (лм), освещенности и яркости от государственного первичного эталона единиц силы света и светового потока при помощи вторичных эталонов и рабочих эталонов рабочим средствам измерений с указанием погрешностей и основных методов поверки.

Другими словами, данный стандарт описывает схему первичного государственного эталона (типы и характеристики используемого оборудования) и его характеристики (диапазон воспроизводимых значений и погрешность воспроизведения), а также взаимосвязь и иерархию эталонов в цепочке передачи единицы измерения.

Согласно ГОСТ 8.023 значение единицы измерения от первичного государственного эталона передается вторичным эталонам, от которых единица измерения в свою очередь передается рабочим эталонам и рабочим средствам измерений.

В качестве образцового излучателя в составе первичного государственного эталона используется высокотемпературная широкоапертурная модель черного тела (ВШМЧТ); в составе вторичных эталонов – светоизмерительные лампы типа СИС (светоизмерительная лампа силы света, см. раздел «Образцовые и рабочие лампы для измерения силы света») или СИП (светоизмерительная лампа потока излучения) с различными значениями номинальной силы света, светового потока и цветовой температуры, либо светодиоды.

В качестве рабочих эталонов, служащих для поверки (калибровки) рабочих средств измерения (т.е. СИ, используемых непосредственно для задач измерения параметров осветительных установок, светотехнических изделий и т.п.) используются фотометры или излучатели, состоящие из комплекта светодиодов или светоизмерительных ламп с различными значениями номинальной силы света, светового потока и цветовой температуры.

## Схема передачи единицы измерения от Государственного первичного эталона к рабочим средствам измерения

Первичный государственный эталон		
Силы света $35 \div 1000$ кд $S = 0,1 \cdot 10^{-2}$ ; $\theta = 0,25 \cdot 10^{-2}$	Светового потока $50 \div 2500$ лм $S = 0,13 \cdot 10^{-2}$ ; $\theta = 0,25 \cdot 10^{-2}$	
	Способы передачи единицы:	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• сличение с помощью компаратора</li> <li>• метод косвенных измерений</li> </ul>	
Вторичные эталоны		
Силы света $35, 100, 500; 1 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$ кд $S_{\Sigma} = 0,3 \cdot 10^{-2}; 0,8 \cdot 10^{-2}$	Светового потока $500, 1500$ лм $S_{\Sigma} = 0,5 \cdot 10^{-2}$	
	Способы передачи единицы:	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• сличение с помощью компаратора</li> <li>• непосредственное сличение;</li> <li>• метод прямых измерений;</li> <li>• метод косвенных измерений</li> </ul>	
Рабочие эталоны		
Силы света $1 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^4$ кд $\Delta = 1,2 \cdot 10^{-2} \div 8 \cdot 10^{-2}$	Светового потока $1 \div 20\,000$ лм $\Delta = 1 \cdot 10^{-2} \div 8 \cdot 10^{-2}$	
	Способы передачи единицы:	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• сличение с помощью компаратора</li> <li>• метод прямых измерений</li> </ul>	
Рабочие средства измерений		
Силы света $1 \cdot 10^{-5} \div 150\,000$ кд $\Delta = 3 \cdot 10^{-2} \div 20 \cdot 10^{-2}$	Светового потока $1 \cdot 10^{-5} \div 200\,000$ лм $\Delta = 3 \cdot 10^{-2} \div 10 \cdot 10^{-2}$	

### Образцовые и рабочие лампы для измерения силы света

В качестве образцовых (эталонных) ламп при измерении света широко используются светоизмерительные лампы типа СИС. Основные требования и характеристики образцовых ламп типа СИС описаны в ГОСТ 10771 «Лампы накаливания светоизмерительные рабочие. Технические условия». Здесь приведены основные параметры (напряжение, мощность, предельные значения силы света или светового потока и цветовой температуры), размеры (и форма колбы), методы испытаний для подтверждения соответствия лампы требованиям ГОСТ, а также указания по эксплуатации и поверке.

Поскольку лампа типа СИС используется в качестве образцовой при измерении силы света, особенностью ее конструкции является колба специальной конической формы, спроектированная таким образом, чтобы исключить влияние вторичного отражения. Тело накала лампы типа СИС располагается в одной плоскости для удобства юстировки и корректного определения расстояния между образцовым источником и фотометрической головкой.

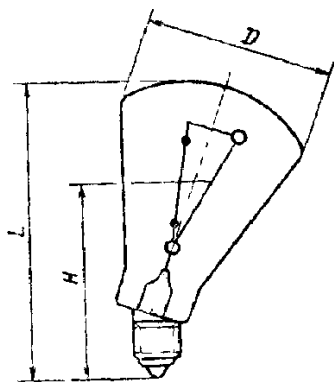


Рис. 35. Лампа светоизмерительная СИС40-100 (ГОСТ10771)

Обозначение лампы состоит из указания ее типа (СИС – светоизмерительная силы света), номинального значения напряжения и силы света, например, СИС40-100. Действительные значения рабочего напряжения и тока и соответствующие им значения силы света и цветовой температуры указывают в паспорте (или формуляре) лампы, где также ведется учет времени горения для проведения своевременной проверки.

Так как основным критерием для применения источника излучения в качестве эталона является стабильность его характеристик, то перед использованием измерительные лампы подвергают предварительному отжигу в течение нескольких десятков часов для стабилизации характеристик. Вообще свойства образцовых ламп достаточно хорошо изучены и рекомендации по их использованию, хранению и периодической проверке приведены в соответствующих стандартах.

Для использования в качестве лампы сравнения подойдет любая лампа накаливания со стабильными характеристиками (причем важно отметить, что речь идет о стабильности характеристик в течение одной процедуры измерения, а не о постоянстве характеристик от включения к включению), использовать для этих целей светоизмерительную эталонную лампу нецелесообразно, так как это не соответствует ее



назначению (воспроизведению определенного значения световой величины), а также такая лампа быстро утратит свои характеристики.

Для калибровки матричных приемников требуется создание образцового источника с постоянной яркостью внутри выходной апертуры, размеры которой соответствуют размерам входной апертуры калибруемого матричного приемника излучения.

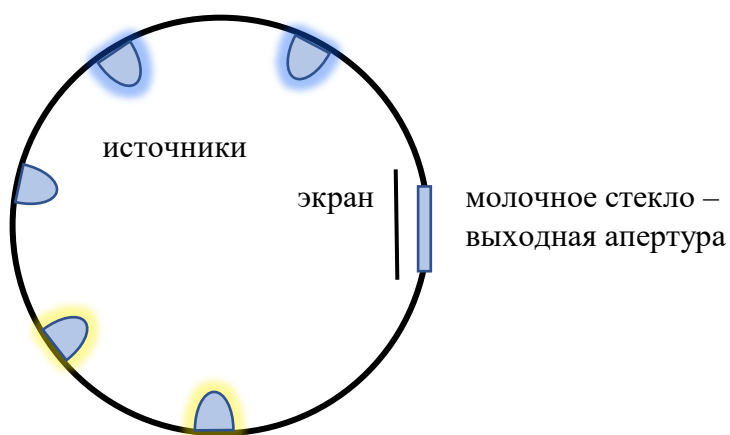


Рис. 36. Эталонный источник на основе интегрирующей сферы

Такие источники реализуются на основе интегрирующих сфер с молочным стеклом в качестве равномерной апертуры и набором источников различных типов (обычно набор светодиодов с различными значениями светового потока и цветовой температуры, которые могут использоваться в различных комбинациях). Такая конструкция позволяет создавать равномерный источник с различными значениями яркости и цветности излучения для калибровки матричных приемников и фотометрических головок на их основе.