

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет телекоммуникаций

Кафедра метрологии и стандартизации

# **ИЗМЕРЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ**

В трех частях

Часть 1

**Л. Е. Батай, А. Л. Гурский, В. В. Мирончик**

**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики и радиоэлектроники  
в качестве учебно-методического пособия для специальности 1-45 01 06 «Лазерные  
информационно-измерительные системы» и направления специальности  
1-45 01 01-06 «Инфокоммуникационные технологии (лазерные информационно-  
измерительные системы)»*

Минск БГУИР 2015

УДК 681.78:[535.24+535.6.08](076)

ББК 32.86я73+22.34я73

ИЗ7

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета (протокол №15 от 23 июня 2014 г.);

заместитель заведующего лабораторией физики и техники полупроводников государственного научного учреждения

«Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси», кандидат физико-математических наук, доцент Е. В. Луценко

**Измерения** в лазерных и оптоэлектронных системах. В 3 ч. Ч. 1 : Фотометрические и колориметрические измерения : учеб.-метод. пособие / Л. Е. Батай, А. Л. Гурский, В. В. Мирончик. – Минск : БГУИР, 2015. – 66 с. : ил. ISBN 978-985-543-126-9 (ч. 1).

Изложены основы фотометрических измерений: рассмотрены основные фотометрические величины, законы изменения световых потоков при распространении в поглощающей среде и при отражении, систематизированы основные виды приемников излучения. Значительное внимание уделено вопросам колориметрических измерений, касающихся восприятия потоков светового излучения глазом человека. Приведены эталоны, имеющиеся в Республике Беларусь, предназначенные для сличения при фотометрических и колориметрических измерениях.

УДК 681.78:[535.24+535.6.08](076)

ББК 32.86я73+22.34я73

ISBN 978-985-543-126-9 (ч. 1)

ISBN 978-985-543-125-2

© Батай Л. Е., Гурский А. Л., Мирончик В. В., 2015

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Фотометрические измерения.....	5
1.1 Основные фотометрические величины.....	5
1.2 Фотометрия поглощающих сред.....	10
1.3 Фотометрические величины с учетом функции видности глаза.....	15
2 Приемники излучения.....	19
2.1 Тепловые приемники.....	19
2.2 Фотоэлектрические приемники.....	24
2.3 ПЗС-матрицы.....	31
3 Колориметрические измерения.....	36
3.1 Что изучает колориметрия?.....	36
3.2 Устройство рецепторного аппарата глаза.....	37
3.3 Законы Грассмана.....	39
3.4 Координаты цвета системы <i>RGB</i> .....	41
3.5 Координаты цветности системы <i>RGB</i> .....	45
3.6 Координаты цветности и цветовой треугольник системы <i>RGB</i> .....	46
3.7 Цветовая координатная система <i>XYZ</i> .....	49
3.8 Измерение цвета.....	53
3.9 Стандартные источники света для колориметрии.....	56
4 Эталоны Республики Беларусь в области фотометрии и колориметрии...	59
4.1 Национальный эталон единиц цвета, спектральных коэффициентов направленного пропускания и диффузного отражения в диапазоне длин волн 0,20–2,5 мкм (НЭ РБ 3-00).....	59
4.2 Национальный эталон единиц силы света и освещенности (НЭ РБ 8-02).....	60
4.3 Национальный эталон единицы спектральной чувствительности приемников излучения (НЭ РБ 17-10).....	61
4.4 Исходный эталон единицы белизны.....	62
4.5 Исходный эталон единицы средней мощности лазерного излучения.....	64
ЛИТЕРАТУРА.....	65

## ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие является первой частью изложения материала общего курса «Измерения в лазерных и оптоэлектронных системах».

Оптические измерения относятся к числу наиболее точных методов. Пороговая чувствительность и точность классических методов оптических измерений находится на уровне длины волны используемого излучения. Для видимого диапазона спектра эта величина соответствует примерно 0,5 мкм.

Возможности оптических измерений значительно расширились после создания лазеров (1960 г.). Оптика получила новое эффективное средство проведения измерений – монохроматические световые пучки с высокой степенью когерентности и малой расходимостью. В необходимых случаях может быть получена чрезвычайно высокая интенсивность лазерного излучения. В настоящее время многие современные технологии трудно представить без использования лазеров. Лазерные источники излучения используются в самых разнообразных областях: в производстве – для обработки, резки, сварки, маркировки различных материалов; в измерительных приборах и системах – для определения расстояний и скоростей, радиусов кривизны, шероховатости, наличия дефектов поверхностей, концентраций веществ; в медицине – хирургия, терапия, диагностика и т. д. Использование лазеров, в первую очередь полупроводниковых, так называемых лазерных диодов, лежит в основе построения и функционирования телекоммуникационных систем. Создание лазеров привело к развитию новых научных направлений – нелинейной оптики, лазерной спектроскопии.

Использование лазерного излучения в измерениях невозможно без соответствующего метрологического обеспечения контроля его параметров. К ним можно отнести длину волны излучения, его интенсивность, пространственную структуру, временные характеристики. Энергетические параметры излучения (т. е. характеристики квадрата амплитуды световой волны  $A^2$ ), их пространственное и спектральное распределение, а также изменение во времени исследует фотометрия. Поэтому первая часть пособия посвящена изложению основ фотометрических измерений: рассмотрены основные фотометрические величины, законы изменения световых потоков при распространении в поглощающей среде и при отражении, систематизированы основные виды приемников излучения. Значительную часть материала занимают вопросы колориметрических измерений, касающихся восприятия потоков светового излучения глазом человека. Колориметрические измерения играют важную роль в метрологическом обеспечении технологических процессов, связанных с использованием красителей. В последнем разделе пособия приведены эталоны, имеющиеся в Республике Беларусь, предназначенные для сличения при фотометрических и колориметрических измерениях.

# 1 ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## 1.1 Основные фотометрические величины

Фотометрия – один из разделов оптики, занимающийся изучением энергетических характеристик световых процессов, а также способами их измерений.

Фотометрия как наука сложилась достаточно давно и развивалась в основном феноменологически. Основы фотометрии были заложены еще Бугером и Ламбертом и с тех пор принципиально не изменялись. Фотометрия не касается природы света, единства его волновых и корпускулярных свойств. Она лишь описывает количественно энергетические характеристики оптического излучения во временном, пространственном и спектральном распределении, т. е. параметры излучения, зависящие от квадрата амплитуды световой волны  $A^2$ .

Фотометрическими методами измеряют энергию излучения  $Q$ , переносимую из одной части пространства к другой, в частности, от источника излучения к его приемнику. При этом измерение осуществляется за времена, много большие периода световых колебаний.

Энергия  $Q$ , переносимая излучением на всех длинах волн, называется *интегральной энергией*. Единицей измерения  $Q$  служит джоуль (Дж).

В общем случае энергия излучения распределена по длинам волн (рисунок 1.1).

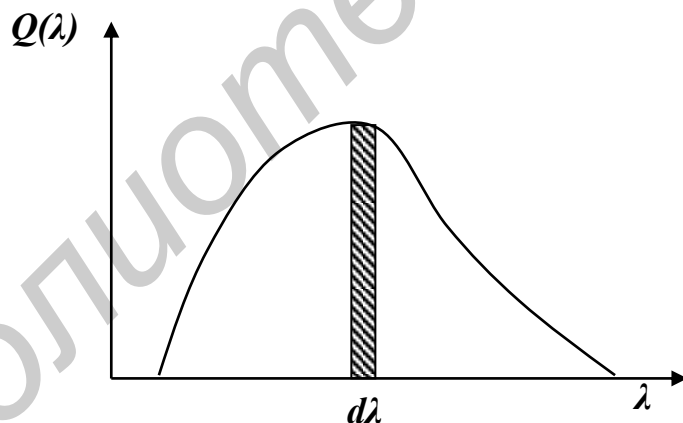


Рисунок 1.1 – Распределение энергии излучения по длинам волн

В этом случае энергия  $dQ$ , приходящаяся на спектральный диапазон  $d\lambda$ , равна

$$dQ = Q(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (1.1)$$

Величина  $Q(\lambda)$  называется *спектральной плотностью энергии излучения*. Энергия  $Q(\lambda_1, \lambda_2)$ , приходящаяся на интервал длин волн от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , опреде-

ляется следующим образом:

$$Q(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} Q(\lambda) d\lambda. \quad (1.2)$$

Поскольку излучение всегда занимает некоторое пространство, вводится понятие **объемной плотности энергии**:

$$u = dQ/dV. \quad (1.3)$$

Объемная плотность энергии – энергия излучения в единице объема, измеряемая в системе единиц СИ в Дж/м<sup>3</sup>.

С учетом того, что в излучении могут быть представлены различные длины волн, наряду со спектральной плотностью энергии вводится понятие **спектральной плотности объемной плотности энергии**  $u(\lambda)$  в соответствии с условием

$$du(\lambda) = u(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (1.4)$$

где  $du(\lambda)$  – объемная плотность энергии, приходящаяся на спектральный диапазон  $d\lambda$ .

Величина  $u(\lambda)$  в системе СИ измеряется в Дж/м<sup>4</sup>.

Объемная плотность энергии излучения на всех длинах волн

$$u = \int_0^{\infty} u(\lambda) d\lambda. \quad (1.5)$$

Если на пути излучения расположить площадку и рассмотреть количество энергии  $dQ$ , прошедшей через данную площадку за время  $dt$ , то можно ввести понятие **потока энергии** излучения (или **мощности** излучения)  $\Phi$ :

$$\Phi = dQ/dt. \quad (1.6)$$

Мощность излучения, или поток излучения есть энергия, излучаемая или проходящая через выделенную площадь за единицу времени. Единица измерения  $\Phi$  – Вт или Дж/с.

**Спектральная плотность потока энергии излучения** (мощности излучения)  $\Phi(\lambda)$  определяется выражением

$$d\Phi(\lambda) = \Phi(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (1.7)$$

С использованием понятия «спектральная плотность потока энергии» поток энергии излучения на всех длинах волн равен

$$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda. \quad (1.8)$$

Единица измерения  $\Phi(\lambda)$  в системе СИ – Вт·м<sup>-1</sup>.

Можно перейти от шкалы длин волн к шкале частот, т. е. от функций  $Q(\lambda)$ ,  $u(\lambda)$ ,  $\Phi(\lambda)$  к распределениям  $Q(\nu)$ ,  $u(\nu)$ ,  $\Phi(\nu)$ .

По аналогии с выражением (1.1) можно записать

$$dQ = Q(\nu) \cdot d\nu. \quad (1.9)$$

Для спектрального интервала  $d\lambda$  (или  $d\nu$ ) справедливо условие

$$dQ = Q(\lambda) \cdot d\lambda = Q(\nu) \cdot d\nu. \quad (1.10)$$

С учетом соотношений  $\nu = c/\lambda$  и  $d\nu = \frac{c}{\lambda^2} d\lambda$  получим

$$Q(\nu) = \frac{\lambda^2}{c} Q(\lambda). \quad (1.11)$$

Аналогично

$$u(\nu) = \frac{\lambda^2}{c} u(\lambda), \quad (1.12)$$

$$\Phi(\nu) = \frac{\lambda^2}{c} \Phi(\lambda). \quad (1.13)$$

Существует простая связь между потоком энергии  $\Phi$  и объемной плотностью излучения  $u$ . Для ее установления рассмотрим световую трубку с сечением  $ds$ , вдоль которой переносится излучение (рисунок 1.2). Световая трубка – мысленно выделенная трубка в поле излучения, в которой нет переноса энергии излучения через боковую поверхность.

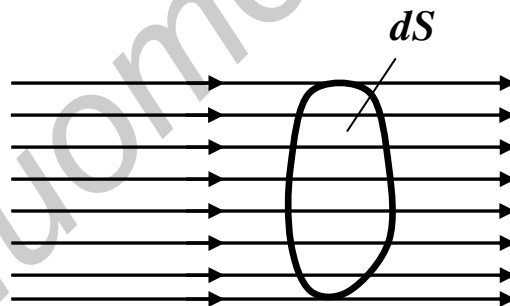


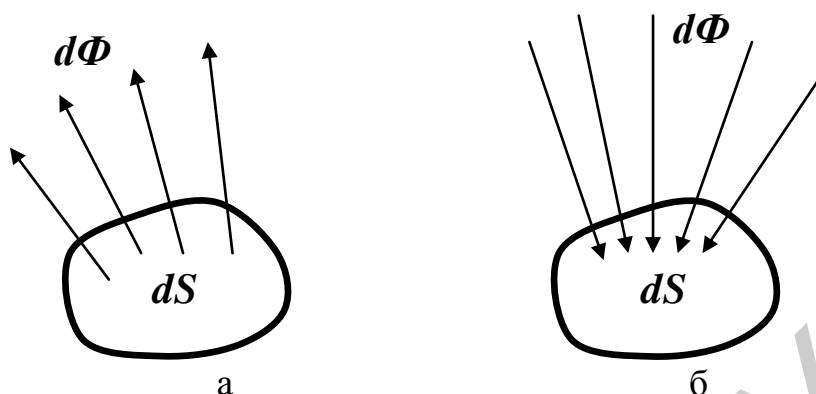
Рисунок 1.2 – Световая трубка

В течение одной секунды через сечение трубки  $ds$  пройдет все излучение, которое находится на расстоянии  $\nu = c/n$  от этого сечения. Здесь  $c$  – скорость света в вакууме;  $n$  – показатель преломления среды, в которой распространяется излучение.

Объем поля излучения, прошедшего через сечение трубки за 1 с, равен  $c \cdot ds/n$ . С учетом того, что объемная плотность энергии излучения равна  $u$ , получим, что поток энергии излучения  $d\Phi$  через сечение  $ds$  равен

$$d\Phi = u \cdot \frac{c}{n} dS. \quad (1.14)$$

В фотометрии также используются понятия, характеризующие поверхностную плотность потока энергии излучения: энергетическая светимость и энергетическая освещенность (рисунок 1.3, а, б).



а – светимость площадки  $ds$ ; б – освещенность площадки  $ds$

Рисунок 1.3 – Энергетическая светимость и энергетическая освещенность

**Энергетическая светимость  $M$**  (называемая также испускательной способностью) определяет поток энергии излучения, испускаемый единичной площадкой:

$$M = d\Phi/ds . \quad (1.15)$$

**Энергетическая освещенность  $E$**  – поток энергии излучения, падающий на единичную площадку.

$$E = d\Phi/ds . \quad (1.16)$$

Единицами измерения величин  $M$  и  $E$  являются  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ .

Можно также ввести спектральные плотности энергетической светимости –  $M(\lambda)$  или  $M(\nu)$ , и энергетической освещенности –  $E(\lambda)$  или  $E(\nu)$  из условий

$$\begin{aligned} dM(\lambda) &= M(\lambda)d\lambda ; & dM(\nu) &= M(\nu)d\nu ; \\ dE(\lambda) &= E(\lambda)d\lambda ; & dE(\nu) &= E(\nu)d\nu . \end{aligned} \quad (1.17)$$

Для характеристики пространственного распределения поля излучения вводятся важные фотометрические величины: сила излучения и яркость (рисунок 1.4, а, б).

**Силой излучения  $I$**  называется величина потока энергии  $d\Phi$ , заключенная в телесном углу  $d\omega$ :

$$I = d\Phi/d\omega . \quad (1.18)$$



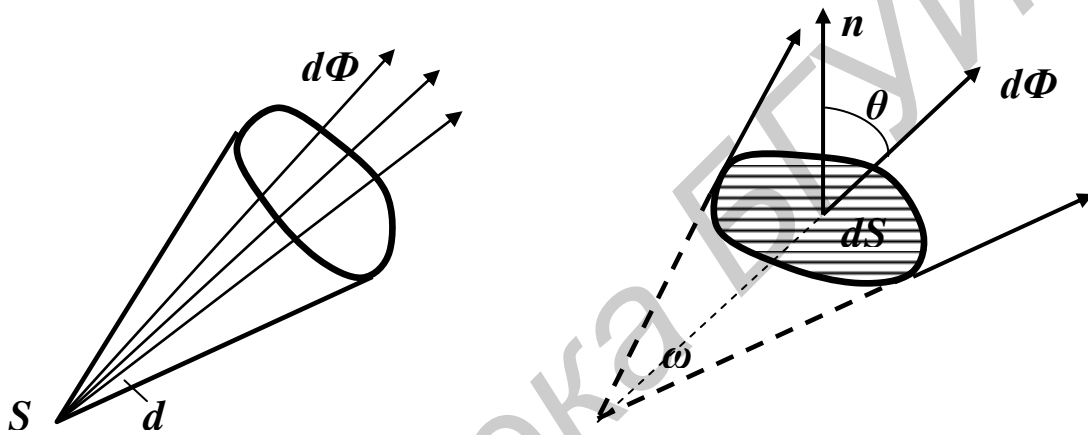
Единица измерения силы излучения –  $\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$ .

Для изотропного источника значение  $I$  является постоянной величиной, а для неизотропного зависит от направления. В общем случае  $I=I(\theta, \varphi)$ , где  $\theta$  и  $\varphi$  – углы в сферической системе координат, характеризующие заданное направление.

**Яркостью излучения  $L$**  называется поток энергии излучения  $d\Phi$ , испускаемый светящейся площадкой  $ds$  в телесном углу  $d\omega$ :

$$L = d\Phi / \cos \Omega \cdot ds \cdot d\omega, \quad (1.19)$$

где  $\Omega$  – угол между нормалью к площадке и направлением распространения излучения.



а – сила; б – яркость

Рисунок 1.4 – К определению фотометрических величин излучения

Учитывая формулу (1.18), можно записать

$$L = I / \cos \Omega \cdot ds = I / ds_n, \quad (1.20)$$

т. е. яркость равна силе излучения, испускаемого с единичной площадки в нормальном к ней направлении.

В системе СИ яркость излучения измеряется в  $\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Фотометрические величины, введенные выше, можно связать с вектором Умова – Пойнтинга  $S$ , используемого в волновой теории света.

Вектор Умова – Пойнтинга, задаваемый формулой

$$S = \frac{c}{4\pi} [E \cdot H], \quad (1.21)$$

определяет энергию, переносимую электромагнитной волной с напряженностями электрического и магнитного поля соответственно  $E$  и  $H$  через единичную площадку за одну секунду. С учетом определения потока энергии излучения (1.6) можно записать

$$d\Phi = S_n \cdot ds, \quad (1.22)$$

где  $S_n$  – проекция вектора  $S$  на нормаль к площадке  $ds$ .

Из сравнения (1.16) и (1.22) следует, что нормальная составляющая вектора Умова – Пойнтинга  $S_n$  равна освещенности  $E$  площадки  $ds$ . Поскольку величина вектора  $S$  пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля ( $S \sim |E_0|^2$ ), то освещенность также пропорциональна  $E_0^2$ .

Следует, однако, учитывать, что такая простая связь между фотометрическими величинами и величинами, вводимыми в электродинамике, существует только для плоских волн. В общем случае данная связь становится значительно более сложной.

## 1.2 Фотометрия поглощающих сред

При распространении излучения в материальной среде следует учитывать возможность его ослабления за счет поглощения.

Пусть в поглощающей среде распространяется плоская волна монохроматического излучения с частотой  $\nu$ . Уменьшение потока энергии излучения в плоскопараллельном слое толщиной  $dl$  описывается формулой

$$d\Phi(\nu) = -k(\nu) \cdot \Phi(\nu) \cdot dl. \quad (1.23)$$

Величина  $k(\nu)$  называется **коэффициентом поглощения**. В системе СИ в качестве единицы измерения  $k(\nu)$  используют  $\text{м}^{-1}$ . Вместе с тем в молекулярной физике и спектроскопии на практике широко используется единица  $\text{см}^{-1}$ .

Формула (1.23) является выражением одного из основных законов фотометрии и носит название дифференциального закона Бугера.

В большинстве случаев при сравнительно небольших интенсивностях излучения коэффициент поглощения  $k(\nu)$  не зависит от  $\Phi(\nu)$  и остается постоянным. В этом случае, интегрируя выражение (1.23) по всей толщине поглощающего слоя от 0 до  $l$ , получим

$$\Phi_l(\nu) = \Phi_0(\nu) e^{-k(\nu) \cdot l}, \quad (1.24)$$

где  $\Phi_0$  – значение потока энергии излучения на входе в поглощающий слой;  
 $l$  – толщина поглощающего слоя.

Выражение (1.24) носит название интегрального закона Бугера, или просто **закона Бугера** (установлен Бугером в 1729 г.). Согласно данному закону при распространении монохроматического света в поглощающей однородной среде поток энергии излучения уменьшается экспоненциально.

Величина  $D = k(\nu) \cdot l$ , входящая в показатель экспоненты, носит название **оптической плотности**.

Нарушение закона Бугера может возникать в следующих случаях:

- падающее излучение не является монохроматическим;
- поглощающая среда неоднородна, т. е.  $k = k(\nu, z)$ ;
- коэффициент поглощения зависит от  $\Phi(\nu)$ .

Такая зависимость может возникать в случае мощного лазерного излучения и рассматривается в нелинейной оптике.

Для немонахроматического излучения, частоты составляющих которого лежат в диапазоне от  $\nu_1$  до  $\nu_2$ , ослабление потока энергии происходит в соответствии с выражением

$$\Phi_l = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \Phi(\nu) e^{-k(\nu) \cdot l} d\nu . \quad (1.25)$$

Для неоднородных сред в случае зависимости коэффициента поглощения от продольной координаты  $z$  закон Бугера также трансформируется:

$$\Phi_l(\nu) = \Phi_0(\nu) e^{-\int_0^l k(\nu, z) dz} . \quad (1.26)$$

В этом случае можно измерить только среднее значение коэффициента поглощения:

$$\overline{k(\nu, l)} = \frac{1}{l} \int_0^l k(\nu, z) dz = \frac{1}{l} \ln \frac{\Phi_l(\nu)}{\Phi_0(\nu)} . \quad (1.27)$$

Среды, для которых коэффициент поглощения равен нулю или очень мал в диапазоне частот от  $\nu_1$  до  $\nu_2$  (или от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ ), в спектрофотометрии называются прозрачными в данном спектральном диапазоне.

Вещества, у которых зависимость  $k(\nu)$  резко выражена, называются селективно поглощающими. Если  $k$  практически не зависит от  $\nu$  (или от  $\lambda$ ), говорят о сером или нейтральном поглощении. Данные определения следует рассматривать как условные, т. к. одна и та же среда в одной части спектра может обладать селективным поглощением, а в другой – нейтральным (рисунки 1.5).

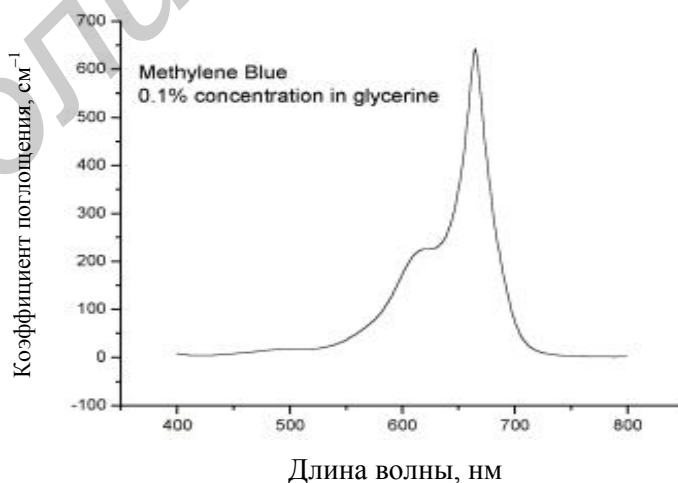


Рисунок 1.5 – Пример среды (краситель метиленовый синий): прозрачной в диапазоне 400–550 нм и селективно поглощающей в диапазоне 600–700 нм

Измерение значений коэффициентов поглощения, а также зависимостей  $k(\nu)$  является важной практической задачей. Так, например, абсолютные значения  $k$  необходимы для расчетов освещенностей различных объектов. На интерпретации спектральных зависимостей  $k(\nu)$  специализируется целая наука – спектроскопия, позволяющая обосновать особенности строения веществ. Определение  $k(\nu)$  необходимо в лазерной физике для расчета условий генерации лазеров, а также поиска новых активных сред.

Поглощающая среда также может характеризоваться величиной пропускания света.

**Пропусканием** называется отношение потока энергии излучения, прошедшего слой среды толщиной  $l$ , к величине падающего потока:

$$T(\nu) = \Phi_l(\nu) / \Phi_0(\nu) . \quad (1.28)$$

Для сред, подчиняющихся закону Бугера, пропускание  $T(\nu)$  описывается формулой

$$T(\nu) = e^{-k(\nu) \cdot l} . \quad (1.29)$$

Приведенные выше формулы для расчета поглощения и пропускания среды не учитывают отражения на границе раздела сред. Это допустимо только при очень малых значениях коэффициента отражения  $\rho$ .

По аналогии с пропусканием  $T$  коэффициент отражения на границе раздела двух сред  $\rho(\nu)$  вводится выражением

$$\rho(\nu) = \Phi_\rho(\nu) / \Phi_0(\nu) , \quad (1.30)$$

где  $\Phi_\rho(\nu)$  – поток энергии излучения, отраженного от границы раздела сред;  
 $\Phi_0(\nu)$  – поток энергии излучения, падающего на границу раздела сред.

В общем случае учет отражения на границе необходим и часто очень важен. Следует иметь в виду, что на практике реально измеряется не сам коэффициент поглощения  $k(\nu)$ , а именно пропускание среды  $T(\nu)$ . В некоторых случаях может измеряться полный коэффициент отражения от слоя  $R(\nu)$ . Поэтому переход от измеренного значения  $T(\nu)$  или  $R(\nu)$  к значению  $k(\nu)$  должен быть корректен.

При малых значениях  $\rho$  для пропускания  $T$  плоскопараллельного слоя толщиной  $l$  среды, подчиняющейся закону Бугера, справедливо выражение

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_l(\nu)}{\Phi_0(\nu)} = (1 - \rho)^2 e^{-k(\nu) \cdot l} . \quad (1.31)$$

Если значения  $\rho$  достаточно велики (например  $\rho \geq 0,10$ ), следует учитывать многократное отражение от границ слоя среды (рисунок 1.6).

В этом случае простые расчеты дают следующие выражения для пропускания  $T(\nu)$  и полного коэффициента отражения  $R(\nu)$  слоя среды толщиной  $l$ , имеющей коэффициент поглощения  $k(\nu)$ :

$$T(\nu) = \frac{(1-\rho)^2 e^{-k(\nu) \cdot l}}{1-\rho^2 e^{-2k(\nu) \cdot l}}, \quad (1.32)$$

$$R(\nu) = \rho \cdot \left[ 1 + \frac{(1-\rho)^2 e^{-2k(\nu) \cdot l}}{1-\rho^2 e^{-2k(\nu) \cdot l}} \right]. \quad (1.33)$$

При малых значениях  $\rho$  формула (1.32) переходит в формулу (1.31), а  $R=\rho$ .

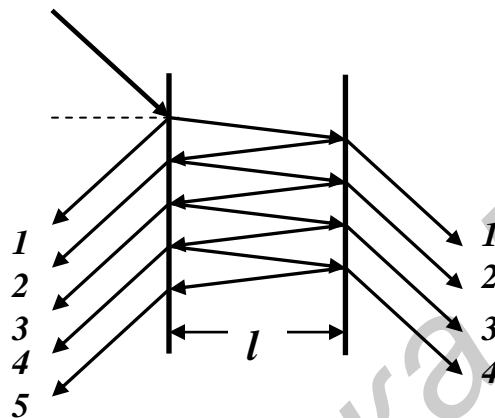


Рисунок 1.6 – К выводу формулы пропускания: многократное отражение от границ слоя среды

На практике в общем случае значение  $\rho$  неизвестно, поэтому для определения двух неизвестных  $\rho$  и  $k(\nu)$  следует измерять одновременно  $T$  и  $R$ .

Во многих случаях испускание излучения происходит не с поверхности источника, а из всего его объема. Примерами таких объемных источников излучения являются газы, дуговые разряды, активные среды лазеров и т. п. Объемное испускание может заметно влиять на энергетические и спектральные характеристики излучателя вследствие явления самопоглощения, или *реабсорбции*.

Для пояснения данного явления представим объемный источник излучения в виде цилиндра с поперечным сечением  $S$  и длиной  $l$  (рисунок 1.7).

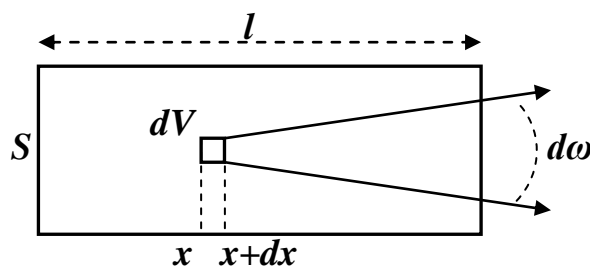


Рисунок 1.7 – К расчету потока энергии излучения от объемного источника

Поток энергии излучения  $d\Phi(\nu)$  в интервале частот  $d\nu$  от элемента объема  $dV$  равен

$$d\Phi(\nu) = \frac{F(\nu)}{4\pi} d\omega dS_n dx, \quad (1.34)$$

где  $F(\nu)$  – коэффициент, который можно назвать спектральной плотность мощности излучения единицы объема.

На пути от  $x$  до  $l$  поток  $d\Phi(\nu)$  будет поглощаться средой, т. е. будет возникать реабсорбция излучения. Учитывая самопоглощение, умножаем выражение (1.34) на  $\exp[-k(\nu) \cdot (l-x)]$  и интегрируем по всем значениям  $x$  от 0 до  $l$ . В результате для  $\Phi_l(\nu)$  получаем следующее выражение:

$$\Phi_l = \Phi_1 \frac{1 - e^{-k(\nu) \cdot l}}{k(\nu)}, \quad (1.35)$$

где  $\Phi_1(\nu)$  – поток от слоя единичной толщины.

График зависимости  $\Phi_l(\nu)$  от толщины объема  $l$  показан на рисунке 1.8.

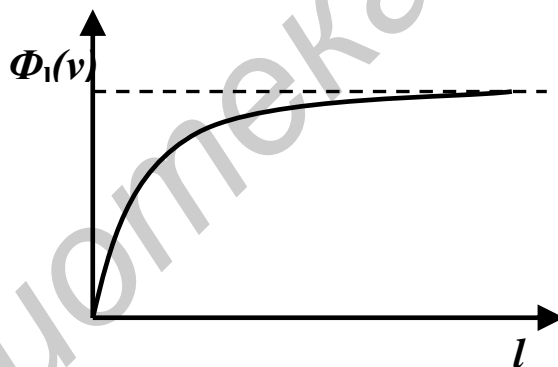


Рисунок 1.8 – Зависимость потока излучения  $\Phi_l(\nu)$  от толщины слоя  $l$  при реабсорбции

Как видно из рисунка, при малых значениях  $l$  испускаемый поток излучения равен  $\Phi_1(\nu) \cdot l$ , т. е. растет пропорционально толщине источника, а при больших  $l$  выходящий поток перестает зависеть от толщины источника. Использовать объемные источники излучения, для которых  $k(\nu) \cdot l \gg 1$ , не имеет смысла.

Наличие реабсорбции также изменяет спектр излучения, испускаемого объемным источником. При больших значениях  $k(\nu_{max})$ , т. е. при большом коэффициенте поглощения в максимуме  $\nu_{max}$  спектральной линии испускания, в центре линии испускания будет наблюдаться провал.

Во многих случаях коэффициент поглощения  $k(\nu)$  пропорционален числу поглощающих центров:

$$k(\nu) = k(\nu) \cdot C, \quad (1.36)$$

где  $C$  – концентрация поглощающих частиц (атомов, молекул).

Тогда закон Бугера может быть переписан в форме

$$\Phi_1(\nu) = \Phi_0(\nu)e^{-k(\nu) \cdot C \cdot l}. \quad (1.37)$$

Соотношение (1.37), при котором поток энергии излучения экспоненциально зависит от концентрации поглощающих частиц, носит название **закона Ламберта – Бера**.

Закон Ламберта – Бера во многих случаях может использоваться для определения концентраций веществ. Однако при больших концентрациях данный закон иногда нарушается, т. к. в среде могут образовываться иные поглощающие центры (димеры, тримеры) или возникать качественно новые процессы: например, резонансный перенос энергии возбуждения от одной молекулы к другой.

### 1.3 Фотометрические величины с учетом функции видности глаза

Выражение фотометрических величин, характеризующих поток излучения, в энергетических единицах создает основу для их объективного измерения с помощью универсальных приемников излучения, действие которых основано на поглощении энергии и ее дальнейшем превращении, например, в энергию тепловую.

Вместе с тем при повседневном восприятии света, а также во многих оптических приборах в качестве приемника излучения выступает глаз человека. Реакция человеческого глаза на поток излучения, однако, значительно отличается от реакции универсального приемника своей селективностью. Так, источник, испускающий излучение в ультрафиолетовой или инфракрасной спектральной области, несмотря на свою высокую яркость не вызовет никакого светового ощущения в глазу человека. Особенности строения глаза приводят к тому, что из всего многообразия электромагнитных волн он выделяет длины волн, соответствующие примерно 400–800 нм. Нередко термином «свет» называют излучение именно данного узкого спектрального диапазона.

Для того чтобы учесть чувствительность глаза к излучению с различными длинами волн, вводится понятие **функции видности**  $V(\lambda)$ . Из всего потока энергии излучения  $d\Phi(\lambda)$  глаз человека воспримет лишь некоторую часть, называемую **световым потоком**  $d\Phi_v(\lambda)$  и определяемую чувствительностью глаза на данной длине волны:

$$d\Phi_v(\lambda) = V(\lambda) \cdot d\Phi(\lambda) = V(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) d\lambda. \quad (1.38)$$

Интегральный световой поток, т. е. поток энергии излучения, воспринимаемый глазом, равен

$$\Phi_v = \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda. \quad (1.39)$$

Понятно, что степень чувствительности глаза к свету индивидуальна, по-

этому при введении функции видности  $V(\lambda)$  речь идет о ее средних значениях. На основании многочисленных измерений установлен вид функции видности, характеризующий средний нормальный глаз. Вид этой кривой был утвержден Международной комиссией по освещению (рус. – МКО, франц. – CIE).

Значения  $V(\lambda)$  – величины, обратно пропорциональные потокам энергии монохроматического излучения, дающим одинаковое зрительное ощущение, причем воздействие потока излучения с длиной волны  $\lambda = 555$  нм условно принимается за единицу.

Стандартизованные значения функции видности  $V(\lambda)$  для дневного зрения приведены в таблице 1.1. Значение  $V(\lambda)$  при  $\lambda = 555$  нм соответствует наибольшей чувствительности глаза к излучению с данной длиной волны. Для длин волн менее 400 нм и более 700 нм значение функции видности  $V(\lambda)$  практически равно нулю. В этой же таблице приведены значения функции видности  $V'(\lambda)$  для сумеречного периферического зрения.

Таблица 1.1 – Стандартизованные значения функций видности  $V(\lambda)$  и  $V'(\lambda)$

$\lambda$ , нм	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$	$\lambda$ , нм	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$
420	0,004	0,097	560	0,995	0,329
440	0,023	0,328	580	0,870	0,121
460	0,060	0,567	600	0,631	0,033
480	0,139	0,783	620	0,381	0,0074
500	0,323	0,982	640	0,175	0,0045
520	0,710	0,935	660	0,061	0,0003
540	0,954	0,650	680	0,017	0,00001
555	1,000	0,405	700	0,004	0,0000

На рисунке 1.9 функции видности  $V(\lambda)$  и  $V'(\lambda)$ , построенные по данным таблицы 1.1, представлены графически.

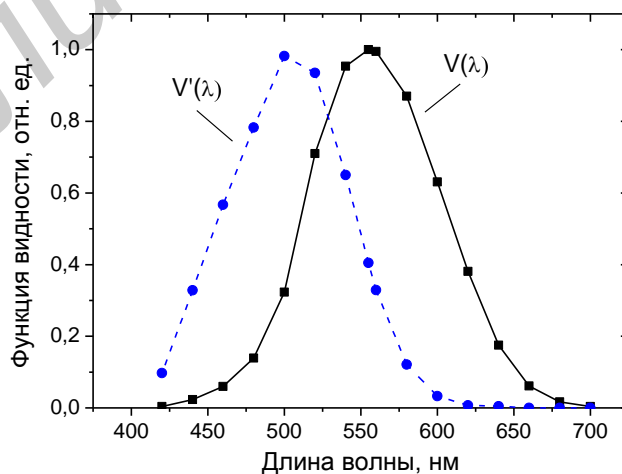


Рисунок 1.9 – Функции видности для дневного  $V(\lambda)$  и сумеречного  $V'(\lambda)$  зрения



Из рисунка 1.9 видно отличие функций  $V(\lambda)$  и  $V'(\lambda)$ . Понятно также, что поток энергии излучения и световой поток сильно отличаются друг от друга.

По аналогии со световым потоком, используя функцию видности, можно ввести остальные световые величины: светимость, освещенность, яркость и силу света.

Принимая во внимание свойства глаза, в фотометрии наряду с фотометрическими величинами, выражаемыми в энергетических единицах, используется также специфическая система световых единиц. Введение такой системы обусловлено практическими требованиями светотехники.

Исходной единицей в системе световых единиц является единица силы света  $I_v$  – кандела (кд, рус.; cd, лат.).

Международным соглашением в 1948 г. был введен световой эталон, обладающий свойствами, близкими к свойствам абсолютно черного тела. Излучателем света в эталоне служила трубка, изготовленная из плавленной окиси тория и окруженная со всех сторон платиной, находящейся при температуре отвердевания (2046,6 К). Кандела определялась как  $1/60$  силы света, излучаемого в направлении нормали с  $1/60 \text{ см}^2$  излучающей поверхности указанного эталона. Введенная таким образом единица силы света использовалась вплоть до 1979 г.

В 1979 г. на XVI Генеральной конференции по мерам и весам было принято новое определение канделы, действующее до настоящего времени.

Кандела определяется как сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц (540 ТГц или длиной волны 555 нм), энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683 \text{ Вт/ср}$ .

Единицей светового потока является люмен (лм) – поток, посылаемый источником света силой 1 кандела (кд) внутрь телесного угла, равного 1 стерadian (ср).

Единица освещенности, люкс (лк) – освещенность, соответствующая потоку в 1 люмен (лм), равномерно распределенному по площадке 1 метр квадратный.

Светимость так же, как и освещенность, выражается в люменах на квадратный метр ( $\text{лм/м}^2$ ), но эта величина относится к испускаемому потоку, а не падающему.

Единицей яркости, кандела на квадратный метр ( $\text{кд/м}^2$ ) или нит (нт), является яркость площадки, дающая силу света 1 кд с каждого квадратного метра в направлении, перпендикулярном к площадке. Наряду с единицей 1 нт на практике используется единица яркости в системе СГС 1 стильб (сб, рус.; sb, лат.). Данной яркости отвечает яркость площадки, дающая силу света 1 кд с каждого квадратного сантиметра. Таким образом,  $1 \text{ стильб} = 10^4 \text{ кд/м}^2 = 10^4 \text{ нт}$ .

Современное определение канделы позволяет связать световые и энергетические фотометрические величины. Так, для монохроматического источника с длиной волны излучения 555 нм сила света, равная 1 кд, имеет значение  $\approx 0,0015 \text{ Вт/ср}$ , а световой поток, равный 1 лм,  $\approx 0,0015 \text{ Вт}$ .

В таблице 1.2 представлены соответственные обозначения энергетических и световых единиц фотометрических величин.

Таблица 1.2 – Световые и энергетические единицы

Величина энергетическая	Величина световая	Обозначение	Единица энергетическая	Единица световая
Поток энергии излучения	Световой поток	$\Phi$	Ватт (Вт)	Люмен (лм)
Сила излучения	Сила света	$I$	Ватт на стерадиан (Вт/ср)	Кандела (кд)
Яркость излучения	Яркость	$L$	Ватт на стерадиан-квадратный метр (Вт/(ср·м <sup>2</sup> ))	Кандела/м <sup>2</sup> (кд/м <sup>2</sup> )
Энергетическая светимость	Светимость	$M$	Ватт на квадратный метр (Вт/м <sup>2</sup> )	Люмен /м <sup>2</sup> (лм/м <sup>2</sup> )
Энергетическая освещенность	Освещенность	$E$	Ватт на квадратный метр (Вт/м <sup>2</sup> )	Люкс (лк)

Излучение на частоте 540 ТГц находится вблизи максимума световой чувствительности человеческого глаза. Сила света обычной свечи примерно равна 1 кд.

В таблице 1.3 приведена для сравнения сила света различных источников излучения.

Таблица 1.3 – Сила света различных источников излучения

Источник	Поток излучения (мощность), Вт	Примерная сила света, кд
Свеча	-	1
Современная (2010 г.) лампа накаливания	100	100
Обычный светодиод	0,015–0,1	0,005–3
Сверхяркий светодиод	1	25–500
Сверхяркий светодиод с коллиматором	1	1500
Современная (2010 г.) люминесцентная лампа	22	120
Солнце	$3,83 \cdot 10^{26}$	$2,8 \cdot 10^{27}$

## 2 ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для регистрации излучения существуют разнообразные виды приемников излучения. Они различаются физическим принципом действия, чувствительностью, рабочим диапазоном длин волн, селективностью к длине волны излучения, конструктивным устройством. Различные диапазоны измеряемых мощностей или энергий излучения предполагают использование различных типов приемников.

Действие большинства приемников излучения является косвенным, т. е. они измеряют не сам поток излучения в абсолютных единицах, а реагируют на результат воздействия излучения на вещество. Поэтому при работе с приемниками излучения необходима их предварительная калибровка, осуществляемая по эталонным источникам излучения, в частности, по излучению абсолютно черного тела.

Наибольшее распространение в настоящее время получили *тепловые и фотоэлектрические* приемники излучения.

### 2.1 Тепловые приемники

Тепловые приемники излучения весьма удобны для измерений в инфракрасном диапазоне спектра. Принцип их действия состоит в следующем: при поглощении потока излучения происходит нагревание рабочего вещества приемника. Таким образом, измерение потока энергии излучения сводится к измерению температуры. В свою очередь повышение температуры из-за нагрева определяется путем измерения того или иного эффекта, зависящего от температуры. К таким эффектам относятся тепловое расширение вещества, изменение его электрического сопротивления, испарение и т. п. Градуировка приемника упрощается, если измеряемый эффект линейно зависит от величины потока излучения.

Как правило, в тепловых приемниках коэффициент поглощения рабочего вещества слабо зависит от длины волны. Такие приемники неселективны или слабо селективны, т. е. способны одинаково хорошо регистрировать излучение любого спектрального состава. Слабая селективность достигается различными способами, в частности зачернением нагреваемой поверхности. В некоторых случаях используют селективные приемники, способные регистрировать излучение только узкого спектрального диапазона.

В качестве приемников излучения, основанных на термическом расширении веществ, часто используются две тонкие металлические полоски, скрепленные вместе и обладающие различными коэффициентами теплового расширения. При нагревании система полосок изгибается, а измерение изгиба производится достаточно просто.

Другой тип теплового приемника основан на зависимости электрического сопротивления  $R$  от температуры. Приборы, работающие на данном принципе, называются *боллометрами*. Основным элементом болометра – тонкая проводящая

полоска. При поглощении падающего излучения электрическое сопротивление  $R$  полоски изменяется. Изменение  $R$  измеряется с высокой точностью в электрической схеме. В качестве рабочих веществ в болометрах используются металлы и некоторые полупроводники.

Порог чувствительности обычных металлических болометров лежит в диапазоне  $10^{-10}$ – $10^{-8}$  Вт. Чувствительность полупроводниковых болометров выше. Кроме того, ее можно повысить путем охлаждения полупроводника. Особо высокая чувствительность достигается в сверхпроводниковых болометрах, т. к. в сверхпроводящем состоянии температурный коэффициент сопротивления очень велик.

Болометры широко применяются для измерений в видимой и инфракрасной областях спектра. Использование данного типа приемника во многом способствовало развитию инфракрасной спектроскопии.

К тепловым приемникам излучения, широко используемым на практике, относятся также *термопары*. В основе работы термопары лежит известный эффект Зеебека. Термопара представляет собой два разнородных проводника, соединенных точечным контактом. При нагревании области контакта на свободных концах термопары возникает разность потенциалов.

При использовании термопары в качестве фотоприемника измеряемый поток излучения падает на зачерненный спай термопары и нагревает его, при этом в электрической цепи возникает термоЭДС. Площадь приемной площадки термопары обычно менее  $1 \text{ мм}^2$ .

Порог чувствительности термопар достигает  $5 \cdot 10^{-11}$  Вт. Так же как и для болометров, он ограничен флуктуационными изменениями температуры приемных элементов, т. е. тепловым шумом. Для обеспечения высокой чувствительности при работе с термопарами устраняют все возможные источники потери тепла. Термопару помещают в сосуды, из которых откачивается воздух, с прозрачными для излучения окнами. При работе в ближней и средней инфракрасных областях окна сосудов изготавливают из флюорита, который прозрачен для излучения с длинами волн до  $9 \text{ мкм}$ . При работе в более далекой ИК-области входные окна изготавливают из бромистого калия (KBr).

Из-за инерционности тепловых процессов время установления показаний тепловых приемников сравнительно велико.

Нагрев и охлаждение рабочего вещества описывается выражением

$$\Delta T = \frac{k\Phi}{\chi} \cdot [1 - e^{-t/\tau}] \quad (2.1)$$

или

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau}, \quad (2.2)$$

где  $k$  – коэффициент поглощения;  
 $\chi$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $C$  – теплоемкость приемника;  
 $\tau = C/\chi$  – постоянная времени.

Для различных типов тепловых приемников значение  $\tau$  варьируется. Однако наиболее часто  $\tau$  составляет порядка миллисекунд.

Таким образом, из-за инерционности тепловые приемники не могут применяться для измерения быстро меняющихся по величине потоков излучения, в частности для измерения энергии световых импульсов.

Ниже приведены примеры исполнения современных тепловых приемников излучения, в частности, датчиков фирмы Thorlabs – одного из ведущих мировых производителей оборудования в области оптических измерений.

На рисунке 2.1 показан внешний вид тепловых датчиков оптической мощности излучения (потока излучения). Тепловой датчик представляет собой только приемную часть измерителя мощности, который состоит из датчика и электронного управляющего устройства – консоли или панели управления.



Рисунок 2.1 – Тепловые датчики мощности излучения (производитель Thorlabs)

Данные тепловые датчики вырабатывают напряжение, пропорциональное входной оптической мощности. Индивидуальная чувствительность каждого датчика записана в его памяти EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – электрически стираемая память), откуда считывается консолью (панелью управления). Консоли измерителей мощности фирмы Thorlabs распознают тип присоединенного датчика и его чувствительность. Измеренный выходной сигнал зависит от типа датчика. Консоль рассчитывает оптическую мощность излучения, падающего на датчик, в зависимости от выходного напряжения датчика и его чувствительности.

Консоли измерителей мощности фирмы Thorlabs могут дополнительно показывать фототок или напряжение, генерируемые датчиком. Эквивалент измеренной величины также обеспечивается аналоговым выходом.

Тепловые датчики производителя Thorlabs основаны на термопарах, т. е. используют принципы термоэлектрического эффекта (эффект Зеебека), который, как упоминалось ранее, состоит в том, что любой проводник, подвергнутый температурному градиенту, генерирует напряжение. Следовательно, если между двумя поверхностями имеется разность температур, температурный градиент будет генерировать разность потенциалов между этими двумя поверхностями. Этот процесс может рассматриваться как инверсный (обратный) по от-

ношению к эффекту Пелтье. Конструктивное устройство термопары датчика мощности излучения показано на рисунке 2.2.

Мощность падающего лазерного пучка поглощается приемной поверхностью термопары (absorber) и конвертируется в тепло. Другая поверхность термопары (cold side) остается холодной, поскольку она термически связана с радиатором датчика. Градиент температуры между двумя поверхностями зависит от падающей оптической мощности. Таким образом, напряжение, генерируемое между горячей и холодной поверхностями, пропорционально падающей мощности.



Рисунок 2.2 – Конструктивное устройство термопары датчика мощности излучения фирмы Thorlabs (absorber – поглотитель, cold side – холодная сторона, leads – электрические контакты)

Преобразование оптической мощности в измеряемое напряжение зависит от способности поверхности датчика поглотить оптическую мощность и преобразовать ее в тепло. Для того чтобы увеличить поглощение, на чувствительную поверхность приемника наносят специальное покрытие. Чувствительность покрытия предпочтительно не должна зависеть от длины волны (т. е. эффективность поглощения должна быть независимой от длины волны), и покрытие должно иметь высокий порог повреждения (т. е. способность выдерживать высокие плотности оптической мощности).

Термопара сама по себе нечувствительна к длине волны излучения. Она только преобразует тепло в напряжение. Однако поглощающее покрытие проявляет зависимость от длины волны, т. к. поверхность покрытия отражает небольшую долю падающего света, а отражение в некоторой степени зависит от длины волны. Поскольку покрытие не является прозрачным, оно не пропускает свет, и с очень хорошим приближением эффективность процесса преобразования зависит только от коэффициентов отражения  $R$  и поглощения  $A$ , которые связаны условием  $R + A = 1$  или  $A = 1 - R$ . Следовательно, поглощательная способность есть функция длины волны, и может быть рассчитана путем измерения зависимости отражения от длины волны в некотором диапазоне длин волн.

К тепловым датчикам относятся также датчики энергии излучения, принцип действия которых основан на *пироэлектрическом эффекте*.

Пироэлектрический эффект состоит в изменении спонтанной поляризованности некоторых диэлектриков при изменении температуры. Известно, что диэлектрик, помещенный во внешнее электрическое поле, поляризуется под действием этого поля. Поляризацией диэлектрика называется процесс приобретения им отличного от нуля макроскопического дипольного момента. Степень поляризации диэлектрика характеризуется векторной величиной, которая называется *поляризованностью*, или *вектором поляризации* ( $\mathbf{P}$ ). Поляризованность  $\mathbf{P}$  определяется как электрический момент единицы объема диэлектрика:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i, \quad (2.3)$$

где  $N$  – число молекул в объеме  $\Delta V$ .

Поляризованность  $\mathbf{P}$  часто называют поляризацией, понимая под этим количественную меру этого процесса.

Спонтанная поляризованность  $\mathbf{P}_0$  может существовать только при достаточно низкой симметрии кристалла. Диэлектрики, в которых наблюдается данный эффект, называются пироэлектриками. Пироэлектрики спонтанно поляризованы, причем в отличие от сегнетоэлектриков направление их поляризации не может быть изменено внешним электрическим полем. При неизменной температуре спонтанная поляризованность пироэлектрика скомпенсирована свободными зарядами противоположного знака за счет процессов электропроводности и адсорбции заряженных частиц из окружающей атмосферы. При изменении температуры спонтанная поляризованность изменяется, что приводит к освобождению некоторого заряда на поверхности пироэлектрика, благодаря чему в замкнутой цепи возникает электрический ток.

К типичным пироэлектрикам относятся, например, турмалин и сульфат лития. Значительным пироэффектом обладают некоторые сегнетоэлектрические кристаллы: ниобат бария-стронция, триглицинсульфат – ТГС, ниобат и танталат лития. Пироэлектрический эффект проявляется также в поляризованной, т. е. подвергнутой действию постоянного электрического поля, сегнетокерамике, а также у некоторых полимеров, например у поляризованных поливинилденфторида и поливинилденхлорида.

Пироэлектрический эффект используется для создания тепловых датчиков и приемников энергии излучения.

Внешний вид датчиков энергии (производитель Thorlabs) и приемной площадки датчика показан на рисунке 2.3.

Датчики энергии вырабатывают пиковое напряжение, которое пропорционально энергии импульса излучения. Индивидуальная чувствительность датчика сохраняется в его памяти (EEPROM). После распознавания типа пиродатчика консоль автоматически определяет пиковое напряжение и рассчитывает энергию в импульсе с учетом чувствительности датчика.

В пироэлектрических датчиках прямое преобразование энергии импульса излучения в импульсное напряжение происходит независимо от длины волны падающего излучения. Каждый пироэлектрический датчик покрыт черным по-

глощающим слоем, обеспечивающим практически постоянное поглощение в диапазоне от 185 нм до 25 мкм. Эти детекторы обладают относительно высокой чувствительностью. Без дополнительных усилителей пиродатчики позволяют измерять лазерные импульсы в диапазоне микрожоулей.



а – типы датчиков; б – приемная площадка

Рисунок 2.3 – Тепловые датчики энергии излучения фирмы Thorlabs (heat sink – теплоотвод, detector surface (absorber) – поверхность детектора (поглотитель))

Максимальная частота следования импульсов зависит от внутреннего емкостного сопротивления детектора, а также значения нагрузочного резистора. Все детекторы производителя Thorlabs могут быть непосредственно присоединены с помощью соответствующего коннектора к входу осциллографа 1 МОм. При использовании нагрузочных резисторов малых значений (100 кОм) можно проводить измерения при частоте следования импульсов вплоть до 100 Гц.

## 2.2 Фотоэлектрические приемники

В основе работы фотоэлектрических приемников излучения лежат явления внутреннего или внешнего фотоэффекта.

**Внешний фотоэффект** наблюдается в металлах и некоторых полупроводниках. При падении излучения на их поверхность некоторая доля подающего потока поглощается. Энергия поглощенного фотона, равная  $h\nu$ , передается электрону внутри металла, при этом кинетическая энергия электрона увеличивается. При некоторых условиях она может превысить работу выхода  $A$  электрона из металла, необходимую для преодоления потенциального барьера.

Кинетическая энергия электрона вне металла равна

$$\frac{m\nu^2}{2} = \frac{m\nu_0^2}{2} + h\nu - A, \quad (2.4)$$

где  $m$  – масса электрона;

$\nu$  и  $\nu_0$  – соответственно скорости электрона вне металла и внутри него до поглощения света.



Энергия электронов, преодолевших потенциальный барьер и вышедших из металла, линейно зависит от частоты  $\nu$  падающего излучения, а их число – от числа падающих фотонов, т. е. от интенсивности света.

Из уравнения (2.4) следует, что явление внешнего фотоэффекта носит пороговый характер и при энергии фотона  $h\nu < A$  отсутствует.

Условие  $h\nu_{гр} = A$  определяет «красную границу» фотоэффекта.

Граничные длины волн  $\lambda_{гр}$  для некоторых металлов представлены в таблице 2.1.

Наличие красной границы внешнего фотоэффекта затрудняет создание приемников данного типа для инфракрасной области спектра. Для увеличения граничной длины волн  $\lambda_{гр}$  ведется поиск новых сред. Продвинуться в инфракрасную область позволяют соединения свинца (PbS, PbSe, PbTe), антимониды индия (InSb), легированные германием и кремнием, окисел цезия (Cs<sub>2</sub>O).

Таблица 2.1 – Длины волн, соответствующие красной границе фотоэффекта, для некоторых металлов

Металл	Длина волны, мкм
Платина (Pt)	0,19
Никель (Ni)	0,25
Медь (Cu)	0,30
Цинк (Zn)	0,30
Натрий (Na)	0,60
Цезий (Cs)	0,90

Фотоэлектрический приемник излучения, работающий на принципе внешнего фотоэффекта, – **фотоэлемент** – конструктивно устроен следующим образом (рисунок 2.4).

На одну из стенок вакуумированной колбы нанесен фоточувствительный слой – фотокатод, на который падает измеряемое излучение. Внутри колбы размещен анод. При освещении катода между анодом и катодом появляется фототок. При постоянном значении потока излучения  $\Phi$  фототок  $i$  зависит от разности потенциалов  $\Delta V$  между анодом и катодом. По мере увеличения  $\Delta V$  фототок достигает насыщения, при котором все электроны, вышедшие из катода под действием излучения, достигают анода. Как правило, значение фототока измеряется в условиях насыщения. Величина тока дает информацию о величине падающего потока излучения.

Величина

$$\eta = n / N, \quad (2.5)$$

где  $N$  – число падающих фотонов;

$n$  – число электронов, вышедших из катода, называется квантовым выходом фотоэффекта.

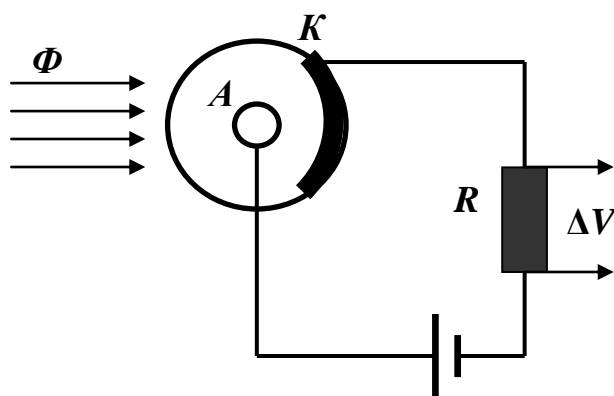


Рисунок 2.4 – Измерение светового потока с помощью фотоэлемента

При  $\nu < \nu_{\text{гр}}$  квантовый выход равен нулю. С увеличением частоты  $\nu$  значение  $\eta$  увеличивается. Зависимость  $\eta(\nu)$  может иметь выраженные максимумы, в этом случае фотоэлемент селективен, т. е. настроен на определенную длину волны излучения.

Если на катод падает поток монохроматического излучения  $\Phi_\nu$ , количество электронов, вышедших из катода, равно

$$n = \frac{\eta(\nu)}{h\nu} \Phi_\nu . \quad (2.6)$$

При этом в цепи фотоэлемента возникает ток:

$$i = e \cdot n = \eta(\nu) \cdot \frac{e}{h\nu} \cdot \Phi_\nu . \quad (2.7)$$

Для монохроматического излучения значение фототока линейно зависит от величины потока излучения.

$$i = S(\nu) \cdot \Phi_\nu . \quad (2.8)$$

Величина  $S(\nu)$  спектра) =  $\frac{e}{h\nu} \eta(\nu)$  называется спектральной чувствительностью фотокатода. Если функция  $S(\nu)$  известна, то, измерив значение фототока  $i$ , можно найти  $\Phi_\nu$ .

Вид функции  $S(\nu)$  определяется предварительной градуировкой фотокатода.

Если на фотоэлемент падает излучение сложного спектрального состава, то значение фототока

$$i = \int_0^\infty S(\nu) \Phi(\nu) d\nu . \quad (2.9)$$

Отношение  $i/\Phi$ , где  $\Phi = \int \Phi(\nu) d\nu$ , называется интегральной чувствительностью катода. Оно сильно зависит от спектрального состава измеряемого из-

лучения. Типичные значения интегральной чувствительности в зависимости от материала фотокатодов лежат в диапазоне 10–100 мкА/лм.

Во всех фотоэлементах при  $\Phi=0$  существует темновой ток, обусловленный термоэмиссией с катода. Темновой ток определяет порог чувствительности фотоэлемента.

Время пролета электронов от катода к аноду определяет быстродействие фотоэлемента. Постоянная времени фотоэлементов обычно составляет 3–5 нс.

К фотоэлектрическим приемникам, основанным на **внутреннем фотоэффекте**, относятся фотосопротивления или фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы.

**Фоторезисторы** являются наиболее простым типом приемников излучения с внутренним фотоэффектом. Действие фоторезисторов основано на явлении фотопроводимости, которое характерно для полупроводников. До освещения полупроводника ток через него практически отсутствует, т. к. большинство электронов находится в валентной зоне. При падении на полупроводник излучения частотой  $\nu > \nu_{\text{гр}}$  ( $\nu_{\text{гр}}$  – граничная частота, определяемая шириной запрещенной зоны) часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости. Число переходов зависит от величины падающего потока излучения  $\Phi$ . Под действием внешнего напряжения электроны, находящиеся в зоне проводимости, начинают перемещаться от катода к аноду, в результате возникает ток проводимости.

Для изготовления фоторезисторов применяют полупроводниковые материалы в виде поликристаллических пленок, спеченных/спрессованных таблеток, монокристаллических пластинок. К концам полупроводника подводятся электроды. Схематическая конструкция фоторезистора с омическими контактами показана на рисунке 2.5.

Для изготовления фоторезисторов наиболее часто используются следующие полупроводниковые соединения: PbTe, Bi<sub>2</sub>S, BiSe, CdS, InSb, PbS, PbSe, а также селен (Se) и германий (Ge) с примесями меди (Cu), цинка (Zn) и других металлов.

Для многих полупроводников ширина запрещенной зоны составляет 1–2 эВ, что соответствует граничным длинам волн 600 нм – 1,2 мкм. Однако, благодаря использованию примесных полупроводников, длины волн регистрируемого излучения могут быть смещены в большую сторону. Поскольку уровни примесей могут лежать внутри запрещенной зоны полупроводника, будут поглощаться кванты излучения меньших частот. Многие примесные полупроводники (например PbSe или PbTe) способны регистрировать инфракрасное излучение с длинами волн 5–6 мкм.

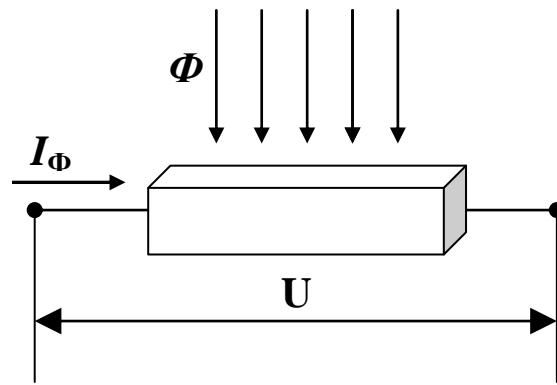


Рисунок 2.5 – Схематическая конструкция фоторезистора

Спектральные характеристики фоторезисторов носят селективный характер, специфический для различных соединений. Наиболее высокая селективность и избирательность спектральной чувствительности присуща фоторезисторам, изготовленным на основе монокристаллов, поскольку их структура наиболее совершенна и однородна. Для повышения чувствительности фоторезисторы иногда охлаждают, уменьшая тем самым равновесную концентрацию носителей тока. При этом могут изменяться некоторые параметры. Например, у сернисто-свинцовых (PbS) фоторезисторов при охлаждении граница спектральной чувствительности смещается в длинноволновую область до 4–5 мкм (рисунок 2.6).

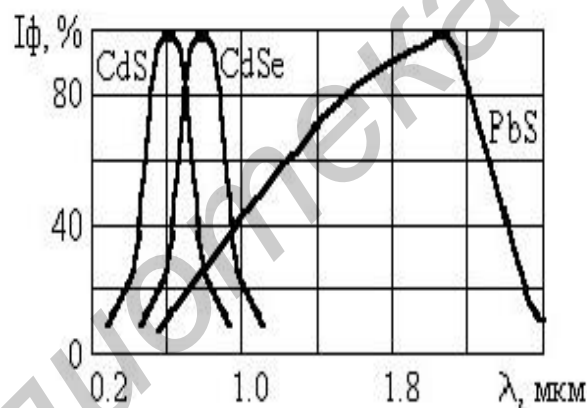


Рисунок 2.6 – Спектральные характеристики фоторезисторов

Фототок увеличивается с ростом освещенности фоторезистора, однако в общем случае зависимость  $i=f(\Phi)$  при неизменном внешнем напряжении носит нелинейный характер. Это требует калибровки фоторезистора.

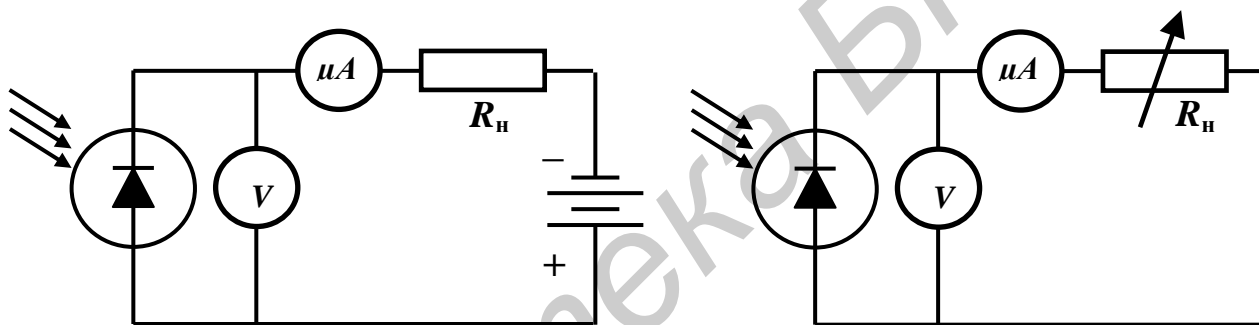
Интегральная чувствительность фотосопротивлений велика. Например, для CdSe порядка 12 000 мкА/лм.

Среднее значение постоянной времени фоторезисторов лежит в диапазоне от единиц микросекунд до сотен миллисекунд. Это время определяется вероятностями переходов между валентной зоной или примесными уровнями и зоной проводимости. С ростом освещенности инерционность уменьшается, причем сильнее при малых уровнях освещенности. Это, в первую очередь, связано с увеличением проводимости.

К преимуществам фоторезисторов следует отнести относительную дешевизну изготовления, широту перекрываемых номиналов, простоту выполнения фоточувствительных элементов со сложной конфигурацией, а также высокую технологическую совместимость с порошковыми и пленочными электролюминесцентными излучателями. Недостатками фоторезисторов являются значительная инерционность, температурная и временная нестабильность характеристик.

Основным элементом **фотодиодного приемника (фотодиода)** является полупроводниковый *p-n*-переход. Когда фотоны определенной энергии падают на *p-n*-переход, в его области происходит генерация электронно-дырочных пар. Электрическое поле *p-n*-перехода разделяет неравновесные носители заряда, что приводит к появлению тока. Ток, образованный неравновесными носителями, совпадает по направлению с обратным током *p-n*-перехода.

Фотодиоды как приемники излучения могут работать в двух режимах – фотопроводимости (фотодиодном) и генерации фотоЭДС (вентильном). Схемы включения фотодиода в этих режимах показаны на рисунке 2.7.



а – фотодиодный режим; б – фотовентильный режим

Рисунок 2.7 – Схемы включения диода

В фотодиодном режиме на *p-n*-переход подается обратное напряжение, и величина обратного тока через *p-n*-переход зависит от интенсивности падающего света. Обратное смещение значительно уменьшает время реакции на падающие фотоны. Поэтому фотодиодный режим используется в высокоскоростных фотодетекторах. Недостатком фотодиодного режима является температурная зависимость тока фотодиода.

В вентильном режиме *p-n*-переход сам используется в качестве источника ЭДС или тока. При этом анод и катод фотодиода присоединяются к нагрузке.

При измерениях мощности излучения фотодиодные датчики обычно используются в вентильном режиме. Анод и катод присоединяются к входу трансимпедансного усилителя, который преобразует фототок в напряжение. Фотодиод может вырабатывать ток до нескольких мА. Чувствительность фотодиода есть отношение произведенного тока к падающей оптической мощности и обычно выражается в А/Вт. Чувствительность зависит от материала, из которого изготовлен фотодиод, а также от длины волны падающего оптического из-

лучения. Максимальный выходной ток фотодиода ограничивается линейной частью характеристической кривой  $I_{PD} = f(P_{onm})$ , или другими словами, насыщением.

Внешний вид современных фотодиодных датчиков различных конструктивных типов показан на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Фотодиодные датчики производителя Thorlabs

Для увеличения максимальной измеряемой мощности до десятков милливатт перед фотодиодом располагается ослабитель (аттенюатор). Обычно аттенюатор представляет собой нейтральный фильтр. Как и чувствительность фотодиода, оптическая плотность нейтрального фильтра также зависит от длины волны. С течением времени чувствительность фотодиода может изменяться в результате старения. Для очень малых диаметров пучка излучения вариации в однородности фотодиода могут вести к различиям выходного тока. Кроме того, если активная площадь фотодиодного датчика переполнена, результатом также могут быть неправильные данные.

Современные фотодиодные приемники оснащены электронными панелями управления, позволяющими определять мощность падающего излучения с учетом индивидуальной чувствительности датчика. Фотодиодный датчик (фотодиод) вырабатывает ток, который зависит от оптической мощности и длины волны падающего пучка. Этот ток питает трансимпедансный (transimpedance) усилитель, который вырабатывает напряжение, пропорциональное входному току. Индивидуальные калибровочные данные фотодиода (чувствительность в зависимости от длины волны) хранятся в EEPROM – электрически стираемой памяти, в коннекторе датчика. Поскольку чувствительность фотодиода зависит от длины волны, для получения правильных измерений должна быть введена фактическая длина волны. Консоль измерителя мощности определяет чувствительность датчика для входной длины волны из присоединенного датчика и рассчитывает оптическую мощность из измеренного фототока.

Внешний вид приемной площадки фотодиодного датчика показан на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Внешний вид приемной площадки фотодиодного датчика (производитель Thorlabs)

Типичные свойства фотодиодов в зависимости от материала приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Свойства фотодиодов, изготовленных из различных материалов (по данным Thorlabs)

Материал фотодиода	Диапазон длин волн	Максимальная измеряемая мощность
Si - UV <sup>a</sup>	200–1000 нм	3–5 мВт
Si	400–1100 нм	
Ge	700–1800 нм	
InGaAs	800–1700 нм	

### 2.3 ПЗС-матрицы

В настоящее время для измерения пространственного распределения потока энергии падающего излучения широкое распространение получили ПЗС-линейки и ПЗС-матрицы. Аббревиатура ПЗС – прибор с зарядовой связью (англ. *CCD* – Charge Coupled Device) – является общим обозначением класса полупроводниковых приборов, в которых применяется технология управляемого переноса заряда в объеме полупроводника.

Наиболее яркими представителями приборов данного класса являются ПЗС-линейки и матрицы. Данный тип приборов в настоящее время имеет очень широкий круг применения в самых различных оптоэлектронных устройствах для регистрации изображения, в том числе в фотометрии и спектрофотометрии. ПЗС-матрицы используются в цифровых фотоаппаратах, кинокамерах, различных сканерах, а также находят ряд других важных применений. За это изобре-

тение американским ученым У. Бойлу и Дж. Смиту была присвоена Нобелевская премия 2009 года.

В основе работы ПЗС-матрицы или ПЗС-линейки в качестве приемника излучения, так же как и в основе фотодиода, лежит внутренний фотоэлектрический эффект. Однако между фотодиодом, имеющим светочувствительную площадку и два электрических контакта для съема электрического сигнала, и ПЗС-приемником имеются важные отличия.

Во-первых, светочувствительных площадок (их называют пикселями - элементами, принимающими свет и преобразующими его в электрические заряды) в ПЗС-приемнике очень много, от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч, в отдельных случаях до нескольких миллионов.

Размеры отдельных пикселей одинаковы и составляют от единиц до десятков микрометров. Пиксели могут быть выстроены в один ряд – тогда приемник называется ПЗС-линейкой, или рядами заполнять участок поверхности – тогда приемник называется ПЗС-матрицей (рисунок 2.10).

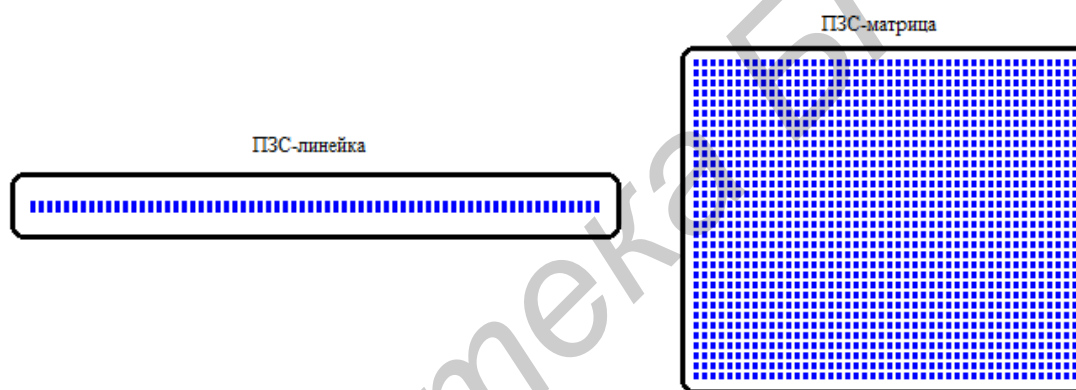


Рисунок 2.10 – Расположение светоприемных элементов в ПЗС-линейке и ПЗС-матрице

Во-вторых, в ПЗС-приемнике, внешне похожем на обычную микросхему (рисунок 2.11), нет огромного числа электрических контактов для вывода электрических сигналов от каждого светоприемного элемента. Вместо этого к ПЗС-приемнику подключается электронная схема, которая позволяет извлекать с каждого светочувствительного элемента электрический сигнал, пропорциональный его засветке.



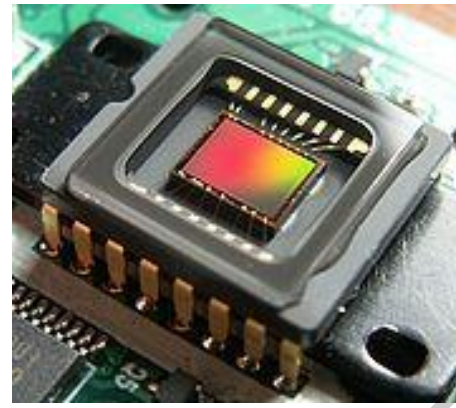
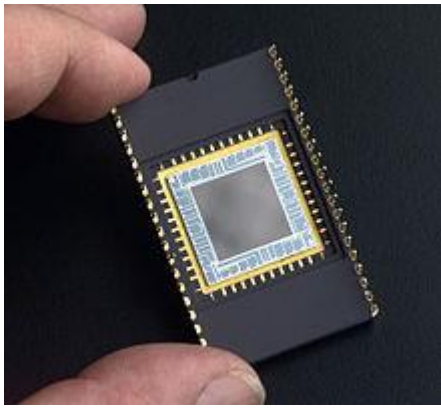


Рисунок 2.11 – ПЗС-приемник

В общем виде конструкция ПЗС-элемента выглядит следующим образом (рисунок 2.12): кремниевая подложка  $p$ -типа оснащается каналами из полупроводника  $n$ -типа. Над каналами создаются электроды из поликристаллического кремния с изолирующей прослойкой из оксида кремния. После подачи на такой электрод электрического потенциала в обедненной зоне под каналом  $n$ -типа создается потенциальная яма, назначение которой – хранить электроны.

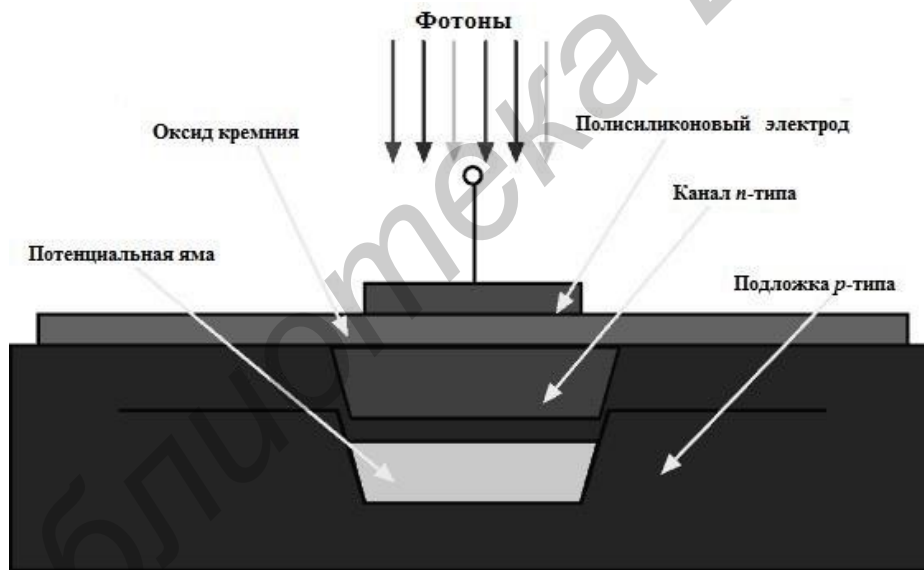


Рисунок 2.12 – Светочувствительный элемент ПЗС-матрицы (электроды переноса заряда не показаны)

Как и в фотодиоде, заряд элемента ПЗС-матрицы возникает благодаря внутреннему фотоэффекту. Фотон, проникающий в кремний, приводит к генерации электрона, который «притягивается» потенциальной ямой и остается в ней. В течение заданного интервала времени каждый пиксель постепенно заполняется электронами пропорционально количеству попавшего в него света. Большее количество фотонов (большая освещенность пикселя) обеспечивает больший заряд ямы. По окончании времени экспозиции электрические заряды,

накопленные каждым пикселем, по очереди передаются на «выход» прибора и измеряются. Это обеспечивается определенной структурой кристалла в местах расположения светочувствительных элементов и электрической схемой управления.

Считывание зарядов ПЗС-элементов осуществляется так называемыми **последовательными регистрами сдвига**, которые преобразовывают строку зарядов на входе в серию импульсов на выходе. Данная серия представляет собой аналоговый сигнал, который в дальнейшем поступает на усилитель и затем оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Таким образом, при помощи регистра можно преобразовать в аналоговый сигнал заряды строки из ПЗС-элементов. Фактически последовательный регистр сдвига в ПЗС-линейках реализуется с помощью самих же ПЗС-элементов, объединенных в строку. Работа устройства базируется на способности приборов с зарядовой связью обмениваться зарядами своих потенциальных ям. Обмен осуществляется благодаря наличию специальных электродов переноса (*transfer gate*), расположенных между соседними ПЗС-элементами. При подаче на ближайший электрод повышенного потенциала заряд «перетекает» под него из потенциальной ямы. Между ПЗС-элементами могут располагаться от двух до четырех электродов переноса, от их количества зависит «фазность» регистра сдвига, который может называться двухфазным, трехфазным либо четырехфазным.

Подача потенциалов на электроды переноса синхронизирована таким образом, что перемещение зарядов потенциальных ям всех ПЗС-элементов регистра происходит одновременно. И за один цикл переноса ПЗС-элементы как бы «передают по цепочке» заряды слева направо (или же справа налево). Крайний ПЗС-элемент отдает свой заряд устройству, расположенному на выходе регистра, т. е. усилителю.

Практически точно так же работает и ПЗС-матрица. В целом последовательный регистр сдвига является устройством с параллельным входом и последовательным выходом. Поэтому после считывания всех зарядов из регистра есть возможность подать на его вход новую строку, затем следующую и таким образом сформировать непрерывный аналоговый сигнал на основе двумерного массива фототоков. В свою очередь входной параллельный поток для последовательного регистра сдвига (т. е. строки двумерного массива фототоков) обеспечивается совокупностью вертикально ориентированных последовательных регистров сдвига, которая именуется **параллельным регистром сдвига**. Вся конструкция в целом и представляет собой ПЗС-матрицу. Рисунок 2.13 поясняет работу ПЗС-матрицы.

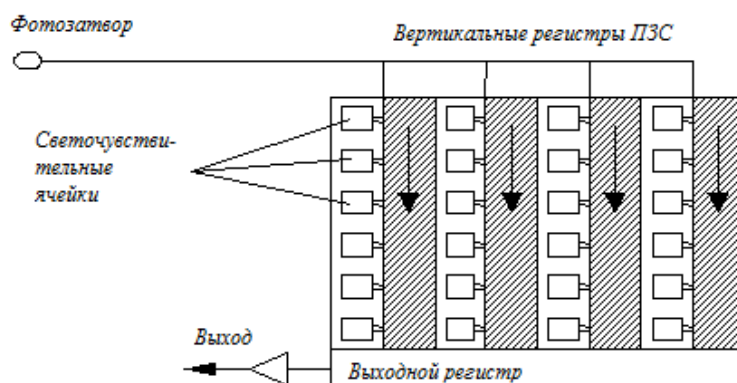


Рисунок 2.13 – ПЗС-матрица со строчным переносом

«Вертикальные» последовательные регистры сдвига, составляющие параллельный регистр, называются столбцами ПЗС-матрицы, а их работа полностью синхронизирована. Двухмерный массив фототоков ПЗС-матрицы одновременно смещается вниз на одну строку, причем происходит это только после того, как заряды предыдущей строки из расположенного «в самом низу» последовательного регистра сдвига ушли на усилитель. До освобождения последовательного регистра параллельный вынужден простаивать. Сама ПЗС-матрица подключается к микросхеме (или их набору), подающей потенциалы на электроды как последовательного, так и параллельного регистров сдвига, а также синхронизирующей работу обоих регистров. Кроме того, работа устройства управляется тактовым генератором.

Рассмотренный тип ПЗС-приемника является наиболее простым с конструктивной точки зрения и называется *полнокадровой ПЗС-матрицей (full frame CCD-matrix)*. Помимо микросхем «обвязки» данный тип матриц нуждается в механическом затворе, перекрывающем световой поток после окончания экспозиции. До полного закрытия затвора считывание зарядов начинать нельзя, т. к. при рабочем цикле параллельного регистра сдвига к фототоку каждого из его пикселей добавятся лишние электроны, вызванные попаданием фотонов на открытую поверхность ПЗС-матрицы.

В последние годы на основе новой конкурентной технологии разрабатываются также так называемые CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor), или КМОП (комплементарная логика на транзисторах металл – оксид – полупроводник) матрицы. Их основные достоинства – низкая стоимость производства, низкое энергопотребление и высокое быстродействие. Данная технология в настоящее время быстро совершенствуется.

## 3 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

### 3.1 Что изучает колориметрия?

Цвет – одно из свойств материальных объектов, воспринимаемое благодаря ощущениям, возникающим в зрительном аппарате глаза. Человек, зрительно воспринимая окружающие его предметы, способен обнаружить их различия и сходства не только по форме, но также и по цвету. Число цветов, воспринимаемых глазом человека, невероятно велико. Их изучению посвящена особая наука, называемая цветоведением. Раздел цветоведения, связанный непосредственно с количественным измерением цветов, называется колориметрией.

Само слово «колориметрия» происходит от латинских слов *color* – цвет и *metrum* – мера, следовательно, колориметрия – наука об измерении цвета.

Для современных технологических процессов качественная оценка цветов оказывается недостаточной. Нужны строгие количественные характеристики, позволяющие однозначно обозначать любой цвет, измерять и воспроизводить его. В колориметрии цвет – некоторая физическая величина, которая может быть измерена с точностью, принципиально не отличающейся от точности, с которой измеряют другие физические величины вроде массы, силы тока или скорости.

Восприятие цвета неразрывно связано со светом. Без света цвет не воспринимается. Более того, при слишком слабом свете восприятие окружающего мира оказывается нецветным. Таким образом, свет – предпосылка цветового восприятия.

В реальной жизни различные тела или поверхности могут светиться, отражать или рассеивать свет, поглощать его, быть прозрачными. Два типичных случая цветовых ощущений от предметов приведены на рисунке 3.1.

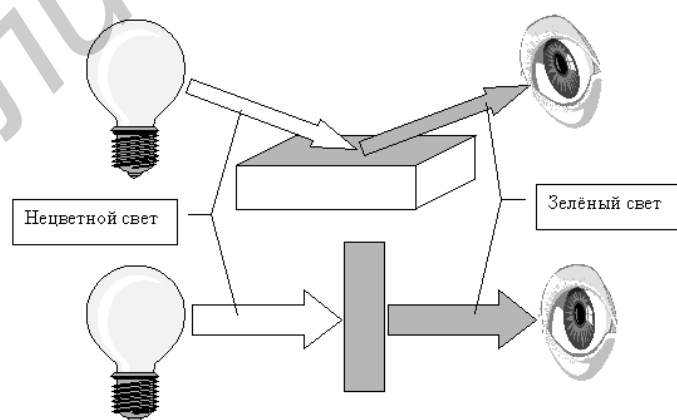


Рисунок 3.1 – Восприятие света при отражении (вверху) и пропускании (внизу) света окрашенными объектами

В первом случае естественный (белый или ахроматический) свет падает на объект, рассматриваемый наблюдателем под некоторым углом. Во втором случае наблюдатель рассматривает источник света через светофильтр. В первом случае цвет поверхности объекта возникает в результате избирательного отражения или рассеивания ахроматического света, во втором – в результате избирательного поглощения. В обоих случаях из спектра белого света удаляется часть излучения с определенными длинами волн. Свет, достигший глаза наблюдателя, вызывает соответствующее цветовое ощущение.

Цвет светового потока, безусловно, связан с его длиной волны. Однако эта связь неоднозначна. Видимый свет (излучение, вызывающее визуальные ощущения) представляет собой лишь относительно небольшую часть спектра электромагнитных волн, занимающую диапазон длин волн примерно от 380 до 760 нм. При этом изменение длины волны монохроматического излучения от 380 до 450 нм не вызывает ощущения изменения цвета. Световой поток кажется фиолетовым. Изменение длин волн от 450 до 590 нм вызывает ощущение последовательного изменения цвета от фиолетового к синему, голубому, зеленому, желтому, оранжевому. Причем в сине-голубой области спектра цвет изменяется быстро, а в зеленой области спектра изменение длины волны ведет к более медленному изменению цвета. Участок спектра от 600 нм до инфракрасной границы одинаково воспринимается красным.

Еще более сложные ощущения возникают при воздействии на глаз световых потоков более сложного спектрального состава, например, содержащих излучение двух или более длин волн.

Такие особенности цветового зрения человека связаны с устройством зрительного аппарата глаза, прежде всего его рецепторного аппарата.

### **3.2 Устройство рецепторного аппарата глаза**

Орган зрения человека состоит из двух глазных яблок, двух глазных нервов и части мозга, принимающей и перерабатывающей передаваемую нервами информацию. Зрительный нерв, идущий от каждого глаза, содержит более миллиона нервных волокон.

Внутренняя оболочка глазного яблока – сетчатка, или ретина, имеет в свою очередь сложное строение и состоит из многих слоев. Наиболее важно то, что в сетчатке находятся светочувствительные клетки – фоторецепторы: палочки и колбочки. Фоторецепторы поглощают падающий на них свет и преобразуют его в другие виды энергии: химическую и электрическую. Свет, не поглощенный фоторецепторами, поглощается – уже пассивно – пигментным эпителием.

Фоторецепторы сетчатки сложным образом связаны с окончаниями волокон зрительного нерва, которые передают сигналы в мозг. Нервные волокна, окончания которых устилают сетчатку, сходятся к зрительному нерву. Всего в сетчатке около 120 млн палочек и приблизительно 7 млн колбочек, а волокон зрительного нерва от них отходит примерно только 1 млн. Поэтому изображе-

ние на сетчатке разбивается примерно на миллион элементов – рецепторных полей.

Палочки обладают большой световой чувствительностью и обеспечивают возможность видения предметов, хотя бы больших, при низких уровнях яркости: в сумерках и ночью. Но палочки не воспринимают цвета.

Световая чувствительность у колбочек ниже, чем у палочек, но именно колбочки обеспечивают цветное зрение. Существует три вида колбочек, отличающихся друг от друга спектральной чувствительностью. Один вид более чувствителен к коротковолновой части спектра, другой – к средней части, третий – к длинноволновой. Условно их можно называть синими, зелеными и красными колбочками.

Поиски светочувствительных веществ сетчатки ведутся давно. Еще в конце XIX века из сетчатки было выделено вещество – зрительный пурпур, или родопсин. Родопсин выцветает под действием света, теряя светочувствительность, и постепенно восстанавливается в темноте, приобретая прежние свойства. Спектрофотометрические измерения показали, что спектральная зависимость поглощения родопсина близка к кривой относительной спектральной световой эффективности ночного зрения. В настоящее время можно считать доказанным, что родопсин – пигмент палочек – фоторецепторов, которые не различают цветов.

Выделить пигменты колбочек до сих пор не удалось. Однако эксперименты, проведенные различными методами, в том числе микрофотометрическими и электрофизиологическими, показали, что в сетчатке помимо родопсина присутствуют еще три вида пигментов с максимумами спектральной чувствительности, лежащими в синей, зеленой и красной спектральных областях.

Определение спектральной чувствительности каждого из трех приемников сетчатки, ответственных за цветное зрение, проводилось также с помощью колориметрических экспериментов по смешению цветов, в том числе с участием лиц, у которых не функционирует один из световых рецепторов (дихроматов).

Усредненные кривые спектральной чувствительности трех приемников глаза, полученные путем колориметрических измерений, приведены на рисунке 3.2. Средние чувствительности длинно-, средне- и коротковолнового приемников обозначены соответственно  $r_0(\lambda)$ ,  $g_0(\lambda)$ ,  $b_0(\lambda)$ .

Таким образом, экспериментальные результаты свидетельствуют в пользу теории трехкомпонентного цветового зрения. Именно наложение кривых чувствительности трех приемников обеспечивает способность тонко различать цвета. Из рисунка 3.2 видно, что любое излучение, даже спектрально чистое (т. е. монохроматическое), вызывает возбуждение, как правило, двух, а иногда и всех трех рецепторов.

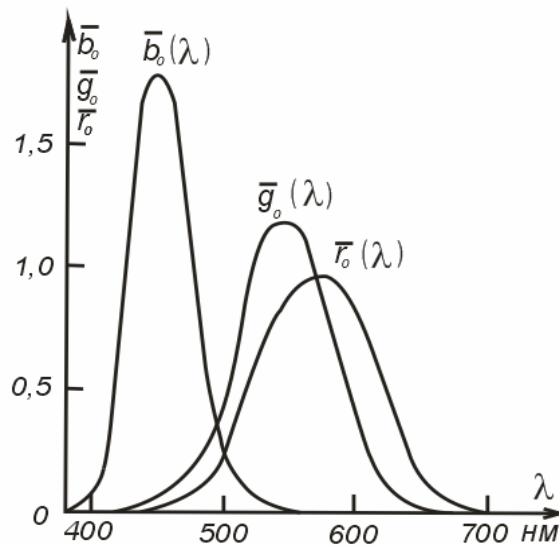


Рисунок 3.2 – Спектральная чувствительность трех приемников глаза среднего стандартного наблюдателя

Представим, что на глаз падает монохроматическое излучение с длиной волны 530 нм. Воздействие данного света приведет к возбуждению всех трех приемников. При этом сигналы, посылаемые в головной мозг наблюдателя, будут пропорциональны их чувствительности к данной длине волны:

$$r_0(530) = 0,7057; \quad g_0(530) = 1,1058; \quad b_0(530) = 0,0422.$$

Воздействие излучения с длиной волны 580 нм приведет к возбуждению тех же трех приемников. Однако сигналы приемников будут пропорциональны значениям чувствительности:

$$r_0(580) = 0,9408; \quad g_0(580) = 0,7672; \quad b_0(580) = 0,0017.$$

Глаз хорошо различает свет с длинами волн 530 нм (зеленый) и 580 нм (желтый) благодаря различным вкладам трех приемников в общий сигнал. В первом случае сильнее всего возбужден «зеленый» приемник, хотя возбуждены и другие. Во втором случае больше всего возбужден «красный» рецептор. В зависимости от вклада в общий сигнал каждого приемника, от соотношения между степенями возбуждения каждого мы определяем цвет и отличает друг от друга даже близкие цвета.

### 3.3 Законы Грассмана

Начало изучению смешения цветов положено работами И. Ньютона. Его классические опыты по разложению белого света призмой на спектральные со-

ставляющие и получение снова исходного излучения из его составных частей явились первыми шагами в исследовании восприятия цвета глазом.

Исследованием цветового зрения и законов смешения цветов также занимались другие известные ученые: Томас Юнг (1773–1829), Герман Гельмгольц (1821–1894), Д. К. Максвелл (1831–1879), Герман Грассман (1809–1877), Эрвин Шредингер (1887–1961). Их работы помогли выработать научный подход к изучению цвета и методов его измерения.

Решающий шаг в направлении современных цветовых измерений сделали Гельмгольц, Грассман и Максвелл. Именно они открыли и доказали законы аддитивного синтеза цветов, которые относятся исключительно к цветовым ощущениям (*стимулам*) и поэтому имеют основополагающее значение для цветовых измерений.

Математические основы цветовых измерений заложены Грассманом. Сформулированные им три закона были многократно подтверждены экспериментально и по своему значению могут быть сопоставлены с общими законами математики.

Законы Грассмана можно сформулировать следующим образом:

**Первый** – закон трехмерности: любой цвет однозначно выражается тремя линейно независимыми цветами. То есть необходимо и достаточно трех линейно независимых цветов, каждый из которых нельзя получить сложением двух остальных, чтобы воспроизвести все цветовое многообразие путем сложения этих трех цветов в различных количественных пропорциях.

**Второй** – закон непрерывности – утверждает, что при непрерывном изменении излучения цвет смеси также меняется непрерывно. Другими словами, если в смеси трех цветовых стимулов один меняется непрерывно, в то время как два других остаются постоянными, цвет смеси также изменяется непрерывно.

**Третий** – закон аддитивности: цвет смеси основных излучений зависит только от их цветов, а не от их спектрального состава. Иначе: результат смешения двух (или большего числа) стимулов зависит только от цветов этих стимулов и не зависит от того, какой спектральный состав излучения обуславливал цвет каждого из стимулов.

Согласно первому закону Грассмана любой произвольно заданный цвет  $F_0$  можно получить путем смешения (сложения) трех линейно независимых цветов  $F_1, F_2, F_3$ , взятых в определенных количествах:

$$F_0 = mF_1 + nF_2 + pF_3. \quad (3.1)$$

Линейная независимость цветов означает, что ни один из них не может быть получен смешением двух других. Несоблюдение условия независимости по сути означает, что цвет  $F_0$  можно получить путем смешения двух цветов, а не трех.

Данный экспериментально установленный факт, отражаемый уравнением (3.1), является основой математического описания цвета в колориметрии. После



выбора трех независимых цветов в качестве основных любой цвет может быть однозначно охарактеризован совокупностью трех чисел:  $m$ ,  $n$ ,  $p$ . Эти числа называются координатами цвета.

### 3.4 Координаты цвета системы $RGB$

Существует бесконечно много групп (систем) линейно независимых цветов, но в колориметрии используются лишь некоторые из них. Три выбранных линейно независимых цвета называются *основными цветами*, или *основными стимулами*. Они определяют цветовую координатную систему. Тогда три числа (координаты цвета), описывающие данный цвет, являются количествами основных цветов в смеси, цвет которой зрительно не отличим от цвета  $F_0$ .

В области светотехники и близких к ней дисциплин стандарты, касающиеся установления значений величин, методов их измерений и расчетов, разрабатываются Международной комиссией по освещению – МКО (франц. CIE – Commission International de l’Eclairage). Данные стандарты рекомендуются к применению всем странам. В 1931 г. на VIII сессии МКО было принято решение выбрать в качестве основных цветов (основных стимулов) три монохроматических излучения с длинами волн, равными  $\lambda_R = 700$  нм,  $\lambda_G = 546,1$  нм и  $\lambda_B = 435,8$  нм. Данные основные цвета образуют цветовую координатную систему  $RGB$ .

Выбранные стимулы удобны тем, что два из них ( $B$  и  $R$ ) близки к краям видимого спектра, а третий ( $G$ ) близок к его середине. Кроме того, излучения с длинами волн  $\lambda_G$  и  $\lambda_B$  с большой интенсивностью испускаются парами ртути. Обозначения  $R$ ,  $G$  и  $B$  даны по начальным буквам слов «красный», «зеленый», «синий»: по-английски red, green, blue, по-немецки rot, grün, blau.

Кроме трех основных стимулов  $R$ ,  $G$  и  $B$  для установления единиц цветовых координат необходим четвертый, называемый базисным. Базисный стимул – некоторый цвет, обычно ахроматический, который должен получиться при сложении основных стимулов в равных количествах.

Для системы  $RGB$  в качестве базисного стимула принят белый равноэнергетический цвет  $W_E$ .

Представим простейшее цветоизмерительное устройство: на призму с гранями из белого хорошо рассеивающего материала (например из гипса) падают потоки излучений, сравниваемых по цвету. Грани призмы называются полями сравнения. Пусть левое (Л) поле освещается источником белого равноэнергетического света произвольной яркости. Эту яркость  $L_W$  определим, как *единичную*. Правое поле (П) освещается одновременно тремя световыми потоками, соответствующими основным стимулам  $R$ ,  $G$  и  $B$ . В результате смешения световых потоков на поверхности П возникают самые разнообразные цвета. Обозначим яркости основных стимулов  $R$ ,  $G$  и  $B$  соответственно символами  $L_R$ ,  $L_G$  и  $L_B$ . При некоторых значениях яркостей  $L_R$ ,  $L_G$  и  $L_B$  в результате сложения возникает белый цвет. Эти яркости также называют *единичными*.

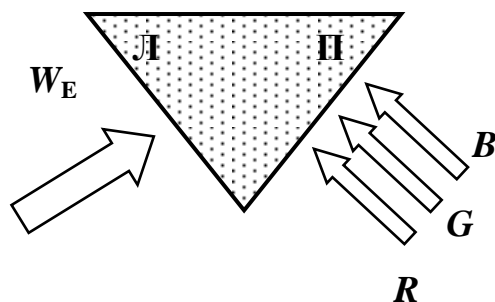


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема сравнения цветов в простейшем цветоизмерительном устройстве

Многочратно повторенные эксперименты показали, что белый цвет возникает, если отношение яркостей равно

$$L_R: L_G: L_B = 1: 4,5907: 0,0601. \quad (3.2)$$

Стоящие слева величины называют **яркостными коэффициентами**.

Для того чтобы сложение основных стимулов  $R$ ,  $G$ ,  $B$  давало белый равноэнергетический цвет, яркости единиц должны быть пропорциональны их яркостным коэффициентам.

Из (3.2) следует, что только одно из значений единичных яркостей независимо. Его можно выбрать произвольно и для стандартизации измерений в дальнейшем не менять. Пусть единичная яркость светового потока  $R$  (иногда говорят – единичный цвет) равна 1 лм. Тогда для получения белого цвета две другие яркости должны быть равны соответственно 4,5907 и 0,0601 лм.

В обозначениях цветовой координатной системы **RGB** можно записать

$$L_{F'} = r'L_R + g'L_G + b'L_B, \quad (3.3)$$

где  $L_{F'}$  – яркость цвета  $F'$ , возникающего при сложении основных стимулов (основных цветов), взятых в количествах, равных  $r'L_R$ ,  $g'L_G$  и  $b'L_B$ .

Уравнение (3.3) называется цветovým уравнением.

Знак равенства означает, что цветовые поля, записанные в правой и левой частях уравнения (3.3), визуально нельзя отличить друг от друга. Оба эти поля имеют одинаковый цвет.

В литературе по колориметрии уравнение (3.3) часто записывают в форме

$$F' = r'R + g'G + b'B, \quad (3.4)$$

где символы  $R$ ,  $G$ ,  $B$  и  $F'$  обозначают яркости  $L_R$ ,  $L_G$ ,  $L_B$  и  $L_{F'}$ .

Коэффициенты  $r'$ ,  $g'$  и  $b'$  показывают, сколько единиц каждого единичного цвета нужно взять, чтобы получить цвет  $F'$ .

Произведения  $r'R$ ,  $g'G$  и  $b'B$  называются цветовыми составляющими. Их сумма образует цвет  $F'$ .

Уравнения (3.3) и (3.4) также могут быть записаны в векторной форме:

$$F' = r'R + g'G + b'B. \quad (3.5)$$

Здесь цвет  $F'$  – вектор в трехмерном пространстве,  $R, G, B$  – орты координатной системы этого пространства. Коэффициенты  $r', g'$  и  $b'$  называются *координатами цвета* (или *цветовыми координатами*) *цветовой координатной системы RGB*.

При такой форме записи можно говорить о трехмерности цвета. Действительно, любой цвет может быть полностью описан заданием его трех координат – коэффициентов  $r', g'$  и  $b'$ .

Белому равноэнергетическому стимулу соответствует условие

$$r' = g' = b'. \quad (3.6)$$

Цветовое уравнение может быть проиллюстрировано рисунком 3.4, а. Для ряда цветов  $F'$  получение равенства полей сравнения по данной схеме невозможно. Однако поля сравнения можно уравнивать, если освещать их по схеме, приведенной на рисунке 3.4, б. Правое поле освещается световыми составляющими  $r'R$  и  $b'B$ , а левое –  $g'G$  и  $F'$ .

В этом случае цветовое уравнение можно записать в виде

$$F' + g'G = r'R + b'B. \quad (3.7)$$

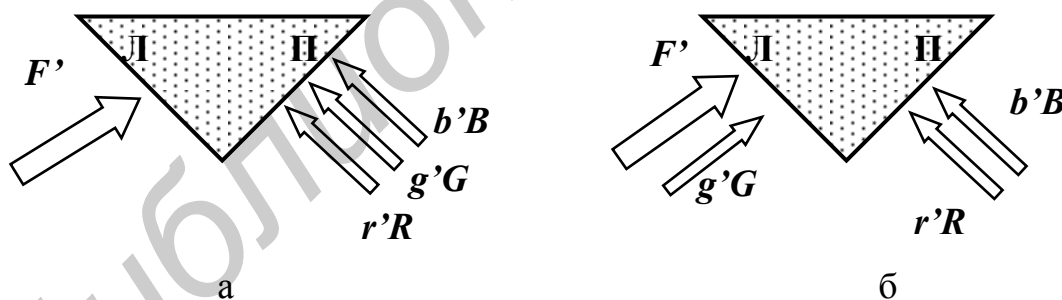


Рисунок 3.4 – Возможное уравнивание полей сравнения по цвету в цветоизмерительном устройстве

Формально можно выразить цвет  $F'$  через выбранную тройку основных цветов  $R, B, G$ , если допустить, что цветовые координаты  $r', g'$  и  $b'$  могут принимать отрицательные значения:

$$F' = r'R - g'G + b'B. \quad (3.8)$$

При допущении отрицательных значений координат цвета уже все цвета можно выразить через тройку основных стимулов системы  $RGB$ .

В общем случае при произвольных значениях координат цвета  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  уравнение (3.4) определяет цвет и яркость сложного светового потока. Однако при некоторых значениях  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  цвет, возникающий при сложении цветовых составляющих  $r'R$ ,  $g'G$  и  $b'B$ , идентичен цвету строго монохроматического излучения  $F'(\lambda)$ . В этом случае

$$F'(\lambda) = r'(\lambda)R + g'(\lambda)G + b'(\lambda)B. \quad (3.9)$$

Если найти средние значения  $r'(\lambda)$ ,  $g'(\lambda)$ ,  $b'(\lambda)$  для группы наблюдателей при использовании стандартной установки, тогда величины  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  можно рассматривать как координаты цвета спектрально чистого монохроматического излучения в системе  $RGB$  для «стандартного наблюдателя» (удельные координаты цвета).

Графические зависимости координат цвета спектрально чистых, т. е. монохроматических, излучений (удельных координат цвета) называются кривыми сложения. Вид кривых сложения для цветовой координатной системы  $RGB$ , утвержденных МКО в 1931 г., приведен на рисунке 3.5.

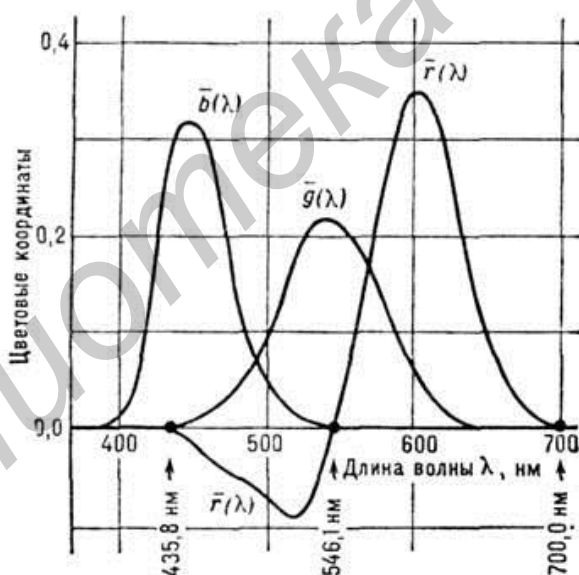


Рисунок 3.5 – Удельные координаты цвета  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  в системе  $RGB$

В системе  $RGB$  координаты цвета монохроматических излучений показывают, какое количество единиц основных цветов воспроизводит при их смешении цвет монохроматического излучения мощностью 1 Вт с длиной волны  $\lambda$ .

Использование кривых сложения создает основу для объективного определения цвета без участия наблюдателя. Цвет можно не только непосредствен-

но измерить, но и вычислить, если известно спектральное распределение плотности мощности излучения  $P_\lambda$  в видимой области спектра.

Вычисление координат цвета производится по формулам

$$r' = \int P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda; \quad (3.10a)$$

$$g' = \int P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda; \quad (3.10б)$$

$$b' = \int P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda. \quad (3.10в)$$

Интегрирование осуществляется в пределах видимой части спектра. Спектральное распределение плотности мощности излучения  $P_\lambda$  измеряется с помощью спектральных приборов (монохроматоров).

Формулы (3.10, а–в) определяют связь между спектральным составом излучения и его цветом, т. е. данному спектральному составу излучения соответствует только один цвет. Однако отсюда не следует обратного утверждения, что каждому цвету соответствует один определенный состав излучения. Излучения, различные по спектральному составу, но тождественные по цвету, называются *метамерными*.

### 3.5 Координаты цветности системы *RGB*

Уравнение (3.4) и его векторная форма (3.5) выражают тождество полей сравнения как по цвету, так и по яркости. Однако для многих это не всегда нужно, т. к. цвет не связан непосредственно с яркостью световых потоков. Для характеристики света необязательно задавать три смешиваемых световых потока в световых (люмен) или энергетических (ватт) единицах. Цвет определяется однозначно относительными интенсивностями потоков  $R$ ,  $G$  и  $B$ . Чтобы найти цвет потока, возникающего при смешении трех основных стимулов достаточно знать отношения:

$$r = \frac{r'}{r' + g' + b'}; \quad (3.11a)$$

$$g = \frac{g'}{r' + g' + b'}; \quad (3.11б)$$

$$b = \frac{b'}{r' + g' + b'}. \quad (3.11в)$$

Коэффициенты  $r$ ,  $g$ ,  $b$  называются *координатами цветности*.

Уравнение

$$F = rR + gG + bB \quad (3.12)$$

также носит название «цветовое уравнение», но определяет теперь только цвет (цветность) светового потока  $F$ , но не его яркость.

Для образования белого цвета должно выполняться условие:

$$r = g = b = 1/3.$$

Размерность величины  $F$  совпадает с размерностью единичных стимулов  $R, G, B$ . Она может быть выбрана произвольно. Значение  $R$  можно приравнять единице, при этом не важно, будет ли это 1 лм, 1 Вт или безразмерная величина.

Зная  $R$ , из соотношения (3.2) можно точно найти значения яркостей потоков  $G$  и  $B$ :  $G = 4,5907 R$ ;  $B = 0,0601 R$ .

Цвет светового потока  $F$ , возникающего при сложении трех основных стимулов, определяется совокупностью трех чисел  $r, g, b$  – координат цветности. Причем сумма координат цветности равна единице:

$$r + g + b = 1. \quad (3.13)$$

Из условия (3.13) следует также, что только две из координат цветности являются независимыми. Поэтому, характеризуя цветность, обычно приводят только две ее координаты:  $r, g$ .

### 3.6 Координаты цветности и цветовой треугольник системы $RGB$

Смысл введения координат цветности можно также пояснить следующим образом.

Уравнение (3.5) представляет цвет в векторной форме:

$$F' = r'R + g'G + b'B.$$

Из него следует, что цвет  $F'$  можно изобразить в системе координат с осями  $R, G, B$  в виде вектора. Множеству цветов  $F'_1, F'_2 \dots F'_n$  будет соответствовать множество различных векторов. Некоторые векторы могут иметь одинаковое направление, но отличаться по модулю. Это означает, что соответствующие цвета отличаются только количественно, по яркости.

Пусть орты  $R, G, B$  – орты прямоугольной декартовой системы координат. Рассечем координатные оси единичной плоскостью, пересекающей их в положительных направлениях на расстоянии единицы от начала координат, т. е. в точках  $r'=1, g'=b'=0$ ;  $g'=1, r'=b'=0$ ;  $b'=1, r'=g'=0$  (рисунок 3.6).

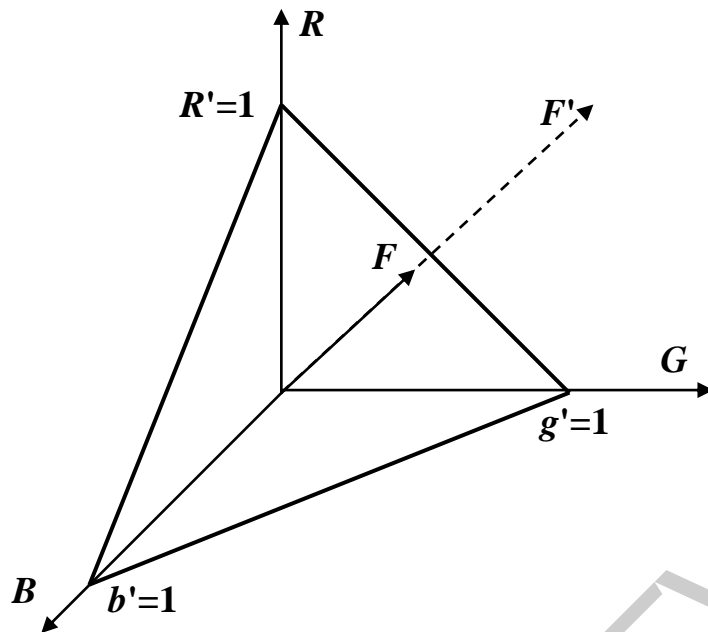


Рисунок 3.6 – Единичная плоскость

Возьмем один из векторов цвета – цвет  $F'$ . Он пересечет единичную плоскость в некоторой точке  $F$ . Вектор, начинающийся в начале координат и кончающийся в точке  $F$ , называют единичным вектором, характеризующим направление вектора  $F'$ . Если координаты цвета  $F'$  –  $r'$ ,  $g'$  и  $b'$ , то координаты конца соответствующего единичного вектора  $F$  будут равны

$$r = \frac{r'}{r'+g'+b'}, \quad g = \frac{g'}{r'+g'+b'}, \quad b = \frac{b'}{r'+g'+b'},$$

т. е. координаты конца единичного вектора  $F$  – это координаты цветности.

Принято обозначать координаты единичного вектора теми же символами, что и координаты цвета, но без штриха. Снова видим, что сумма координат единичного вектора равна единице:  $r + g + b = 1$ .

Из аналитической геометрии известно, что условие  $r + g + b = 1$  есть уравнение единичной плоскости. Модуль единичного вектора определяет ту единицу, которой измеряют модуль вектора соответствующего направления, т. е. вектора соответствующего цвета.

Единичный вектор определяет направление вектора цвета  $F'$ , но не определяет его модуль. Яркость цвета пропорциональна модулю, следовательно, единичный вектор ничего не говорит о яркости цвета.

По установившейся терминологии единичный вектор определяет цветность. Если сравнить два предмета, одинаковых по цветности, но разных по цвету, один из них будет темнее другого. Единичному вектору соответствует единичный цвет, т. е. такой, сумма координат которого равна единице. Любой цвет  $F'$ , может быть получен умножением единичного вектора на сумму координат цвета  $F'$ , т. е. на его модуль.

В треугольнике, изображенном на рисунке 3.6, в точке  $r'=1$ , лежащей на оси  $R$ ,  $r=1, g=0, b=0$ . Эта точка соответствует спектрально чистому цвету  $R$ , без примесей цветов  $G$  и  $B$ . По аналогии в точках  $g'=1$ , лежащей на оси  $G$ , и  $b'=1$ , лежащей на оси  $B$ , координаты цветности соответственно равны:  $r=0, g=1, b=0$  и  $r=0, g=0, b=1$ . Эти точки также соответствуют спектрально чистым цветам  $G$  и  $B$ . Точки, лежащие на стороне треугольника ( $r'=1, b'=1$ ), соответствуют цветам, возникающим при смешении основных цветов  $R$  и  $B$ . На сторонах треугольника ( $r'=1, g'=1$ ) и ( $g'=1, b'=1$ ) лежат цвета, соответствующие смешению стимулов  $R, G$  и  $G, B$  соответственно.

Представим треугольник, изображенный на рисунке 3.6, на плоскости (рисунок 3.7, а).

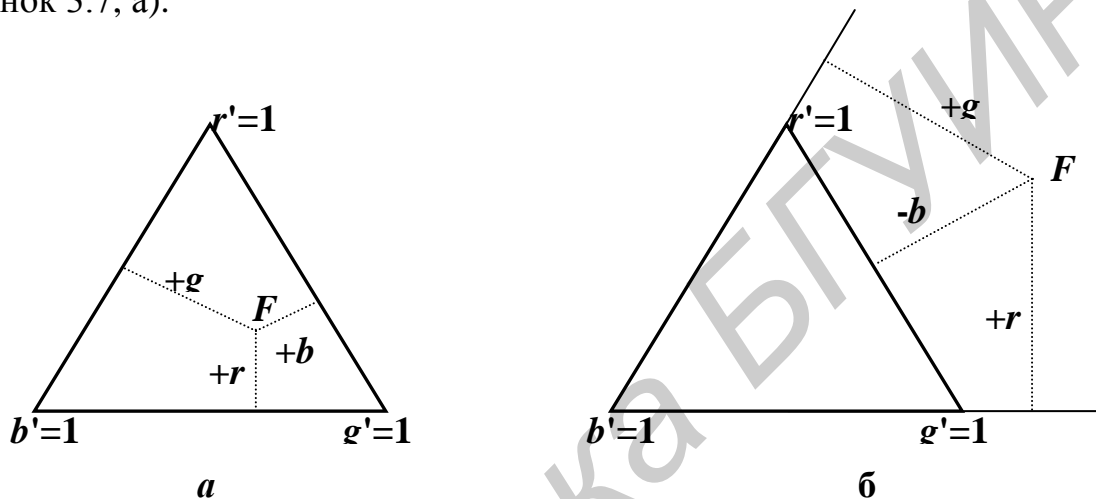


Рисунок 3.7 – Цветовые треугольники

Рассмотрим произвольную точку  $F$  внутри треугольника (см. рисунок 3.7, а). Цветовые координаты вектора, пересекающего единичную плоскость в точке  $F - r, g, b$ .

Можно показать, что длина перпендикуляра, опущенного из точки  $F$  на сторону ( $r'=1, b'=1$ ), равна  $g$ , на сторону ( $b'=1, g'=1$ ) –  $r$ , на сторону ( $r'=1, g'=1$ ) –  $b$ . Таким образом, цвет смеси  $F$  однозначно задается величиной перпендикуляров на все три стороны треугольника. Именно поэтому данный треугольник называется **цветовым треугольником**.

Точка в центре цветового треугольника с координатами цветности  $r=g=b=1/3$  соответствует белому цвету.

Всем точкам  $F$  внутри цветового треугольника соответствуют положительные значения координат  $r, g, b$ . Все цветности, лежащие внутри данного треугольника, могут быть получены смешением трех основных стимулов. Таким образом, площадь цветового треугольника определяет **цветовой охват** системы  $RGB$ . Цветовой охват – область тех цветов, которые могут быть получены смешением основных стимулов системы.

Однако в системе  $RGB$  значения координат могут принимать и отрицательные значения (см. формулу (3.8)). Тем не менее сумма  $r, g, b$  и в этом случае равна единице (рисунок 3.7, б). Точки, лежащие на плоскости вне цветового треугольника, соответствуют цветам, которые не могут быть получены смешением



нием всех трех основных цветов. Цвет  $F$  на рисунке 3.7, б – реально существующий цвет, удовлетворяющий цветовым уравнениям:

$$F + bB = rR + gG \quad \text{и} \quad F = rR - bB + gG. \quad (3.14)$$

Чистые спектральные цвета  $F(\lambda)$  также подчиняются цветовому уравнению:

$$F(\lambda) = r(\lambda)R + g(\lambda)G + b(\lambda)V. \quad (3.15)$$

На рисунке 3.8 в плоскости цветового треугольника нанесены точки  $F(\lambda)$ , соответствующие спектральным цветам излучений с длинами волн от 380 до 700 нм. Соединяющая их линия называется *линией спектральных цветов*. В области длин волн 700–540 нм линия спектральных цветов практически совпадает со стороной цветового треугольника, обозначенной на рисунке как  $B=0$ . Однако все чисто спектральные цвета, кроме трех основных ( $R, G, B$ ), лежат вне цветового треугольника.

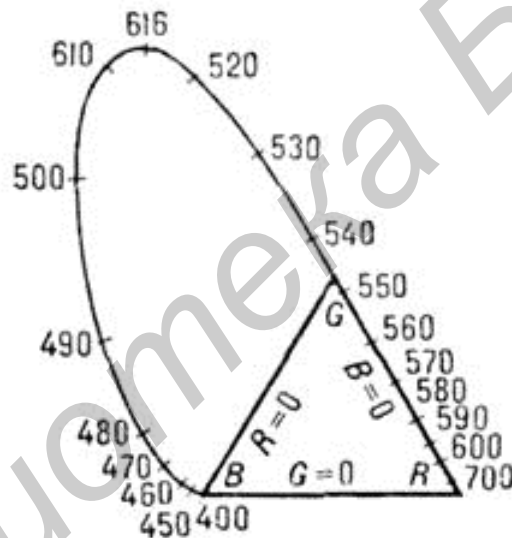


Рисунок 3.8 – Цветовой график основных цветов монохроматических излучений и цветовой треугольник системы  $RGB$

На линии, соединяющей точку красного цвета  $R$  (700,0 нм) и фиолетовый цвет (380 нм), лежат все пурпурные цвета. На площади, ограниченной кривой чистых спектральных цветов и линией пурпурных цветов, расположены все возможные цвета.

### 3.7 Цветовая координатная система $XYZ$

Наглядность системы  $RGB$  является ее несомненным достоинством. Большое значение имеет также возможность непосредственного воспроизведения ее основных стимулов ( $R, G, B$ ) в колориметре. Однако, как видно из рисунка 3.8, цветовой охват системы  $RGB$  составляет меньше половины площади,

изображающей все существующие цветности. Почти 70 % площади цветности лежит в области отрицательных значений координаты  $r$ . Это сильно усложняет различные колориметрические расчеты.

Поэтому наряду с системой  $RGB$  МКО в 1931 г. приняла другую цветовую координатную систему –  $XYZ$ , в которой отсутствуют недостатки системы  $RGB$ .

В настоящее время система  $XYZ$  получила всеобщее распространение и широко используется в колориметрии. Выигрыш введения новой системы – возможность охвата всей области реальных цветов, выражение любого существующего цвета только положительными значениями координат. Недостаток – принципиальная невозможность реального воспроизведения основных стимулов и, следовательно, невозможность создания визуального колориметра на их основе. Однако объективный колориметр, как это далее будет понятно, может быть создан.

Основные стимулы новой системы были названы  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Так же, как и в системе  $RGB$ , в системе  $XYZ$ , принято, что смешение равных количеств основных стимулов дает белый равноэнергетический цвет  $W_E$ . Однако соотношение яркостных коэффициентов в системе  $XYZ$  выбрано другим:

$$L_X : L_Y : L_Z = 0 : 1 : 0. \quad (3.16)$$

Таким образом, яркость цвета в новой системе полностью определяется координатой  $y'$ .

В системе  $XYZ$  цветовой треугольник  $RGB$  заменен другим треугольником. В его вершинах лежат новые основные цвета  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Они выбраны таким образом, чтобы все поле реальных цветов находилось внутри нового треугольника. Это возможно в том случае, если новые цвета  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  будут находиться вне линии спектральных цветов системы  $RGB$  и, следовательно, будут являться **нереальными**, т. е. не существующими в природе цветами.

Нереальные цвета системы  $XYZ$  выбраны так, что кривые сложения этой системы не имеют отрицательных участков, а координата  $Y$  равна яркости наблюдаемого цветного объекта, т. к. кривая сложения  $\bar{y}$  совпадает с функцией относительной спектральной световой эффективности стандартного наблюдателя МКО для дневного зрения (рисунок 3.9).

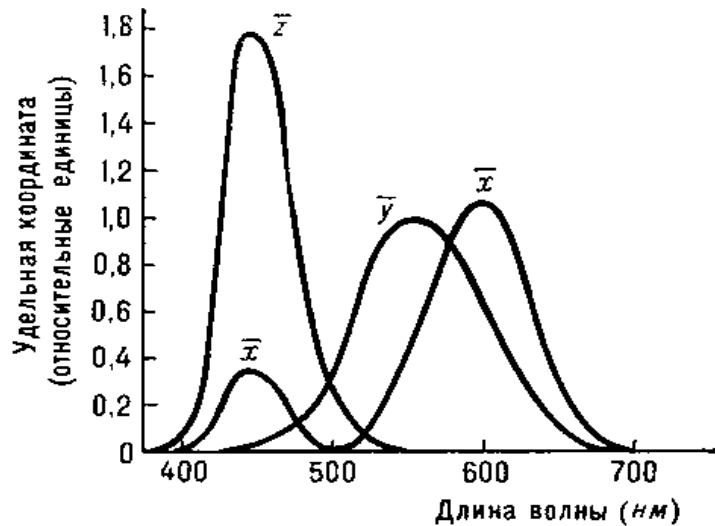


Рисунок 3.9 – Удельные координаты цвета  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  системы XYZ (кривые сложения системы XYZ)

Цветовое уравнение в системе XYZ в векторной форме записывается следующим образом:

$$F' = X'X + Y'Y + Z'Z, \quad (3.17)$$

где  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$  – координаты цвета, а  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – единичные векторы основных цветов (основных стимулов) системы XYZ.

Единичные цвета систем XYZ и RGB связаны условием

$$X + Y + Z = R + G + B. \quad (3.18)$$

При этом условии сумма единичных цветов  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  дает белый равноэнергетический цвет, а центр тяжести цветового треугольника XYZ совпадает с точкой равноэнергетического белого цвета  $W_E$  цветового треугольника RGB.

Уравнения связи основных цветов системы XYZ и RGB имеют следующий вид:

$$X = +2,3646R - 0,5152G + 0,0052B, \quad (3.19a)$$

$$Y = -0,8965R + 1,4264G - 0,0144B, \quad (3.19б)$$

$$Z = -0,4681R + 0,0888G + 1,0092B. \quad (3.19в)$$

Сложив уравнения(3.19, а–в), можно убедиться, что выполняется условие (3.18).

Переход от одной системы цветовых координат к другой определяется общими правилами преобразования координат. Если считать, что в обеих си-

стемах направление вектора, характеризующего некоторый цвет, остается неизменным, можно получить формулы для преобразования координат цвета при переходах между системами  $XYZ$  и  $RGB$ :

$$r' = 2,36646x' - 0,8965y' - 0,4681z' ; \quad (3.20a)$$

$$g' = -0,5152x' + 1,4264y' + 0,08882z' ; \quad (3.20б)$$

$$b' = 0,0052x' - 0,0144y' + 1,0092z' ; \quad (3.20в)$$

$$x' = 0,4900r' + 0,3100g' + 0,2000b' ; \quad (3.21a)$$

$$y' = 0,1770r' + 0,8124g' + 0,0106b' ; \quad (3.21б)$$

$$z' = 0,0000r' + 0,0010g' + 0,9900b' . \quad (3.21в)$$

Поскольку цвета  $XYZ$  нереальны, нельзя построить прибор для измерения цвета (колориметр), в котором они были бы осуществлены как основные стимулы. Однако координаты цвета могут быть рассчитаны с учетом кривых сложения системы  $XYZ$  (см. рисунок 3.9).

Координаты цвета сложного излучения, если измерено распределение мощности по спектру  $P_\lambda$ , вычисляются по формулам:

$$X' = \int P_\lambda \bar{x}(\lambda) d\lambda ; \quad (3.22a)$$

$$Y' = \int P_\lambda \bar{y}(\lambda) d\lambda ; \quad (3.22б)$$

$$Z' = \int P_\lambda \bar{z}(\lambda) d\lambda . \quad (3.22в)$$

Координаты цветности в системе  $XYZ$  определяются по аналогии с их определением в системе  $RGB$ :

$$x = \frac{x'}{x' + y' + z'} ; \quad (3.23a)$$

$$y = \frac{y'}{x' + y' + z'} ; \quad (3.23б)$$

$$z = \frac{z'}{x' + y' + z'} . \quad (3.23в)$$

График цветностей (цветовой треугольник)  $x, y$  системы  $XYZ$  приведен на рисунке 3.10. На нем показана линия спектральных цветностей, линия пурпурных цветностей, цветовой треугольник системы  $RGB$  (обозначен символами  $(R)$ ,  $(G)$ ,  $(B)$ ), линия цветностей излучения абсолютно черного тела и точки цветностей стандартных источников освещения  $(A, B, C, \text{ и } D)$ , утвержденных МКО. Из рисунка 3.10 видно, что в системе  $XYZ$  все реальные цвета лежат внутри цвето-

вого треугольника. Цветность равноэнергетического белого цвета  $E$  находится в центре тяжести цветового треугольника системы  $XYZ$ .



Рисунок 3.10 – График цветностей  $x$ ,  $y$  цветовой координатной системы  $XYZ$  и цветовой треугольник системы  $RGB$

### 3.8 Измерение цвета

Изучение свойств цвета и определение координат кривых сложения для стандартного колориметрического наблюдателя МКО (1931 г.) позволяет рассматривать цвет как физическую величину, которую можно измерять объективными методами. Однако способы непосредственного визуального измерения цвета также сохранились и широко применяются.

Приборы для измерения цвета называются **колориметрами**. Процесс измерения цвета – нахождение трех чисел (координат), характеризующих цвет и яркость исследуемого излучения в цветовой координатной системе  $RGB$  или  $XYZ$ . Может также использоваться какая-либо другая система, удобная для конкретного вида измерений. Процесс измерения сводится к созданию из принятых трех основных цветов нового цвета, совпадающего с исследуемым излучением.

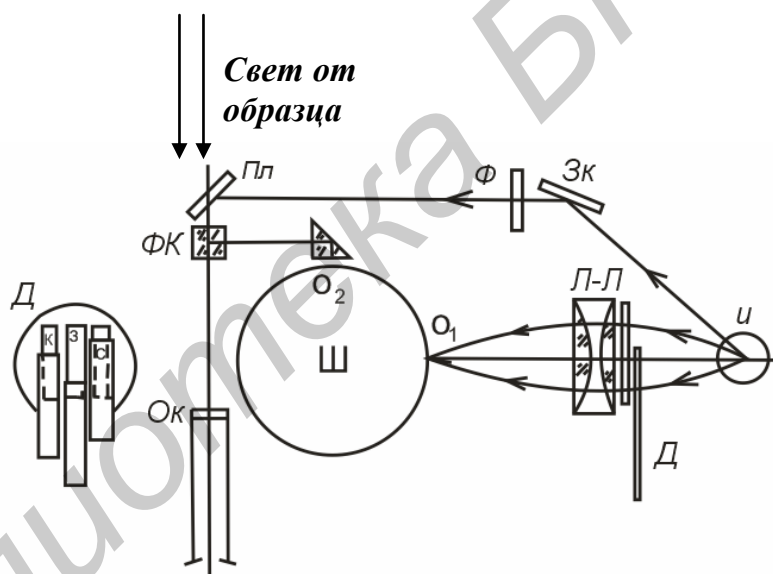
Колориметры широко используются в полиграфии, текстильной и лакокрасочной промышленности, в производстве электроламп, фотографии, кино, телевидении и т. п.

Колориметры разделяются на визуальные и объективные. Общее свойство всех визуальных колориметров то, что в них глазу предъявляются два расположенных рядом поля – измеряемого цвета и сравнения. Варьируя цвет поля сравнения, добиваются его тождественности с полем измеряемого цвета. Измерения основываются на том, что глаз устанавливает равенство двух цветов с большой точностью. Основной недостаток визуальных колориметров – отличие индивидуальных свойств цветового зрения человека от свойств зрения стандартного колориметрического наблюдателя. Это вызывает характерную для данного оператора погрешность измерения.

### **Визуальные колориметры**

Визуальные колориметры в свою очередь подразделяются на **аддитивные** и **субтрактивные**. Принцип действия аддитивных колориметров основан на сравнении исследуемого цвета с суммой трех основных цветов. Субтрактивные колориметры основаны на вычитании цветов.

На рисунке 3.11 приведена схема одного из визуальных аддитивных колориметров (трехцветный колориметр Дональдсона).



И – лампа; Д – диафрагма с фильтрами; Л-Л – конденсор; Ш – фотометрический шар;  $O_1$  и  $O_2$  – отверстия в шаре; ФК – фотометрический кубик; Зк – зеркало; Пл – пластинка; Ф – фильтр; Ок – окуляр

Рисунок 3.11 – Принципиальная схема аддитивного трехцветного колориметра Дональдсона

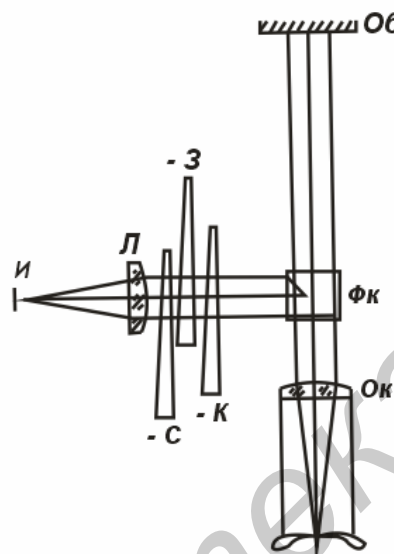
В трехцветном колориметре Дональдсона свет от лампы И проходит сквозь красный, зеленый и синий фильтры, расположенные в диафрагме Д, и конденсором Л-Л через отверстие  $O_1$  направляется в фотометрический шар Ш. В левой части рисунка изображена диафрагма Д с тремя прорезями, закрытыми фильтрами К (красный), З (зеленый) и С (синий). Фильтры могут быть пере-

крыты заслонками, положение которых и создает смесь основных цветов колориметра в том или ином соотношении.

Само смешение цветов происходит внутри шара Ш, внутренняя поверхность которого покрыта оксидом магния. Из шара свет выходит через отверстие  $O_2$  и призмой направляется на поле сравнения фотометрического кубика ФК. Свет, отраженный от образца, не показанного на схеме, освещает другое поле кубика. Наблюдение и сравнение двух цветовых полей ведется через окуляр Ок.

Разбавление измеряемого цвета может быть произведено с помощью зеркала Зк, пластинки Пл и фильтра Ф.

Принципиальная схема субтрактивного колориметра приведена на рисунке 3.12.



И – источник света; Л – коллимирующая линза; С, З, К – синий, зеленый и красный фильтры; ФК – фотометрический кубик; Об – образец; Ок – окуляр

Рисунок 3.12 – Схема субтрактивного колориметра

В субтрактивном колориметре неразделенный пучок, освещающий поле сравнения в фотометрическом кубике ФК, проходит последовательно три фильтра. Каждый фильтр ослабляет какую-то часть спектра пучка, вычитает часть излучения, а оставшаяся часть определяет цвет поля сравнения.

На рисунке 3.12 свет от источника И по пути к фотометрическому кубу ФК проходит через три фильтра (синий, зеленый и красный), выполненные в виде клиньев. Обозначения клиньев символически указывают на ту часть спектра, которую они поглощают. Фильтр С поглощает синюю часть спектра и полностью пропускает зеленую и красную, фильтр З поглощает зеленую часть и полностью пропускает синюю и красную, фильтр К поглощает красную часть и полностью пропускает синюю и зеленую.

Другое поле кубика ФК освещено светом, рассеянным образцом Об. Наблюдение световых полей ведется через окуляр Ок.

Оператор, проводящий измерение цвета образца Об, перемещает клинья, вводя в пучок, освещающий поле сравнения, большую или меньшую толщину каждого из них, и добивается цветового равенства полей.

Колориметр градуируется таким образом, чтобы отсчеты положения клиньев сразу определяли цвет образца или давали возможность его рассчитать.

Достоинством объективного колориметра является то, что проводимые измерения цвета не зависят от индивидуальных особенностей оператора. Чувствительность объективного колориметра можно строго согласовать с чувствительностью стандартного наблюдателя. Поля сравнения в объективном колориметре нет.

### **Объективные колориметры**

Объективные колориметры подразделяются на колориметры без спектрального разложения исследуемого света и со спектральным разложением.

В первом случае исследуемый световой пучок, например отраженный от цветного образца, разделяется на три пучка. Схемой прибора предусматривается, чтобы пучки имели равные интенсивности и одинаковый спектральный состав. Если это условие нарушается, различия в пучках должны быть скомпенсированы или учтены при градуировке прибора. Три пучка направляются на три фотоэлемента, чувствительность которых соответствует чувствительностям трех приемников стандартного колориметрического наблюдателя.

В колориметрах со спектральным разложением света пучок, цвет которого нужно измерить, направляется на призму или дифракционную решетку и разлагается в спектр. Затем мощность каждого узкого участка спектра измеряется фотоэлементом. Полученная таким образом спектральная плотность мощностью  $P_\lambda$  пересчитывается в координаты цвета по формулам (3.10, а–в).

Также существуют и весьма широко применяются так называемые **компараторы цвета**. Их задача – устанавливать отличие в цвете того или иного товара или продукта от заданного образца цвета.

Наконец, для непосредственной визуальной оценки созданы **атласы цвета**. В них по определенной системе подобраны образцы красок, цвет каждой из которых известен. Оценка неизвестного цвета производится подбором близкого образца из атласа. При этом в атласе должно быть указано, при каком источнике света следует проводить сравнение.

## **3.9 Стандартные источники света для колориметрии**

Данные о цветности того или иного предмета с достаточно точным указанием его координат в сущности еще ничего не определяют, если не указан источник света, при котором определена цветность. Однако источников света великое множество, причем даже однотипные источники отличаются по истинной и цветовой температуре (цветовая температура  $T_c$  – температура черного тела, при которой его излучение имеет ту же цветность, что и рассматриваемое излучение). Поэтому было решено выбрать несколько источников со строго опреде-



ленными характеристиками и утвердить их в качестве стандартных источников света для колориметрии.

МКО рекомендует для колориметрии четыре стандартных источника света: *A*, *B*, *C* и *D65*. Они включены и в ГОСТ 7721–76 «Источники света для измерения цвета». В стандарте для каждого источника дается его спектральная плотность излучения  $\Phi_{\lambda}^A$ ,  $\Phi_{\lambda}^B$ ,  $\Phi_{\lambda}^C$ ,  $\Phi_{\lambda}^{D65}$ .

Стандартный источник *A*, воспроизводящий условия искусственного освещения лампами накаливания, определяется как источник в видимой области спектра, имеющий относительную плотность излучения такую же, как черное тело при температуре 2856 К.

Источник *B* согласно стандарту воспроизводит условия прямого солнечного освещения с относительной спектральной плотностью излучения в видимой части спектра  $\Phi_{\lambda}^B$ . Коррелированная цветовая температура источника *B* приблизительно равна 4870 К. Максимум  $\Phi_{\lambda}^B$  приходится на длину волны  $\lambda = 565$  нм, что довольно близко к максимуму спектральной чувствительности зрения.

Источник *C* воспроизводит условия освещения рассеянным дневным светом и определяется как источник с относительной спектральной плотностью излучения  $\Phi_{\lambda}^C$ . Коррелированная цветовая температура источника *C*  $T_{ц} = 6770$  К.

Источник *D65* воспроизводит освещение усредненным дневным светом и определяется как источник с относительной спектральной плотностью потока излучения  $\Phi_{\lambda}^{D65}$  для измерения цвета люминесцирующих образцов. Коррелированная цветовая температура источника *D65* приблизительно равна  $T_{ц} = 6500$  К. Важное отличие источника *D65* от трех других (*A*, *B*, *C*) состоит в том, что в нем предусмотрена определенная доза ультрафиолетового света, что важно для измерений в тех случаях, когда к красителям примешаны люминофоры.

В таблице 3.1 приведены координаты цветности стандартных источников *A*, *B*, *C* и *D65*.

Как видно из таблицы, ни один из источников не похож по цветности на равноэнергетический. Ближе всего к нему источник *D65*, затем *B* и дальше всего *A*.

Таблица 3.1 – Координаты цветности стандартных источников *A*, *B*, *C*, *D65* и равноэнергетического источника *E*

Источник	Температура Тц, К	Координаты цветности		
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
<i>A</i>	2856	0,448	0,407	0,145
<i>B</i>	4874	0,348	0,352	0,300
<i>C</i>	6774	0,310	0,316	6,374
<i>D65</i>	6500	0,313	0,329	0,358
<i>E</i>	-	0,333	0,333	0,333

Техническое воспроизведение стандартных источников света для колориметрии может производиться разными способами.

Так, в качестве источника  $A$  применяется газонаполненная лампа накаливания с вольфрамовой нитью, питаемая при напряжении и силе тока, которые указаны в технической документации. Допускается отклонение от номинальной температуры  $\pm 10$  К.

Поднять температуру нити вольфрамовой лампы до температуры источников  $B$  или  $C$  невозможно, при приближении к температуре 3000 К нить вольфрамовой лампы быстро разрушается, а затем плавится (температура плавления вольфрама  $T_{пл} = 3680$  К). Поэтому в основу источников  $B$  и  $C$  кладется тот же источник  $A$ , но его свет проходит сквозь светофильтры, уменьшающие интенсивность длинноволновых составляющих излучения, что приводит к смещению максимума интенсивности в сторону более коротких волн. Таким образом, в качестве источников  $B$  и  $C$  применяется источник  $A$  в сочетании со светофильтрами, которые приводят относительные спектральные плотности потока излучения в соответствие с  $\Phi_{\lambda}^B$  или  $\Phi_{\lambda}^C$ . Светофильтры могут быть жидкостными или стеклянными. Их состав и пропускания определены стандартами.

Точное воспроизведение источника  $D65$  представляет трудную задачу из-за сложной зависимости спектральной плотности его мощности от длины волны, т. е. зависимости  $\Phi_{\lambda}^{D65}$ . До сих пор нет общепризнанного метода получения источника  $D65$ . В одной из наилучших моделей воспроизведения в основу положена йодно-кварцевая лампа – одна из разновидностей галогенных ламп накаливания. Вольфрамовая спираль помещена в кварцевую колбу, в которой находится небольшое количество паров йода. Кварцевая колба позволяет значительно поднять температуру накала спирали, что повышает ее световую отдачу, и сохранить в выходящем из колбы излучении его ультрафиолетовую часть, что необходимо для источника  $D65$ . Пары йода помогают сохранить прозрачность колбы и повышают срок службы лампы.

Модель стандартного источника  $D65$  также дополняется специальным светофильтром в виде тонкого слоя серебра, нанесенного на кварцевую пластинку, в сочетании со стеклянными цветными светофильтрами.

## 4 ЭТАЛОНЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В ОБЛАСТИ ФОТОМЕТРИИ И КОЛОРИМЕТРИИ

Белорусским государственным институтом метрологии создан парк эталонов в области фотометрии и колориметрии. В настоящее время эталонная база Республики Беларусь в данной области включает:

- 1 Национальный эталон единиц цвета, спектральных коэффициентов направленного пропускания и диффузного отражения в диапазоне длин волн 0,20–2,5 мкм (НЭ РБ 3-00).
- 2 Национальный эталон единиц силы света и освещенности (НЭ РБ 8-02).
- 3 Национальный эталон единицы спектральной чувствительности приемников излучения (НЭ РБ 17-10).
- 4 Исходный эталон единицы белизны (ИЭ РБ 13-08).
- 5 Исходный эталон единицы средней мощности лазерного излучения.

### 4.1 Национальный эталон единиц цвета, спектральных коэффициентов направленного пропускания и диффузного отражения в диапазоне длин волн 0,20–2,5 мкм (НЭ РБ 3-00)

Эталон разработан и введен в эксплуатацию в 2000 г. Базируется на прецизионных спектрофотометрах «Cary-500 Scan» (производитель Varian) и «Specord-M40» (производитель Carl Zeiss Jena). Воспроизведение, хранение и передача размера единиц нижестоящим по рангу эталонам и рабочим средствам измерения осуществляется с помощью мер цвета, выполненных из прозрачного и опалового стекла; мер спектральных коэффициентов направленного пропускания, выполненных из кварцевого стекла и стекла типа НС; мер спектральных коэффициентов диффузного отражения, выполненных из молочного стекла типа МС и прессованного порошка политетрафторэтилена (PTFE).

Точность воспроизведения единиц цвета, спектральных коэффициентов направленного пропускания и диффузного отражения подтверждена результатами международных сличений с аналогичными эталонами Франции, России и Польши.

Технические характеристики эталона представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики эталона единиц цвета, спектральных коэффициентов направленного пропускания и диффузного отражения

Измеряемая величина	Диапазон	Расширенная неопределенность ( $k=1,65; P=0,95$ )
1	2	3
Спектральные коэффициенты направленного пропускания в диапазоне длин волн от 0,2 до 2,5 мкм	1,0–99,0 %	0,12 %

1	2	3
Спектральные коэффициенты диффузного отражения в диапазоне длин волн от 0,2, до 2,5 мкм	1,0–100,0 %	0,5 %
Координаты цвета и цветности	Координата цвета X: от 2,5 до 109,0	0,25 (светоотражающие образцы)  0,10 (прозрачные образцы)
	Координата цвета Y: от 1,4 до 98,0	
	Координата цвета Z: от 1,7 до 107,0	
	Координата цветности x: от 0,0039 до 0,1000	0,0007 (светоотражающие и прозрачные образцы)
	Координата цветности y: от 0,0048 до 0,1000	

#### 4.2 Национальный эталон единиц силы света и освещенности (НЭ РБ 8-02)

Эталон разработан и введен в действие в 2002 г., а также модернизировался в период 2007–2010 гг. Эталон воспроизводит, хранит и передает нижестоящим по рангу эталонам и рабочим средствам измерений единицы силы света, освещенности, коррелированной цветовой температуры и цветности.

Эталон включает в себя оптическую скамью; группу светоизмерительных ламп; группу прецизионных приемников оптического излучения; системы измерения расстояний, питания светоизмерительных ламп и регистрации информации; колориметрический блок и блок малых уровней освещенности (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Внешний вид Национального эталона единиц силы света и освещенности

Точность воспроизведения единиц силы света и освещенности подтверждена результатами сличений с эталонами Германии (РТВ), Польши, Украины. Технические характеристики эталона представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики эталона единиц силы света и освещенности

Измеряемая величина	Диапазон	Неисключенная систематическая погрешность
Сила света	5–1500 кд	0,8 %
Освещенность	0,001–1 лк 1–2000 лк	2,0 %
Цветовая температура	2360–2856 К	6 К
Коррелированная цветовая температура	2000–12000 К	6 К
Координаты цветности	координата x: от 0,0039 до 0,7347 координата y: от 0,0048 до 0,8338	0,001
Яркость	10–80000 кд/м <sup>2</sup>	6 %

Эталон используется для измерения характеристик различных энергосберегающих источников излучения и систем на их основе, а также для калибровки люксметров, фотометров, яркомеров и колориметров.

#### **4.3 Национальный эталон единицы спектральной чувствительности приемников излучения (НЭ РБ 17-10)**

Эталон введен в действие в 2010 г. Эталон воспроизводит, хранит и передает единицу спектральной чувствительности приемников оптического излучения. Актуальность создания эталона обусловлена тем, что спектральная чувствительность приемника излучения влияет на точность измерения фотометрических величин.

В состав эталона входят монохроматор со встроенным приемником-свидетелем для устранения влияния флуктуаций осветителя; группа трап-детекторов, изготовленных на основе фотодиодов типа S1337 (Hamamatsu, Япония); передвижная механизированная платформа; видеокамера для юстировки приемников оптического излучения (рисунок 4.2).

Технические характеристики эталона представлены в таблице 4.3.



Рисунок 4.2 – Внешний вид эталона единицы спектральной чувствительности приемников излучения

Таблица 4.3 – Технические характеристики эталона единицы спектральной чувствительности приемников излучения

Измеряемая величина	Диапазон	Расширенная неопределенность ( $k=1,65$ ; $P=0,95$ )
Спектральная чувствительность приемников излучения	350–400 нм	0,965 %
	400–750 нм	0,342 %
	750–1100 нм	0,373 %

Эталон используется для исследования приемников оптического излучения, применяемых в фотометрах различного назначения, люксметрах, колориметрах и т. д., при проведении научно-исследовательских работ в области фотометрии, спектрофотометрии и колориметрии.

#### 4.4 Исходный эталон единицы белизны

Эталон разработан и введен в эксплуатацию в 2008 г. Предназначен для хранения и передачи единицы белизны различных светоотражающих материалов нижестоящим по рангу эталонам и рабочим средствам измерений.

Эталон основан на группе прецизионных спектроколориметров с различной геометрией освещения/наблюдения, мерах белизны, изготовленных из молочного стекла типа МС-20, и бумаги, содержащей флуоресцирующие оптические вещества. Эталон получает единицу белизны от шведского института «INNVENTIA», который имеет ранг уполномоченной лаборатории Технического комитета ИСО/ТК6 «Бумага, картон и целлюлоза».

Внешний вид эталона представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Внешний вид исходного эталона единицы белизны

В таблице 4.4 представлены технические характеристики эталона.

Таблица 4.4 – Технические характеристики эталона единицы белизны

Измеряемая величина	Диапазон	Расширенная неопределенность ( $k=1,65$ ; $P=0,95$ )
Яркость по ИСО, $R_{457}$	0–2000 единиц белизны, выраженных в %	0,5 единиц белизны (для материалов, содержащих флуоресцирующие оптические вещества)
Индекс белизны по МКО	0–200 единиц белизны, выраженных в %	1,0 единиц белизны (для материалов, не содержащих флуоресцирующие оптические вещества)

Эталон может использоваться промышленными предприятиями для улучшения качества выпускаемой продукции. Белизна является важным показателем, характеризующим качество изготовления бумаги, текстиля, пигментов, сортность муки и хлебопродуктов и т. п.

#### 4.5 Исходный эталон единицы средней мощности лазерного излучения

Эталон создан и эксплуатируется с 2006 г.

В состав эталона входит комплекс аппаратуры для измерения средней мощности лазерного излучения; комплекс аппаратуры для передачи размера единицы средней мощности лазерного излучения; комплекс аппаратуры для управления, сбора и обработки измерительной информации.

Внешний вид эталона представлен на рисунке 4.4.

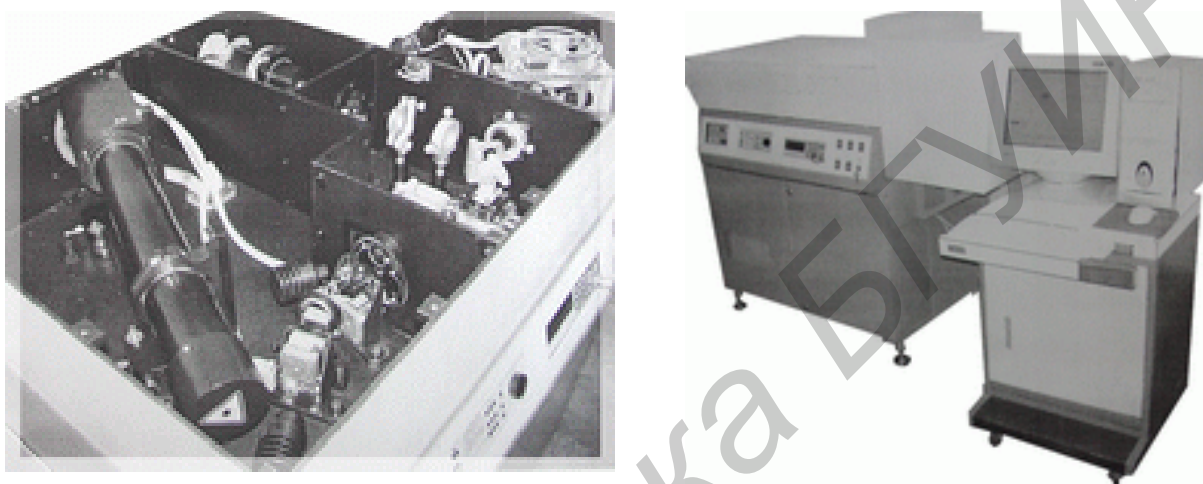


Рисунок 4.4 – Внешний вид исходного эталона единицы средней мощности лазерного излучения

Эталон воспроизводит среднюю мощность непрерывного лазерного излучения в диапазоне от 0,05 до 1,3 Вт на фиксированных длинах волн лазерного излучения – 0,532 и 10,6 мкм. СКО воспроизведения не более 0,4 %. Погрешность передачи размера единицы поверяемым (калибруемым) средствам измерений, выраженная в виде СКО, не более 0,5 %.

Эталон сличался с Государственный первичным эталоном единицы средней мощности лазерного излучения (ГЭТ 28-91) России (ФГУП «ВНИИОФИ»).

Эталон используется для испытаний, поверки и калибровки средств измерений средней мощности лазерного излучения; в здравоохранении (для измерения мощности излучения лазерных терапевтических и других установок); в промышленности, а также в области охраны труда в части лазерного излучения.

Созданные эталоны отвечают мировым стандартам и в большой степени удовлетворяют текущие потребности потребителей. В настоящее время в БелГИМ также ведутся работы по созданию национального эталона единицы светового потока.



## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Эталоны Республики Беларусь в области фотометрии / Н. В. Баковец [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2012. – №2 (5). – С. 63–66.
- 2 Луизов, А. В. Цвет и свет /А. В. Луизов. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
- 3 Степанов, Б. И. Введение в современную оптику. Фотометрия. О возможном и невозможном в оптике / Б. И. Степанов. – Минск : Наука и техника, 1989. – 254 с.
- 4 ISO 80000-7:2008. Величины и единицы. Часть 7. Свет.
- 5 Thorlabs: Power Meter and Sensor Tutorial [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.thorlabs.de>.

Библиотека БГУИР

*Учебное издание*

# **ИЗМЕРЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ**

В трех частях

Часть 1

**Батай Людмила Евгеньевна**  
**Гурский Александр Леонидович**  
**Миرونчик Виолетта Викторовна**

## **ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *Е. Д. Степуть*

Подписано в печать 07.10.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 252.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
220013, Минск, П. Бровки, 6