

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Институт оптики и оптических технологий

Кафедра метрологии и технологии оптического производства

Г.В. Симонова

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

ЭТАЛОННЫЕ СРЕДСТВА ОПТИЧЕСКОГО
ДИАПАЗОНА

Новосибирск
СГГА

Тема 1. Основные термины и определения

С физической точки зрения источником света может быть названа любая материальная система, излучающая электромагнитная энергия в оптической области спектра. *Оптической областью спектра* принято называть участок длин волн, расположенных от 0,4 мкм до 5 мкм на шкале электромагнитных волн.

Таблица 1 – Шкала электромагнитных волн

РАДИОДИАПАЗОН		Сверхдлинные	более 10 000 м
		Длинные	10 000-1000 м
		Средние	1 000-100 м
		Короткие	100-10 м
		Ультракороткие:	менее 10 м
		метровые	10-1 м
		дециметровые	10-1 дм
		сантиметровые	10-1 см
		миллиметровые	10-1 мм
		субмиллиметровые	1-0,4 мм
ОПТИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН	Инфракрасные		0,4 мкм-0,76мкм
		дальний	10 мкм-0,4 мм
		средний	1,5 мкм-10 мкм
		ближний	0,76 мкм-1,5 мкм
	Видимые:		0,76-0,36 мкм
		красные	0,76-0,62 мкм
		оранжевые	0,62-0,59 мкм
		желтые	0,59-0,56 мкм
		зеленые	0,56-0,5 мкм
		голубые	0,5-0,48 мкм
		синие	0,48-0,45 мкм
		фиолетовые	0,45-0,36 мкм
		Ультрафиолетовые	400-5 нм
РЕНТГЕНОВСКИЙ ДИАПАЗОН			5-0,004 нм
γ-ИЗЛУЧЕНИЕ			менее 0,004 нм

Источники света могут быть *естественными* (светящиеся небесные тела, молнии и т.д.), так и *искусственными* (свеча, электрическая лампочка, лазер).

Длина волны возникающего излучения определяется энергией, которую забирает квант света из системы, и подчиняется соотношению Планка:

$$\frac{hc}{\lambda} = h\nu = \Delta W \quad (1.1)$$

Для обеспечения единства измерений любой физической величины важно, чтобы единицы были одинаковы в их вещественном выражении в тех образцах (эталонах), с которыми сравнивается измеряемая физическая величина. В то же время, очевидно, что любой такой образец создается специально, и никакие два подобных образца не могут быть сделаны абсолютно одинаковыми: реальные размеры единицы в образцах обязательно будут в той или иной мере отличаться друг от друга. Отсюда следует, что среди таких образцов следует выбрать и узаконить какой-либо один, наилучшим

образом соответствующий определению единицы, в качестве самого точного эталона (исходного эталона единицы), относительно которого затем определять и контролировать размер единицы для всех остальных эталонов и средств измерений.

При наличии большого парка рабочих средств измерений различной точности возникает необходимость в создании системы эталонов различной степени точности, и тем самым — к иерархической соподчиненности эталонов единицы в такой системе. Именно по такому иерархическому принципу разрабатываются в нашей стране общероссийские поверочные схемы для средств измерений отдельных физических величин. Эти поверочные схемы являются нормативными документами (как правило, в виде ГОСТ), устанавливающими номенклатуру и соподчиненность средств измерений данной физической величины, обеспечивающих рациональную систему передачи размера единицы от единого исходного эталона всем имеющимся в стране эталонам и средствам измерений данной физической величины.

Во главе любой из действующих общероссийских поверочных схем, стоит государственный эталон России единицы данной физической величины, обеспечивающий централизованное воспроизведение и хранение единицы на территории РФ для передачи ее размера средствам измерений, а так же эталонам соподчиненным с исходным в соответствии с утвержденной поверочной схемой.

Единство измерений — это характеристика измерительного процесса, означающая, что результаты измерений выражаются в установленных и принятых в законодательном порядке единицах измерений и оценка точности измерений имеет надлежащую доверительную вероятность.

Главные принципы единства измерений:

1) определение физических величин с обязательным использованием государственных эталонов;

2) использование утвержденных в законодательном порядке средств измерений, подвергнутых государственному контролю и с размерами единиц измерения, переданными непосредственно от государственных эталонов;

3) использование только утвержденных в законодательном порядке единиц измерения физических величин;

4) обеспечение обязательного систематического контроля над характеристиками эксплуатируемых средств измерений в определенные промежутки времени;

5) обеспечение необходимой гарантированной точности измерений при применении калиброванных (поверенных) средств измерений и установленных методик выполнения измерений;

6) использование полученных результатов измерений при обязательном условии оценки погрешности данных результатов с установленной вероятностью;

7) обеспечение контроля над соответствием средств измерений метрологическим правилам и характеристикам;

8) обеспечение государственного и ведомственного надзора за средствами измерений.

Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» был принят в 1993 г. До принятия данного Закона нормы в области метрологии не были регламентированы законодательно. На момент принятия в Законе присутствовало много новшеств начиная от утвержденной терминологии и заканчивая лицензированием метрологической деятельности в стране. В Законе были четко разграничены обязанности государственного метрологического контроля и государственного метрологического надзора, установлены новые правила калибровки, введено понятие добровольной сертификации средств измерений.

Развитие и совершенствование оптических и оптико-электронных приборов для измерения превышений, возрастающие требования к их точности и надежности, а также автоматизация процесса измерений, приводит к необходимости создания новых методов и средств испытаний с целью поверки и калибровки геодезических приборов. Наибольшие трудности возникают при создании эталонных средств поверки и калибровки высокоточных приборов, таких как, высокоточные теодолиты, тахеометры, астрономические универсалы, лазерные трекеры и высокоточные нивелиры (оптические и цифровые).

Разработка современных эталонных средств измерений (СИ) направлена на обеспечение единства измерений, сокращение времени испытаний, повышение их точности и надежности результатов, оперативную обработку полученных данных. Для оптико-электронных приборов важное значение имеет исследование короткопериодической (внутришаговой) составляющей суммарной погрешности.

В этой связи актуальным является разработка новых методов и средств поверки и калибровки современных оптико-электронных и цифровых приборов.

Основными требованиями к техническим и метрологическим характеристикам стендов для поверки и калибровки современных приборов для измерения превышений являются:

- многофункциональность стендового оборудования;
- уменьшение времени поверки и калибровки геодезического прибора;
- автоматизация процесса измерений;
- оперативная обработка данных измерений с помощью специальных микропроцессоров;
- использование альтернативных эталонных мер - кодовых и растровых датчиков, лазерных интерферометров, эталонных жезлов и концевых мер длины;
- возможность исследования приборов в условиях приближенных к рабочим условиям;

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Фотометрические величины

1. Лучистый или световой поток, Φ

Если источник испускает свет, то он постоянно теряет энергию, если за это время t источник испускает энергию W , то поток Φ есть энергия, испускаемая в единицу времени $\Phi = \frac{W}{t}$. Если энергия, испускаемая источником, изменяется,

то $\Phi_{CP} = \frac{W_{полн}}{t_{полн}}$, и Φ_{CP} характеризует среднее значение потока. Более полной

характеристикой нестабильного источника является величина $\Phi = \frac{dW}{dt}$, где dW – энергия, испущенная за бесконечно малый промежуток времени dt , в течении которого поток не изменялся. Таким образом, поток есть мощность световой волны.

2. Спектральная плотность лучистого потока, ϕ_λ

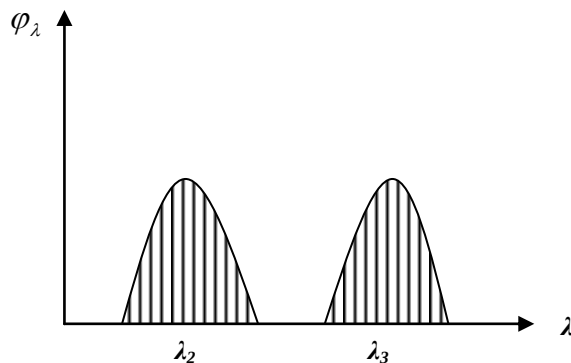
Форма существования энергии светового поля предполагает распределение этой энергии по разным длинам волн.

Различные источники света имеют своеобразие, присущее только им, распределение энергии по спектру. Для того, чтобы охарактеризовать распределение энергии по спектру вводится понятие спектральной плотности потока ϕ_λ . Если в достаточно малом интервале длин волн $d\lambda$ поток не зависит

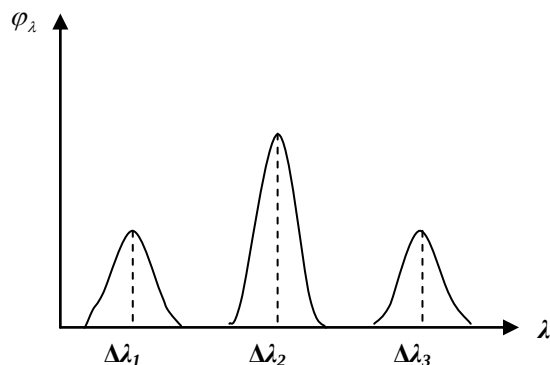
от λ и равен $d\Phi_\lambda$, то $\phi_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{d\lambda}$ – т. е. поток, излучаемый в единичном интервале длин волн.

По характеру зависимости ϕ_λ от λ спектры, излучаемые источниками, делятся на:

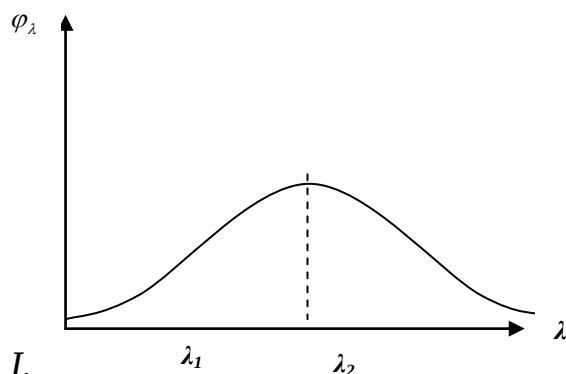
а) *линейчатые* (газы, пары металлов – отдельные изолированные атомы). Излучение сосредоточено на узких отдельно расположенных спектральных линиях.



б) *полосовые* (испускаются молекулами, находящимися в возбужденном состоянии). Энергия светового потока сосредоточена на отдельных спектральных участках.

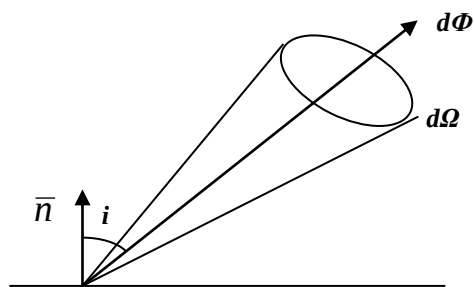


в) *сплошные* (испускаются нагретыми телами). Энергия светового потока распределена по всему спектральному интервалу $0 < \lambda < \infty$.



3. Сила света, I .

Характеристика источника. Поток испускается в различных направлениях и в общем случае, может зависеть от направления. Можно выбрать достаточно малый телесный угол $d\Omega$, в пределах которого величина потока не зависит от направления и в котором испускается поток $d\Phi$, тогда $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ - лучистый поток, испускаемый источником в единичном телесном угле. Для точечного источника сила света не зависит от направления и $I = \frac{\Phi}{4\pi}$, где Φ – полный поток, излучаемый источником по всем направлениям. $\Phi = 4\pi \cdot I$.

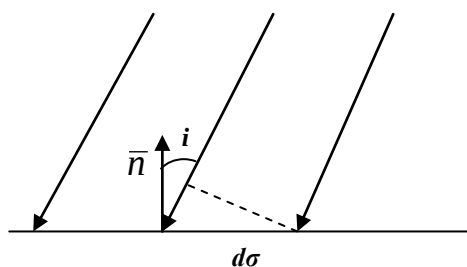


4. Освещённость E , светимость M .

Первое понятие характеризует освещенную поверхность, второе – источник света.

Освещенность $E = \frac{d\Phi}{d\sigma}$ – лучистый поток, приходящийся на единицу поверхности.

Если на поверхность падает пучок параллельных лучей можно ввести понятие освещенности:



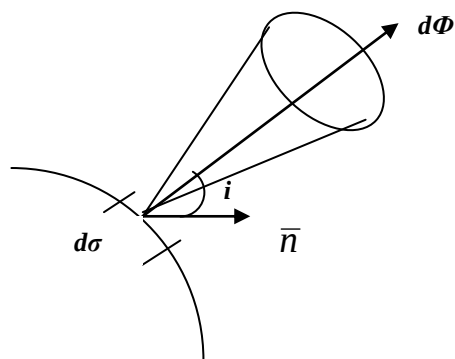
$$E = \frac{d\Phi}{d\sigma} = \frac{d\Phi}{d\sigma_0 / \cos i} = E \cdot \cos i.$$

$d\sigma \cdot \cos i = d\sigma_0$ – площадку, ориентировочно $\perp$ к потоку – или проекция освещенной площадки $d\sigma$ на плоскость, $\perp$ направлению распространения $d\sigma = d\sigma_0 / \cos i$;

$\frac{d\Phi}{d\sigma_0}$ – нормальная освещенность E_0 – освещенность поверхности, на которую поток падает нормально.

б) Светимость аналогична освещенности $M = \frac{d\Phi}{d\sigma}$ – поток $d\Phi$ исходит с площадки источника $d\sigma$. Светимость – это лучистый поток, испускаемый единицей светящейся поверхности.

5. Яркость, L .



Характеризует источник, Может зависеть от направления и от точки поверхности.

Пусть в телесном угле $d\Omega$ с площадки $d\sigma$ в направлении, составляющая угол i с нормалью к поверхности излучается поток

$$d^2\Phi, \text{ тогда } L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot d\sigma \cdot \cos i}.$$

Яркость – это лучистый поток в единичном телесном угле, с единицы площади поверхности в заданном направлении или – лучистый поток в единичном телесном угле, с единицы площади проекции поверхности на плоскость, перпендикулярную оси телесного угла.

6. Экспозиция, H .

Экспозиция характеризует накопление единиц поверхности энергии за заданный промежуток времени.

$$H = E \cdot t.$$

Единицы измерения фотометрических величин

Для количественной оценки характеристик светового потока и распределение его энергии по спектральному интервалу существует несколько систем световых единиц, основанные на разных видах воздействия светового потока на вещество. Наиболее распространёнными является *энергетическая система*, которая получила название объективной, т.к. основана на энергии, переносимой световым потоком; и *световая система*, основанная на реакции человеческого глаза, которая получила название субъективной.

Исторически световая система появилась первой, т. к. единственным приёмником был глаз, нужно было сравнить яркости различных предметов. Энергетическая система появилась тогда, когда в качестве приёмника начали использовать объективные приёмники – фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, болометры и т. д.

Таблица 2 – Энергетическая и световая системы

Величина	Формула	Световая система	Энергетическая система
Световой поток, Φ	$\frac{dW}{dt}$	$Лм$	$\frac{Дж}{с} = 1Вт$
Спектральная плотность лучистого потока, Φ_λ	$\frac{d\Phi_\lambda}{d\lambda}$	$\frac{Лм}{мкм}$	$\frac{Вт}{нм}, \frac{Вт}{мкм}$
Сила света, I	$\frac{d\Phi}{d\Omega}$	$K\vartheta = \frac{Лм}{ср}$	$\frac{Вт}{ср}$
Освещённость (светимость), $E(M)$	$\frac{d\Phi}{d\sigma}$	$\frac{Лм}{м^2} = Лк$	$\frac{Вт}{м^2}$
Яркость, L	$\frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot d\sigma \cdot \cos i}$	$\frac{K\vartheta}{м^2}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot ср}$
Экспозиция, H	$E \cdot t$	$Лк \cdot с$	$\frac{Вт}{м^2} \cdot с$

Энергетическая система основана на преобразовании оптического излучения в другие виды энергии.

Световая система основана на реакции человеческого глаза. Для нормирования этой реакции была введена основная единица в систему СИ, которая получила название «Кандела», и определяется по эталону.

Часто поток света, измеренный в Вт называется лучистым, а поток, измеренный в люменах – световым.

Связь единиц световой и энергетической систем

Световая система возникла в результате реакции человеческого глаза на часть участка спектра оптического диапазона. Мера реакции глаза g_λ зависит от длины волны излучения.

$$g_\lambda = \frac{d\Phi'_\lambda}{d\Phi_\lambda},$$

т.е. в достаточно узком спектральном интервале $d\lambda$, в пределах которого g_λ остается постоянной. $d\Phi_\lambda = \gamma_\lambda \cdot d\lambda$ – через спектральную плотность падающего потока. $d\Phi'_\lambda$ – часть падающего потока, которая эффективно преобразовалась в другой вид энергии. Спектральная чувствительность g_λ имеет размерность лм/вт.

Для глаза $[g_\lambda] = \frac{[d\Phi'_\lambda]}{[d\Phi_\lambda]} = \frac{\text{лм}}{\text{вт}}$ и т. д.

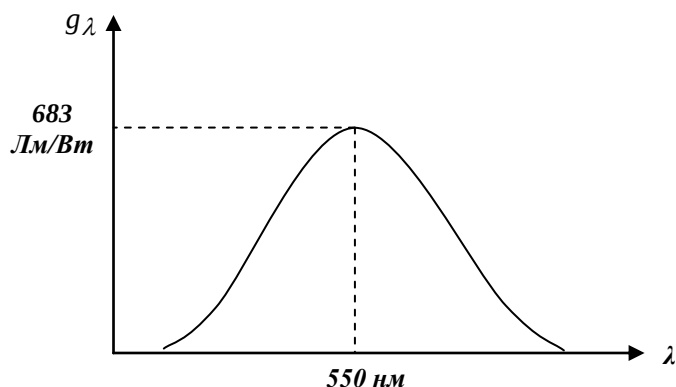
Зная g_λ в $\frac{\text{лм}}{\text{вт}}$, можно найти Φ в люменах:

$$d\Phi'_\lambda = g_\lambda d\Phi_\lambda = g_\lambda \cdot \varphi_\lambda d\lambda \quad (5.1)$$

$$\text{лм} = \frac{\text{лм}}{\text{вт}} \cdot \frac{\text{вт}}{\text{нм}} \cdot \text{нм};$$

$$[\varphi_\lambda] = \frac{\text{вт}}{\text{нм}};$$

Для каждой длины волны существует свой коэффициент преобразования g_λ и его максимальное значение составляет 683 Лм/Вт на длине волны 550 нм.



В справочниках, как правило, приводится нормированное значение g_λ .

$$v_{\lambda} = \frac{g_{\lambda}}{(g_{\lambda})_{\max}},$$

где v_{λ} – безразмерная величина, равная 1 для $\lambda = 550$ нм и меньшая единицы для всех других λ . Кривая относительной спектральной чувствительности подобна кривой g_{λ} .

Тема 2. Законы теплового излучения.

По форме преобразования различных видов энергии в оптическое излучение можно выделить три типа источников:

- тепловые;
- люминесцентные;
- смешанные.

ТЕПЛОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Для источников этого типа излучение формируется за счёт преобразования внутренней энергии вещества в излучение. Внутренняя энергия объекта характеризуется температурой, которая является термодинамической функцией состояния системы. Количественно процесс преобразования описывается законами теплового излучения.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источником лучистой энергии являются все тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля. Температурное излучение полностью определяется температурой тела. Одновременно с испусканием происходит поглощение падающего на тело излучения. В соответствии с законом сохранения энергии между излучательной способностью тела и поглощательной должна существовать зависимость. Эта связь была установлена в 1860 г. и получила название «Закон Кирхгофа».

Закон Кирхгофа

На основании закона Кирхгофа было установлено, что для теплового излучения отношение излучательной и поглощательной способности для данной длины волны и температуры есть величина постоянная, т.е. чем больше тело поглощает, тем больше оно излучает, т.е.

$$\frac{M_{\lambda T}^{(1)}}{a_{\lambda T}^{(1)}} = \frac{M_{\lambda T}^{(2)}}{a_{\lambda T}^{(2)}} = \dots = \frac{M_{\lambda T}^{(m)}}{a_{\lambda T}^{(m)}} = f(\lambda, T). \quad (2.1)$$

Если тело поглощает всю падающую на него энергию, т.е. $a_{\lambda T} = 1$, то оно называется абсолютно чёрным телом. В природе многие тела приближаются по свойствам к АЧТ.

Из закона Кирхгофа следует:

$$M_{\lambda T} = a_{\lambda T} \cdot f(\lambda, T) = a_{\lambda T} \cdot M_{\lambda T}^{AЧТ} \quad (2.2)$$

т.е. излучательная способность любого тела меньше излучательной способности АЧТ, т.к. $a_{\lambda T} < 1$.

Закон Кирхгофа справедлив также и для интегрального излучения при данной температуре.

Закон Стефана – Больцмана

В 1879 г. Стефан экспериментально, а в 1884 г. Больцман теоретически на основании второго закона термодинамики установили, что энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры

$$M_T = \sigma T^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Учитывая, что АЧТ поглощает энергию от окружающей среды, закон Стефана–Больцмана запишем следующим образом:

$$M_T = \sigma(T_{\text{АЧТ}}^4 - T_{\text{ср}}^4) \text{ Вт/м}^2. \quad (2.3)$$

Если разница $T_{\text{АЧТ}}$ и среды мала, то $\Delta M_T = 4\sigma T^3 \Delta T$ — с единицы поверхности теплоотдача излучением.

Излучение серых тел

Если коэффициент поглощения меньше единицы, но не зависит от длины волны, а является функцией только температуры, то такие тела называются *серыми*. Для серых тел кривая спектральной плотности энергетической светимости в относительных единицах совпадает с аналогичной кривой чёрного тела, имеющего такую же температуру.

Численно коэффициент излучения серого тела равен коэффициенту поглощения этого тела, т.е. источник излучает столько энергии, сколько поглощает.

$$\frac{M_{\lambda T}^c}{a_T^c} = M_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}; \quad M_{\lambda T}^c = a_T^c \cdot M_{\lambda T}^{\text{АЧТ}} = \varepsilon_T \cdot M_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}; \quad a_T^c = \varepsilon_T. \quad (2.4)$$

Для серого тела можно записать

$$M_{\text{с.т.}} = \varepsilon_T \sigma T^4 = a_T \cdot \sigma T^4.$$

Коэффициент излучения сильно зависит от состояния поверхности. Гладкие поверхности имеют существенно меньший коэффициент излучения, чем шероховатые.

Селективные излучатели

Селективными излучателями называются тела, для которых коэффициент серости (степень черноты) является функцией длины волны.

$$\varepsilon_{\lambda T} = f(\lambda).$$

Для селективных излучателей выполняется лишь закон Кирхгофа. Например, газы.

ε_T — приводится в справочных таблицах.

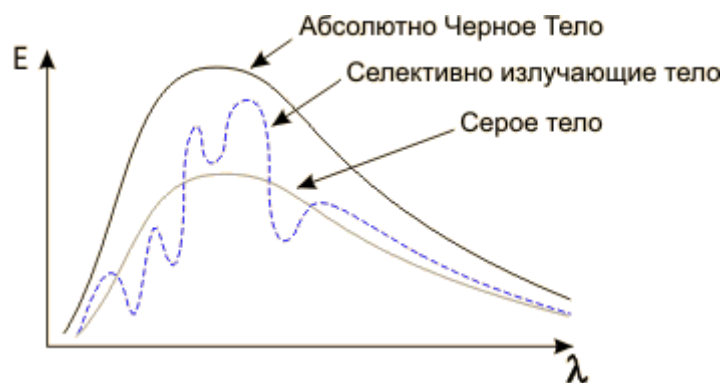


Рисунок 2.1

Закон смещения Вина

Закон смещения Вина был открыт в 1890 г. Он устанавливает связь между длиной волны, при которой спектральная плотность энергетической светимости принимает максимальное значение, и абсолютной температурой.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (2.5)$$

где $b = 0,002898 \text{ м} \cdot \text{град}$, т.е. чем больше температура излучателя, тем больше его смещение в коротковолновой области спектра.

Формула Планка

В соответствии с графиком на рисунке (2.2).

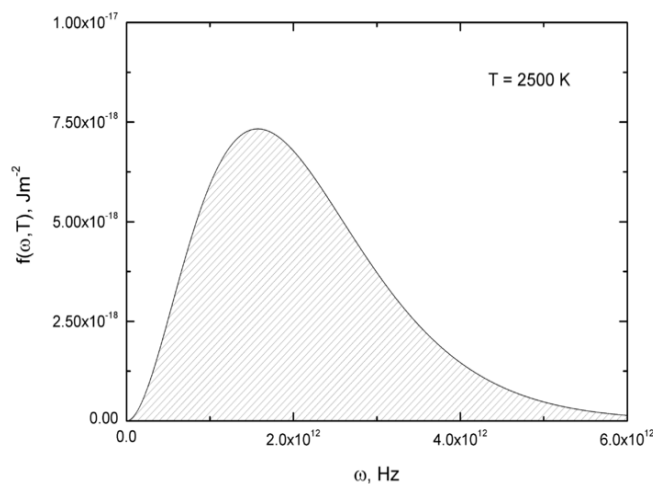


Рисунок 2.2

Интегральная излучательная способность определяется соотношением:

$$\int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = M(T) = \sigma T^4. \quad (2.6)$$

Явный вид функции $f(\lambda, T)$. Был определен только в 1900 г. на основании постулатов Бора и квантовой теории Планка. Эта зависимость получила

название *формулы Планка*.

$$M_{\lambda T} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.7)$$

где $C_1 = c^2 \cdot 2\pi k$, $C_2 = \frac{c \cdot h}{k}$.

На основании формулы Планка рассмотренные ранее законы могут быть получены аналитически, например, закон Стефана-Больцмана – это результат интегрирования $M_{\lambda T}$ по всему спектральному интервалу, а закон Вина соответствует координате экстремума функции $f(\lambda, T)$.

Для практических расчётов обычно используется формула Планка, преобразованная к относительному виду. Для этого введём новые переменные:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}; & y &= \frac{r\lambda}{r\lambda_{\max}}; \\ r\lambda_{\max} &= aT^5; & \lambda_{\max} &= \frac{b}{T}, \text{ получим:} \\ y &= \frac{C_1}{ab^5} \cdot x^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{xb}} - 1 \right)^{-1} & \rightarrow & y = C'_1 x^{-5} \cdot \left(e^{C'_2 \cdot \frac{1}{x}} - 1 \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

В эту формулу не входит температура и всего 2 переменные.

Задавая x , можно найти y . Значения x и y приводятся во всех справочниках по физической оптике.

Пример 1:

1) для данной T $\lambda_{\max}$ всегда равна $\frac{b}{T}$;

2) задавая λ_i , находим $x_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{\max}}$;

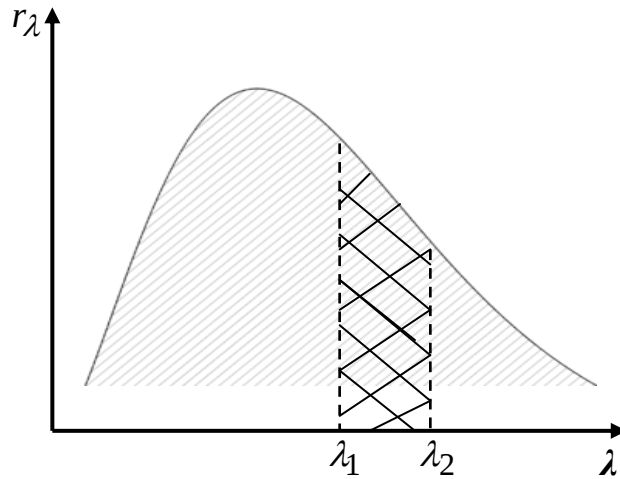
3) затем находим y_i любым способом (с помощью графика, таблицы, Далее

нужно перейти от y к M_{λ} , т.е. $M_{\lambda} = y \cdot M_{\lambda_{\max}}$.

$$M_{\lambda_{\max}} = aT^5 - \text{const} \rightarrow M_{\lambda T} = y \cdot aT^5.$$

Определение доли излучения в конечном интервале спектра

Наиболее распространённая практическая задача – нахождение лучистого потока, приходящегося на определённый интервал спектра. В этом случае удобно заменить разницу интегралов разницей долей энергий относительно общей энергии, приходящихся на заданный спектральный интервал.



Пусть имеется АЧТ при температуре T . Найти энергетическую светимость в интервале от λ_1 до λ_2 .

$$\Delta M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda, T) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda = \left[\int_0^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda - \int_0^{\lambda_1} M_\lambda d\lambda \right] \cdot \frac{\int_0^\infty M_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty M_\lambda d\lambda} =$$

$$= M \cdot \left(\frac{\int_0^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty M_\lambda d\lambda} - \frac{\int_0^{\lambda_1} M_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty M_\lambda d\lambda} \right).$$

Если теперь и числитель, и знаменатель каждой дроби поделить на $M_{\lambda_{\max}}$, то получим Y и сменим пределы интегрирования, тогда

$$\Delta M = M \cdot \left(\frac{\int_0^{x_2} y dx}{\int_0^\infty y dx} - \frac{\int_0^{x_1} y dx}{\int_0^\infty y dx} \right) = M \cdot (Z_2 - Z_1),$$

где Z — функция, не зависящая от температуры.

$$\Delta M_{\lambda_1 - \lambda_2} = \sigma T^4 (Z_2 - Z_1). \quad (2.9)$$

Физически это отношение световых потоков в интервалах от 0 до λ_i ко всему потоку АЧТ.

Запишем порядок расчёта энергии, приходящейся на спектральный интервал: $\lambda_1 - \lambda_2$ при данной T .

- 1) Находим $\lambda_{\max}$: $\lambda_{\max} = \frac{2897}{T} \text{ (мкм)}$.
- 2) Определяем x_1 и x_2 по формулам:
- $$x_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{\max}}; \quad x_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{\max}}.$$

3) По таблице находим Z_1 и Z_2 соответственно.

4) По формуле находим

$$\Delta M = M \cdot (Z_2 - Z_1) = \sigma T^4 (Z_2 - Z_1).$$

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ, ЦВЕТОВАЯ, ЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ

Излучение тел используют для определения их температуры. Для этого сравниваются энергетические яркости или спектральные плотности энергетической светимости АЧТ и испытуемого источника. Причём оптические приборы, при помощи которых производятся измерения, градуируются по АЧТ.

1. Энергетическая температура

Энергетическая температура – температура АЧТ, при которой его энергетическая яркость равна энергетической яркости исследуемого тела.

$$B^{AЧТ}(T_{эн}) = B(T_{ист}).$$

Используя закон Стефана–Больцмана и Ламберта, запишем:

$$\frac{\sigma}{\pi} T_{эн}^4 = \varepsilon(T) \cdot \frac{\sigma}{\pi} T^4,$$

$$B = \frac{R}{\pi}, \quad \text{а} \quad R = \sigma T^4.$$

Если $\varepsilon(T) \leq 1$, то

$$T = 4 \sqrt[4]{\frac{T_{эн}^4}{\varepsilon(T)}} = \frac{T_{эн}}{\sqrt[4]{\varepsilon(T)}}. \quad (2.9)$$

(* $T_{эн}$ всегда $\leq T$.)

Приборы для измерения $T_{эн}$ называются *пирометрами* (или *радиометрами*) суммарного излучения.

Данный метод даёт большую ошибку при измерении T слабо нагретых тел.

2. Яркость температура

Яркостная температура (или чёрная) – температура АЧТ, при которой спектральная плотность энергетической яркости его равна спектральной плотности энергетической яркости исследуемого тела при той же длине волны.

Обычно измерения проводятся при $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$.

$$B_{\lambda}^{АЧТ}(T_{\text{ярк.}}) = B_{\lambda}(T)$$

$$B = \frac{R}{\pi}$$

$$\frac{C_1}{\pi} \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{ярк.}}}} - 1 \right)^{-1} = \varepsilon_{\lambda}(T) \cdot \frac{C_1}{\pi} \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \rightarrow$$

$$\frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{ярк.}}}} - 1} = \varepsilon_{\lambda}(T) \cdot \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$$

$$e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 = \varepsilon_{\lambda}(T) \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{ярк.}}}} - 1 \right)$$

или получаем

$$\frac{C_2}{\lambda T} = \ln \left[1 + \varepsilon_{\lambda}(T) \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{ярк.}}}} - 1 \right) \right]$$

выражение:

$$T = \frac{C_2}{\lambda \cdot \ln \left[1 + \varepsilon_{\lambda}(T) \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{ярк.}}}} - 1 \right) \right]}$$

(2.10)

* *Истинная температура всегда больше яркостной. Измеряется она теми же пирометрами, но с фильтрами.*

3. Цветовая температура

Цветовая температура – температура АЧТ, при которой спектральный состав его излучения одинаков со спектральным составом излучения исследуемого тела, т.е. отношение спектральных плотностей энергетической яркости при двух заданных длинах волн одинаков.

Т.к. большинство источников селективны, то истинная температура не равна цветовой. Они равны только для серых источников. В случае измерения цветовой температуры нет необходимости определять абсолютную величину

излучательной способности, достаточно знать, как она меняется при переходе от одной волны к другой, т.е. необходимо знать $\varepsilon_{\lambda_1} / \varepsilon_{\lambda_2}$.

Цветовая температура меньше зависит от состояния поверхности тела, чем яркостная и энергетическая. В фотометрии принято проводить измерения при $\lambda_1 = 0,655 \text{ мкм}$ и $\lambda_2 = 0,467 \text{ мкм}$.

Отсюда получаем:

$$T = \frac{T_{\text{цв.}}}{1 + T_{\text{цв.}} \cdot \frac{\ln \varepsilon_1 / \varepsilon_2 + \ln r_1 / r_2}{C_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}}. \quad (2.11)$$

Для тел со сплошным спектром излучения цветовая температура ближе к истинной, чем яркостная и энергетическая. Для прикладных задач для источников света со сплошным спектром цветовая температура используется как параметр для сравнения. Например,

- 2700 К – «тёплый белый» свет;
- 4200 К – «холодный белый» свет;
- 6400 К – «дневной белый» свет.

«Тёплый белый» свет соответствует цвету света обычной лампы накаливания (желтоватый). Лампы такой цветовой температуры лучше всего подходят для использования дома.

Свет лампы с цветовой температурой «холодный белый» не имеет тональной окраски. Такие лампы наиболее подходят для освещения офисов и торговых помещений.

Лампы цветовой температуры «дневной белый» дают свет голубоватого оттенка. Эти лампы чаще всего используют для освещения складских и производственных помещений, подъездов жилых домов и для наружного освещения.

Тема 3 Люминесцентные источники света

Люминесценцией называют излучение вещества сверх его теплового излучения при длительности, большей 10^{-10} с, за счет подводимой к нему в той или иной форме энергии. При этом осуществляются непосредственно резонансные переходы возбужденных атомов в невозбужденное состояние.

$$M_{\lambda}(\lambda) = M(\lambda, T) - M^{AЧТ}(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda, T). \quad (3.1)$$

Спектр источников излучения обусловлен структурой электронных уровней данного вещества и может иметь как линейчатый, так и полосовой характер.

В зависимости от способа возбуждения атомов различают следующие виды люминесценции:

- *фотолюминесценцию*, при которой атом возбуждается квантами поглощённого излучения оптической части спектра; этот вид широко применяют в источниках света, в которых ультрафиолетовые потоки излучения при помощи люминофора преобразуются в излучение видимой части спектра;
- *рентгенолюминесценцию* — возбуждение, производимое квантами поглощенных рентгеновских лучей;
- *катодолюминесценцию* — возбуждение, производимое за счет кинетической энергии электронов, бомбардирующих люминофор или молекулы газов (например, излучение в электронно-лучевых трубках);
- *электролюминесценцию* — возбуждение, производимое переменным электрическим полем;
- *хемилюминесценцию* — для возбуждения используется химическая энергия;
- *биолюминесценцию* — для возбуждения используется биологическая энергия и т.д.

Газоразрядные источники излучения

Для применения в оптико-электронном строении наибольшее распространение получили приборы, в которых излучение оптического диапазона спектра возникает в результате электрического разряда в атмосфере инертных газов, паров металла или их смесей.

Газоразрядные источники света имеют ряд преимуществ перед лампами накаливания:

- высокий световой КПД (от 45 до 100 Лм/Вт);
- большой срок службы (1400 ч);
- яркость может меняться в широких пределах;
- газоразрядные источники можно модулировать (с частотой до 10 000 Гц);
- газоразрядные источники могут выполняться импульсными с длительностью импульса излучения от секунд до наносекунд.

Однако газоразрядные лампы имеют и существенные недостатки:

- линейчатый спектр газоразрядных ламп может исказить цветопередачу;
- при питании газоразрядных ламп переменным током промышленной частоты возникает пульсация потока излучения, что ухудшает условия наблюдения за подвижными объектами;
- газоразрядные лампы имеют более сложную схему питания, что связано с падающей вольт-амперной характеристикой и с высоким напряжением зажигания;
- некоторые лампы имеют длительный период разгорания;
- эксплуатация ламп, особенно высокого и сверхвысокого давления, более сложна;
- световые характеристики ламп существенно зависят от внешних условий.

Газоразрядные лампы обычно выполняют в виде стеклянных или кварцевых колб, в которые впаивают два (иногда три) электрода — анод и катод. Колбу наполняют тем или иным газом при различных давлениях. Если между электродами приложить напряжение, свободные ионы газа начнут перемещаться к катоду, а свободные электроны — к аноду. При этом ионы образуют пространственный заряд вблизи катода, а электроны — вблизи анода. Поскольку скорость ионов значительно меньше скорости электронов, пространственный заряд, а, следовательно, и падение напряжения вблизи катода больше, чем у анода. Такой разряд называется *тлеющим*. Механизм возникновения излучения поясняется схемой на рисунке 3. 1_.

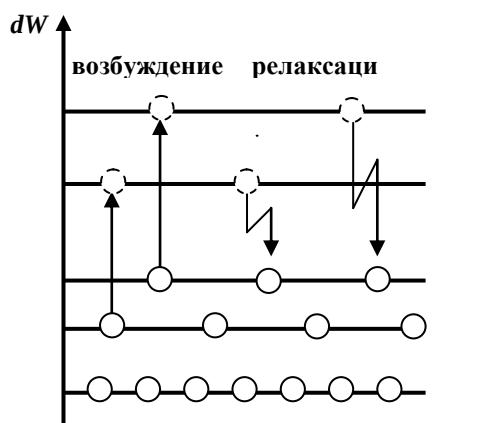


Рис. 1_

Если катод разогревается, например, за счет бомбардировки его ионами (при увеличении напряжения источника) или внешними источниками, то возникает термоэмиссия, в результате которой число электронов, вылетающих с катода, значительно увеличивается. Такой разряд называется *дуговым*. При этом уменьшается потенциал у катода и значительно увеличивается ток лампы.

Электромагнитный спектр газового разряда определяется родом газа или пара, давлением и температурой газа. При низких давлениях и температуре спектр газа линейчатый; с увеличением давления и температуры линии расширяются.

Принципиальная схема конструкции и включения лампы в сеть приведена на рис.3._2__.

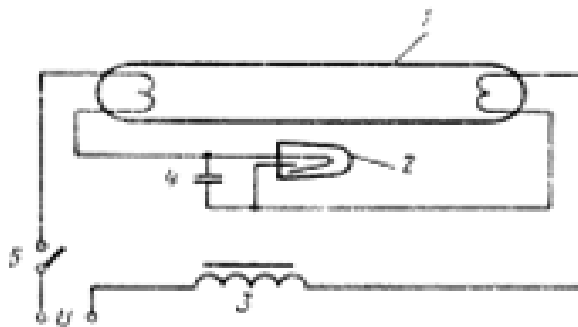


Рис. 3._2_. Схема включения люминесцентной лампы

При замыкании контактов выключателя 5 напряжение прикладывается к лампе 1 и стартеру 2, который обычно выполняют в виде биметаллической пластинки в качестве одного из электродов; он включается параллельно с конденсатором 4. При замкнутых контактах через пластинку и катод идёт ток. Электроды разогреваются, возникает термоэмиссия, и лампа зажигается. После возникновения разряда в лампе биметаллическая пластинка остывает и разрывает цепь подогрева электродов. Дроссель 3 применяют для стабилизации тока, протекающего через лампу.

Для изменения спектрального состава исходного излучения внутреннюю поверхность колбы покрывают люминофором. В качестве люминофоров используют смеси в различных пропорциях: вольфраматы кальция и магния; силикаты цинка, кадмия; фосфаты кальция, цинка и т. д. Люминофор поглощает излучение в одной области спектра, а излучает в другой. Спектральная область излучения зависит от типа люминофора, а спектр излучения приобретает полосовой характер.

Для получения источников света видимого диапазона на основе ртутной лампы внутреннюю поверхность стеклянной колбы, как правило, покрывают люминофором, который преобразует ультрафиолетовое излучение в видимое. При этом повышается качество цветопередачи, однако одновременно люминофор рассеивает видимое излучение, что уменьшает коэффициент светопередачи.

Чтобы исправить цветопередачу ртутных ламп, применяют ряд способов:

- комбинируют ртутную лампу и лампу накаливания; нить накала включается параллельно кварцевой лампе и служит одновременно ограничительным сопротивлением для ртутной лампы (отпадает необходимость в дросселе); лампа излучает в УФ-, видимой и ИК-областях и включается в сеть непосредственно, без дросселя и трансформатора; колбу часто выполняют матированной;
- внутреннюю поверхность стеклянных колб покрывают люминофором; напряжение питания таких ламп 220 В, срок службы 3–4 тыс. ч;

- к ртути добавляют кадмий; однако такие ртутно-кадмиевые лампы не получили распространения из-за низкой световой отдачи, трудности

- *Лампы тлеющего разряда* могут иметь различные газы и газовые смеси, но их принцип действия аналогичен ртутным лампам. В качестве рабочих веществ могут быть использованы газы и пары металлов, например, аргон, ксенон, криптон, натрий, цезий и т.д. Изменение рабочего вещества изменяет спектральный состав излучения, но сохраняет его **характер**.

Импульсные источники света

Импульсной лампой называется газоразрядный прибор с двумя основными токоведущими электродами (катодом и анодом) и газовым промежутком между ними, рассчитанным на возникновение там в необходимые моменты времени мощных импульсных (искровых) электрических разрядов с интенсивным световым излучением. В импульсную лампу входит также третий управляющий электрод.

Обычно импульсные лампы подключают к конденсатору, при разряде которого через лампу возникает короткая вспышка большой мощности и энергетической светимости.

Импульсные лампы выпускаются в цилиндрических, шаровых, стеклянных и кварцевых колбах. Лампы маркируют сочетанием букв и цифр.

Первая буква (И) говорит о том, что лампа импульсная; вторая — Ф — у ламп фотоосветительных и С — у стробоскопических; третья определяет форму светящегося тела лампы (К — компактная, Ц — цилиндрическая, Б — кольцевая) или форму колбы (Т — у ламп с трубчатой формой и Ш — у ламп с шаровой колбой).

Цифра, стоящая после буквенного обозначения фотоосветительных ламп, показывает энергию вспышки в джоулях, а у стробоскопических ламп — среднюю электрическую мощность в ваттах.

Пример обозначения: ИФК-2000 (импульсная, фотоосветительная, с компактной формой светящегося тела; 2000 Дж в импульсе).

Импульсные источники света имеют следующие характеристики:

- напряжение зажигания U_3 — напряжение на питающем конденсаторе, при котором в данной схеме при подаче поджигающего импульса возникает разряд;

- напряжение самопробоя U_K — напряжение, при котором возникает разряд без подачи управляющего импульса.

При увеличении частоты вспышек выше определенной нарушается возможность управления лампой: появляются самопроизвольные вспышки, и лампа может перейти в режим непрерывного горения. При понижении напряжения появляются пропуски вспышек, и лампа может прекратить зажигаться.

Для характеристики ламп введено понятие «предел управляемости», т. е. для каждой лампы имеются границы напряжения питания, зависящие от частоты.

Светодиоды

Принцип действия светодиодов основан на явлении электролюминесценции при протекании тока в структурах с p – n -переходом. Когерентное монохроматическое или спонтанное высвечивание (люминесценцию) в полупроводнике можно получить рядом методов возбуждения (накачки): оптическим возбуждением, воздействием на полупроводник пучком быстрых электронов с высокой энергией, возбуждением полупроводниковых материалов импульсами электрического поля.

Наиболее распространен метод возбуждения среды при инжекции носителей через p – n -переход. Рассмотрим инжекционное возбуждение на примере p – i – n -перехода (см. рис.4___).

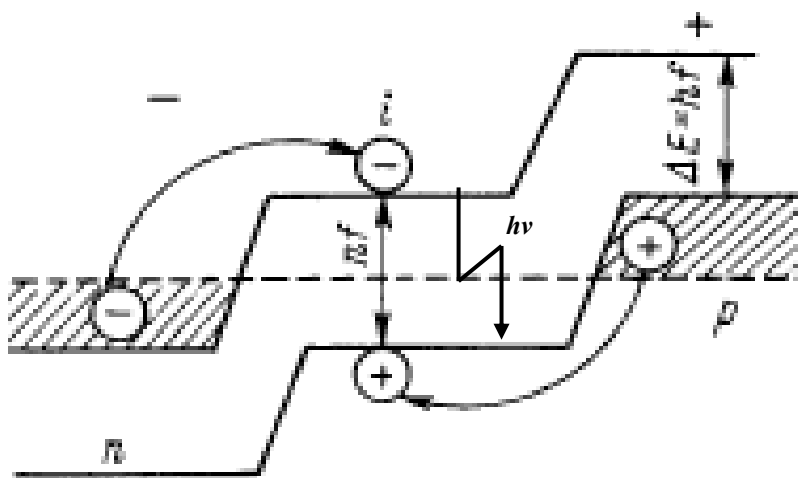


Рисунок 3.4. Расположение энергетических зон и уровня Ферми светодиода с p – n -переходом и механизм рекомбинации в модели зон полупроводника: а – расположение энергетических зон и уровня Ферми светодиода с p – i – n -переходом

Спектральная характеристика излучения носит полосовой характер и зависит от типа используемого полупроводника. Наличие примесей может менять эффективную ширину запрещённой зоны, а, следовательно, изменять спектральную характеристику излучения. Следует отметить, что спектральные характеристики светодиодов зависят от рабочего диапазона температур.

Тема 4 Типы источников света, параметры и характеристики.

Солнце. К основным характеристикам Солнца как излучателя относятся его угловые размеры, энергетические и спектральные характеристики и степень их изменения по поверхности. В зависимости от характера излучаемой энергии у Солнца различают фотосферу, обращающий слой, хромосферу и корону. Фотосфера является основным источником солнечного излучения с непрерывным спектром. В ней с увеличением глубины растет температура, что обуславливает потемнение диска к краю. Обращающий слой и хромосфера образуют атмосферу Солнца. Они состоят из светящихся газов, яркость которых в сотни раз меньше яркости фотосферы. Корона представляет собой внешнюю часть солнечной атмосферы и не имеет четкой наружной границы, ее яркость в миллион раз меньше яркости фотосферы и не превышает яркости Луны в полнолуние.

Спектр излучения Солнца за пределами земной атмосферы примерно совпадает со спектром излучения черного тела, имеющего температуру 6000 К. До поверхности Земли от Солнца через атмосферу доходит в основном излучение в диапазоне длин волн 0,3—3,0 мкм с полосами поглощения, определяемыми содержащимися в атмосфере парами воды, углекислым газом и озоном. Энергетическая освещенность, создаваемая Солнцем на площадке, перпендикулярной к направлению на Солнце, вне земной атмосферы составляет 1360 Вт/м² (в перигее 1407 Вт/м² и в апогее 1316 Вт/м²); на поверхности Земли освещенность лежит в пределах 616—913 Вт/м². В видимой области спектра за пределами атмосферы освещенность, создаваемая Солнцем, составляет $1,37 \cdot 10^6$ Лк. Иногда принимают, что в диапазоне 0,47—0,53 мкм цветовая температура Солнца равна 6500 К. Яркость солнечного диска уменьшается от центра к краям, одновременно меняется и спектральный состав излучения. Средняя яркость в видимом диапазоне $2 \cdot 10^9$ Кд/м². В приземных слоях максимальная освещенность составляет около 10^6 Лк. Угловой размер солнечного диска при наблюдении с Земли равен приблизительно 32'.

Земля. При наблюдении Земли из космоса можно рассматривать две составляющие излучения: отраженный поток и собственное излучение. Значения коэффициента отражения (альбедо) могут составить 0,1—0,8. Такой разброс альбедо объясняется различными метеоусловиями на отдельных участках земной поверхности и различными условиями их освещения Солнцем. По мере удаления от Земли ее альбедо становится все более интегральным, т. е. усредненным для всего диска нашей планеты, и принимает значение 0,39. Цветовую температуру излучения Земли, освещенной Солнцем, принимают равной 7725 К. Собственное излучение Земли сравнимо по значению с отраженным солнечным излучением на длинах волн больше 3—4 мкм. На длине волны 5 мкм эти две составляющие становятся равными. Спектр собственного излучения Земли в окнах прозрачности атмосферы зависит от температуры и типа излучающей поверхности. Принимают, что это излучение

соответствует излучению черного тела с температурой 300 К. Излучение атмосферы в тех спектральных областях, где она поглощает излучение, аппроксимируется кривой излучения черного тела при 200 К. Интегральная плотность излучения системы Земля — атмосфера в космос равна примерно $2 \cdot 10^2$ Вт/м².

Луна. Средний угловой размер Луны равен 33'. Освещенность, создаваемая Луной на земной поверхности в зависимости от ее положения, сезона наблюдения и других факторов, сильно меняется. Форма Луны характеризуется фазовым углом. С изменением фазы Луны создаваемая ею освещенность земной поверхности изменяется от $4,1 \cdot 10^2$ Лк (через 7 дней до и после полнолуния, при фазовом угле 85) до $37,7 \cdot 10^2$ Лк (в полнолуние, при нулевом фазовом угле). На верхней границе земной атмосферы полная Луна создает освещенность $\approx 0,5$ Лк. Эффективная температура отраженного Луной солнечного света равна 5900 К, а коэффициент отражения от лунной поверхности равен в среднем 0,07 и меняется по ее поверхности от 0,054. Температура поверхности Луны изменяется от 400 К на освещенной стороне до 120 К на неосвещенной, т. е. максимумы собственного излучения Луны приходятся на длины волн 7 и 24 мкм.

Планеты. Основная доля собственного излучения планет приходится на ИК-область. Параметры отраженного солнечного излучения зависят от положения терминатора планеты, ее альбедо и характера атмосферы. Основная доля отраженного излучения планет приходится на видимую и ближнюю ИК-область — до 2 мкм. Положение максимума спектра излучения меняется для различных участков диска планеты в зависимости от изменения температуры этих участков. Так, при изменении температуры поверхности Марса от экватора к полюсу от 280 до 205 К максимум излучения смещается с 10 до 14 мкм. Соответственно изменяется энергетическая яркость поверхности планеты.

Звёзды и созвездия. При решении многих практических задач, связанных с ориентацией и навигацией, в качестве астрономических ориентиров используют звезды и созвездия. Из всех звезд невооруженным глазом видимы около 5000. К их числу относятся все звезды, у которых звездная величина $m < 6$. В устройствах автоматической пеленгации яркость звезд оценивают фотозлектрической звездной величиной, которая несколько отличается от визуальной величины из-за различия спектральных характеристик приемника излучения и глаза.

Цветовую характеристику звезд оценивают, распределяя их на несколько спектральных классов, каждый из которых по виду спектра излучения соответствует излучению черного тела с определенной температурой. Спектральные классы обозначены буквами латинского алфавита: класс *O* — самые горячие звезды голубого цвета, занимают УФ-область непрерывного спектра до класса *M*, к которому относятся звезды красного цвета. Каждый класс делится дополнительно на десять подклассов. Отклонения яркости звезды могут достигать 35 %, частота мерцаний доходит до 1000 Гц в зените и до 5–10 Гц при наблюдении около горизонта. Второе явление — *дрожания* — это видимые угловые колебания изображения звезды относительно среднего

положения, вызываемые завихрениями воздуха в нижних слоях атмосферы. Амплитуда угловых колебаний может достигать до 20–30", а частота — до 100 Гц.

Земная поверхность. Наземные образования (ландшафт) — весьма распространенный фон, на котором наблюдаются исследуемые объекты. Излучение ландшафта зависит от его излучательных и отражательных свойств. В непосредственной близости от Земли и на небольших высотах альbedo определяется характером поверхности, облачности и заметно изменяется по спектру. Температура большинства земных покровов — это функция температуры окружающего воздуха, а значения интегральных коэффициентов излучения земных покровов лежат в пределах 0,85—0,97. На практике характер собственного излучения земных покровов считают диффузным и принимают, что земная поверхность излучает как серое тело с коэффициентом излучения 0,35 в видимой области и 0,9 в ИК-области. Для длин волн больше 4 мкм излучение многих естественных покровов (почвы, растительности) принимают равным излучению черного тела при той же температуре. Отраженное излучение земного покрова определяется излучением Солнца в диапазоне длин волн, меньших 3–4 мкм, отраженное излучение превышает собственное. Альbedo большинства земных покрытий 0,15–0,20 и лишь в диапазоне 0,7–1,0 мкм достигает до 0,7–0,8.

Небо и облака. Излучение неба складывается из свечения атмосферных и внеатмосферных источников. Для участка спектра с длинами волн менее 4 мкм основным источником свечения дневного неба является рассеянное солнечное излучение. Если предположить, что излучение Солнца равномерно рассеивается по направлению к Земле, т. е. небо имеет одинаковую яркость, то иногда принимают, что эта яркость приблизительно равна $3 \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1})$. Цветовая температура дневного неба оценивается $(12\text{--}18) \cdot 10^3 \text{ К}$ и в очень большой степени зависит от положения Солнца на небе и высоты места наблюдения над уровнем моря. Рассеянный свет ясного неба создает на земной поверхности освещенность, составляющую 20–30 % от освещенности прямой солнечной засветки. Ночью, когда рассеянного солнечного света нет, излучение неба определяется собственным излучением паров и газов, составляющих атмосферу. Максимум излучения при наблюдении с Земли находится в области около 10,5 мкм, а спектр его аналогичен спектру излучения черного тела при температуре атмосферы (для участков неба, близких к горизонту). При переходе к зениту яркость неба уменьшается более чем вдвое. Энергетическая яркость неба в видимой части спектра оценивается в среднем как $(5,54\text{--}8,5) \cdot 10^7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср}^{-1})$ (в световых величинах $10^{-4} \text{ кд}/\text{м}^2$). Для верхних слоев атмосферы значительный вклад в излучение ночного неба вносит излучение гидроксильных групп ОН. Это излучение имеет полосовой спектр. Так, в полосе 2,8–3,4 мкм его монохроматическая энергетическая яркость составляет $7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1})$. Помимо излучения атмосферы свечение ночного неба обусловлено и рассеянным светом звезд, зодиакальным светом, галактическим свечением, которые в сумме равны иногда такому же свечению, как и от атмосферы. В ясную ночь звезды создают на Земле освещенность около $2 \cdot 10^{-4}$

Лк. Следует отметить, что распределение яркости по ночному небу весьма неоднородно. Излучение облачного неба состоит из отраженного и рассеянного солнечного и собственного теплового излучения. Первое преобладает в области длин волн до 3 мкм. Альbedo облаков при их наблюдении с высот свыше 30 км в диапазоне 0,3–2,3 мкм в среднем равен 0,007, но максимальные его значения могут достигать 0,45–0,78. Собственное излучение достаточно мощных облаков можно рассчитать как излучение черного тела с температурой примерно 200–220 К. Следует иметь в виду, что как отраженное, так и собственное излучение облаков, селективно ослабляется слоем атмосферы, расположенной между облаком и ОЭП. Редко встречающиеся серебристые облака могут иметь достаточно большую яркость, достигающую порой 1–3 кд/м² (при наблюдении с Земли).

Полярные сияния. Наиболее мощные полярные сияния возникают на высотах около 100 км над земной поверхностью и наблюдаются в основном в приполярных областях. Они не отличаются стабильностью своих пространственных, спектральных и временных характеристик. Яркость полярных сияний может достигать 0,2 кд/м². Спектр у них линейчатый и лишь на участке 0,65–0,95 мкм сплошной, с резко выделяющейся линией на 0,92 мкм, имеющей яркость около $6 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м²·ср⁻¹). Излучение в УФ-области и видимой имеет яркость от $3 \cdot 10^{-7}$ до $1,1 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м²·ср⁻¹). В ИК-диапазоне излучение полос полярного сияния меньше излучения ночного неба или практически равно ему. Одной из характеристик фонов является пространственный спектр их излучения. Излучение фоновых образований отличается, как правило, существенной неоднородностью по пространственным координатам (то же можно сказать и об угловых координатах). Излучающая поверхность располагается относительно точки наблюдения на расстоянии практической бесконечности, а размеры поверхности также велики. В ряде случаев ее угловой размер равен 2π ср (полусфера), поэтому она занимает все поле зрения ОЭП. Характеристикой неравномерности углового распределения излучения фоновой поверхности является пространственно-частотный спектр мощности.

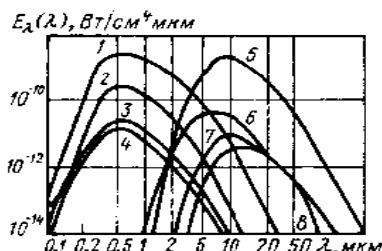


Рис. 1.29. Расчетные значения спектральной энергетической освещенности, создаваемой Лунной и планетными в верхних слоях атмосферы:
собственное излучение: 1 — полной Луны; 2 — Венеры; 3 — Марса; 4 — Сатурна; отраженное солнечное излучение: 5 — Луны; 6 — Юпитера; 7 — Венеры (при наибольшем удалении); 8 — Марса (при противостоянии)

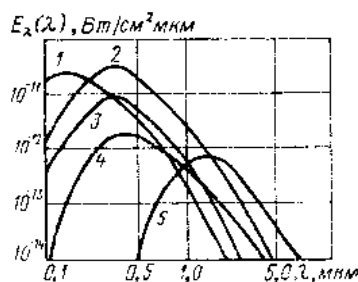


Рис. 1.30. Расчетные значения спектральной энергетической освещенности, создаваемой наиболее яркими звездами в верхних слоях атмосферы:
1 — Кентавр; 2 — Сириус; 3 — Вега; 4 — Альтаир; 5 — Альдебаран

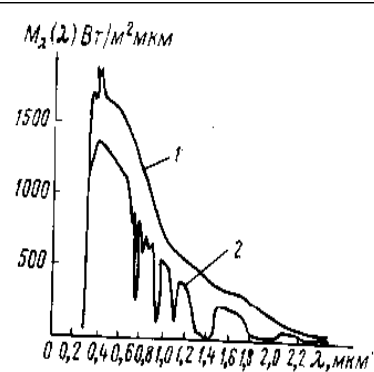


Рис. 1.28. Спектры излучения Солнца:
1 — за пределами атмосферы; 2 — на уровне моря

Рисунок 4. 1. Спектральные характеристики освещенности

Прохождение излучения через атмосферу. Рассеяние, поглощение.

Раздел физики атмосферы, посвящён изучению рассеяния, поглощения, преломления, отражения света в атмосферах Земли и планет. Оптика атмосферы.- одна из древнейших наук, занимающая видное место в процессе познания природы; с ней связано открытие явления рассеяния излучения доказательство молекулярного строения атмосферы и справедливости кинетической теории газов, определение числа Авогадро и др. эти исследования имеют первостепенное значение для целого ряда отраслей науки и техники, в т. ч. для метеорологии, транспорта, агротехники, светотехники, курортологии, астрофизики и т. д.

В настоящее время все оптические явления представляют не только гуманитарный интерес , но и требуют серьёзного научного внимания а также возможности количественной оценки различных параметров

Источники типа А, В, С, D. Нормирование излучения

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЦВЕТА

Типы. Технические требования. Маркировка

IUuminants for colour measurements.

Types. Technical requirements. Marking

**ГОСТ
7721-89**

**Срок действия с 01.07.90
до 01.07.2000**

Несоблюдение стандарта преследуется по закону

Настоящий стандарт распространяется на источники света для освещения образцов материалов при измерениях их цвета.

1. ТИПЫ

Настоящий стандарт устанавливает следующие типы стандартных источников света:

а) А - газополная электрическая лампа накаливания с коррелированной цветовой температурой излучения $T = 2856$ К (приложение1).

Воспроизводит условия искусственного освещения электрическими лампами накаливания;

б) В - источник света А в комбинации с точно определенным жидкостным или стеклянным светофильтром, предназначенным для создания излучения с коррелированной цветовой температурой $T = 4874$ К

Воспроизводит условия прямого солнечного освещения;

в) С - источник света А в комбинации с точно определенным жидкостным или стеклянным светофильтром, предназначенным для создания излучения с коррелированной цветовой температурой $T = 6774$ К .Воспроизводит условия

освещения рассеянным дневным светом;

г) D_{65} - должен воспроизводить излучение с коррелированной цветовой температурой $T = 6504 \text{ К}$. Воспроизводит условия освещения усредненным дневным светом*. Используется для измерения цвета люминесцирующих образцов.

*В настоящее время нет рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО) для воспроизведения стандартного источника D_{65} -

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1. Источники света А, В, С, и D_{65} должны быть аттестованы по координатам цветности x , y , определенным в системе цветовых координат X, Y, Z , установленной МКО в 1931 г., и должны соответствовать значениям, указанным в табл. 1. При этом допускается отклонение координат цветности от номинального значения в пределах $\pm 0,02$.

Таблица 1

Источники света	Координаты цветности	
	x	y
А	0,448	0,407
В	0,348	0,352
С	0,310	0,316
D_{65}	0,313	0,329

2.2. При создании источников света типов В и С допускаемое отклонение координат цветности источника света А от значений, указанных в табл. 1, в пределах $\pm 0,003$.

2.3. Напряжение и ток источников света А, В и С следует контролировать приборами класса не ниже 0,2 по ГОСТ 8711.

2.4. Технические требования к светофильтрам

2.4.1. Жидкостный светофильтр должен быть составлен из двух растворов, которые заполняют каждый свое отделение двойной кюветы из бесцветного химически стойкого оптического стекла. Толщина слоя каждой жидкости должна быть $(10 \pm 0,05) \text{ мм}$. Растворы жидкостных светофильтров должны иметь состав, приведенный в табл. 2.

Таблица 2

Раствор	Состав раствора	Норма для источника света	
		В	С
1	Сульфат меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, г	2,452	3,412
	Маннит $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$, г	2,452	3,412
	Пиридин $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$, см^3	30,0	30,0
	Дистиллированная вода, см^3	1000,0	1000,0
2	Кобальт-аммоний сульфат $\text{CoSO}_4(\text{NH}_4)_2 \cdot \text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г	21,71	30,58

Раствор	Состав раствора	Норма для источника света	
		В	С
	Сульфат меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, г	16,11	22,52
	Серная кислота (плотность 1,835 г/см ³)	10,0	10,0
	Дистиллированная вода, см ³ г	1000,0	1000,0

2.4.2. Растворы следует готовить заново через 2 мес из химически чистых реактивов.

2.4.3. Стекланные светофильтры могут быть трех категорий:

I категории - должны изготавливаться из четырех склеенных плоскопараллельных пластинок цветного стекла марок ПС5, ПС14, СЗС17 и ЖС4 по ГОСТ 9411-81;

II и III категорий - должны изготавливаться из трех склеенных плоскопараллельных пластинок цветного стекла марок ПС5, ПС14 и СЗС17 по ГОСТ 9411-81.

Способ определения толщины компонентов, при которых составной светофильтр в сочетании с источником света А воспроизводит источники света В и С, приведен в приложении 2*.

* Допускаются другие способы определения, обеспечивающие выполнение требований настоящего стандарта.

2.4.4. Предельные отклонения координат цветности источников Δx , Δy , рассчитанные для конкретного светофильтра, от значений, указанных в табл. 1, коэффициенты пропускания светофильтра τ_{ϕ} и их предельные отклонения $\Delta \tau_{\phi}$ приведены в табл. 3. Совокупность указанных параметров определяет категорию светофильтра.

Таблица 3

Источники света	Категория фильтра	Предельные отклонения Δx , Δy	τ_{ϕ} , % не менее	$\Delta \tau_{\phi}$, % не менее
В	I	$\pm 0,005$ при условии, что $-0,001 \leq \Delta x^B - \Delta y^B \leq 0,002$	13,5	-2,0
	II	$\pm 0,008$	18,0	-3,0
	III	$\pm 0,012$	23,0	-3,0
С	I	$\pm 0,005$ при условии, что $\pm 0,001 \leq \Delta x^C - \Delta y^C \leq 0,002$	7,5	-1,0
	II	$\pm 0,010$	9,0	-1,5
	III	$\pm 0,015$	12,0	-2,0

3. МАРКИРОВКА

3.1. Маркировка ламп накаливания, применяемых в источниках света типов А, В, С, D₆₅, должна содержать порядковый номер по системе предприятия-изготовителя.

3.2. Стекланные светофильтры должны маркироваться порядковым номером и обозначением типа источника (В или С).

3.3. Каждый источник света должен быть снабжен свидетельством о метрологической аттестации согласно [ГОСТ 8.326](#), удостоверяющим его качество и соответствие требованиям настоящего стандарта.

Свидетельство должно содержать:

- тип и номер лампы накаливания;
- значения напряжения и тока питания лампы;
- погрешность воспроизведения координат цветности;
- обозначение настоящего стандарта;
- дату поверки источника;
- наименование предприятия-изготовителя, его местонахождение (город) или условный адрес.

3.4. Каждый светофильтр должен сопровождаться документом, удостоверяющим его качество и соответствие требованиям настоящего стандарта.

Документ должен содержать:

- тип и номер светофильтра;
- координаты цветности светофильтра x , y и координату цвета Y ;
- погрешность измерения по координатам цветности x , y и по координате цвета Y для источника света типа А;
- дату выпуска светофильтра.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Обязательное
ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ Φ_λ СТАНДАРТНЫХ ИСТОЧНИКОВ
СВЕТА ТИПОВ А, В, С и D₆₅

Таблица 4

Длина волны λ , нм	Φ_λ^A	Φ_λ^B	Φ_λ^C	$\Phi_\lambda^{D_{65}}$
300	0,93	0,00	0,00	0,03
305	1,13	0,00	0,00	1,7
310	1,36	0,00	0,00	3,3
315	1,62	0,00	0,00	11,8
320	1,93	0,02	0,01	20,2
325	2,27	0,26	0,20	28,6
330	2,66	0,50	0,40	37,1
335	3,10	1,45	1,55	38,5
340	3,59	2,40	2,70	39,9
345	4,14	4,00	4,85	42,4
350	4,74	5,60	7,00	44,9
355	5,14	7,60	9,95	45,8
360	6,15	9,60	12,90	46,6
365	6,95	12,40	17,20	49,4
370	7,82	15,20	21,40	52,1
375	8,77	18,80	27,50	51,0
380	9,79	22,40	33,00	50,0
385	10,90	26,85	39,92	52,3
390	12,09	31,30	47,40	54,6
395	13,36	36,18	55,17	68,7
400	14,71	41,30	63,30	82,8
405	16,15	46,62	71,81	87,2
410	17,68	52,10	80,60	91,5
415	19,29	57,70	89,53	92,4
420	21,00	63,20	98,10	93,4
425	22,79	68,37	105,80	90,0
430	24,67	73,10	112,40	86,7
435	26,64	77,31	117,75	95,8
440	28,70	80,80	121,50	104,9
445	30,85	83,44	123,45	111,0
450	33,09	85,40	124,00	117,0
455	35,41	86,88	123,60	117,4
460	37,82	88,30	123,10	117,8
465	40,30	90,08	123,30	116,4
470	42,87	92,00	123,80	114,9
475	45,52	93,75	124,09	115,4
480	48,25	95,20	123,90	115,9
485	51,04	96,23	122,92	112,4
490	53,91	96,50	120,70	108,8
495	56,85	95,71	116,90	109,1
500	59,86	94,20	112,10	109,4

Продолжение табл. 4

Длина волны λ , нм	Φ_{λ}^A	Φ_{λ}^B	Φ_{λ}^C	$\Phi_{\lambda}^{L_{ks}^*}$
505	62,93	92,37	106,98	108,6
510	66,06	90,70	102,30	107,8
515	69,25	89,65	98,81	106,3
520	72,50	89,50	96,90	104,8
525	75,79	90,43	96,78	106,3
530	79,13	92,20	98,00	107,7
535	82,52	94,46	99,94	106,0
540	85,95	96,90	102,10	104,4
545	89,41	99,16	103,95	104,2
550	92,91	101,00	105,20	104,0
555	96,44	102,20	105,67	102,0
560	100,00	102,80	105,30	100,0
565	103,58	102,92	104,11	98,2
570	107,18	102,60	102,30	96,3
575	110,80	101,90	100,15	96,1
580	114,44	101,00	97,80	95,8
585	118,08	100,07	95,43	92,2
590	121,73	99,20	93,20	88,7
595	125,39	98,44	91,22	89,4
600	129,04	98,00	89,70	90,0
605	132,70	98,08	88,83	89,8
610	136,34	98,50	88,40	89,6
615	139,99	99,06	88,19	88,6
620	143,62	99,70	88,10	87,7
625	147,23	100,36	88,06	85,0
630	150,83	101,00	88,00	83,3
635	154,42	101,56	87,86	83,5
640	157,98	102,20	87,80	83,7
645	161,51	103,05	87,99	81,8
650	165,03	103,90	88,20	80,0
655	168,51	101,59	88,20	80,1
660	171,96	105,00	87,90	80,2
665	175,38	105,08	87,22	81,2
670	178,77	104,90	86,30	82,3
675	182,12	104,55	85,30	80,3
680	185,43	103,90	84,00	78,3
685	188,70	102,84	82,21	74,0
690	191,93	101,60	80,20	69,7
695	195,12	100,38	78,24	70,6
700	198,26	99,10	76,30	71,6
705	201,36	97,70	74,36	73,0
710	204,41	96,20	72,40	74,3
715	207,41	94,60	70,40	68,0
720	210,36	92,90	68,30	61,6
725	213,26	91,10	66,30	65,8
730	216,12	89,40	64,40	69,9
735	218,92	88,00	62,80	72,5
740	221,66	86,90	61,50	75,1
745	224,36	85,90	60,20	68,9
750	227,00	85,20	59,20	63,6
755	229,58	84,80	58,50	55,0

Продолжение табл. 4

Длина волны λ , нм	Φ_{λ}^A	Φ_{λ}^B	Φ_{λ}^C	$\Phi_{\lambda}^{D_{65}^*}$
760	232,11	84,70	58,10	46,4
765	231,59	84,90	58,00	56,6
770	237,01	85,40	58,20	66,8
775	239,36	86,10	58,50	65,1
780	241,67	87,00	59,10	63,4
785	243,91	-	-	63,8
790	246,11	-	-	64,3
795	248,24	-	-	61,9
800	250,32	-	-	59,5
805	252,33	-	-	55,8
810	254,30	-	-	52,0
815	256,20	-	-	54,7
820	258,06	-	-	57,4
825	259,90	-	-	58,8
830	261,59	-	-	60,3

*В настоящее время нет рекомендации МКО для воспроизведения стандартного источника D_{65} .

Тема 5. Приёмники оптического излучения.

Классификация, параметры и характеристики приемников оптического излучения.

Приёмниками оптического излучения (ПОИ) называются устройства, предназначенные для обнаружения или измерения излучения основанные на преобразовании энергии излучения в другие виды энергии (тепловую, механическую, электрическую и т. д.), удобные для регистрации и обработки. Разнообразие типов ПОИ определяется многочисленностью способов преобразования энергии и невозможностью создать приборы одинаково чувствительные во всём оптическом диапазоне.

По принципу действия ПОИ делятся на следующие группы:

тепловые, фотоэлектрические, пьезоэлектрические, фотохимические, а также глаза живых существ.

По спектральному диапазону чувствительности ПОИ разделяют на неселективные, чувствительность которых не зависит от длины волны падающего излучения в широком диапазоне, селективные, чувствительность которых ограничена определённым участком спектра и смешанными

Для сравнительной оценки свойств и возможностей ПОИ различных типов были разработаны параметры характеризующие их работу.

Пороговая чувствительность - минимальный поток излучения, вызывающий на выходе приёмника сигнал, равный напряжению собственных шумов или превышающий их в заданное число раз.

Шумами называются хаотические сигналы со случайными амплитудами и частотами, возникающими в цепи включения приёмника при отсутствии измеряемого потока излучения. Т. к. мощность шумов приёмника зависит от площади чувствительного элемента приёмника и существенна в полосе частот усилителя сигнала, то для сравнения различных приёмников служит пороговая величина потока излучения, отнесённая к единичной полосе пропускания (1 Гц), единичной площади (1 см^2) и измеряемая в $\text{Вт/Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$. На практике используют обратную величину, измеряемую в $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ и называемую обнаружительной способностью. Эта характеристика, будучи независимой от размера чувствительной площадки, удобна для сравнения различных типов приёмников.

Интегральная чувствительность (коэффициент преобразования) - отношение сигнала на выходе приёмника (тока или напряжения) к величине мощности оптического излучения сложного спектрального состава, вызвавшего

появление этого сигнала; измеряется в А/Вт, В/Вт. В ряде случаев интегральная чувствительность выражается как отношение сигнала приёмника к значению освещённости его входного окна; измеряется в А/лм, В/лм.

Постоянная времени - время, за которое сигнал на выходе приёмника нарастает от нуля до значения, равного 0,63 от стационарного значения. Этот параметр служит мерой способности ПОИ регистрировать оптические сигналы минимальной длительности, а также определяет максимально возможную частоту модуляции потока излучения, регистрация которого происходит ещё без искажения.

Спектральная чувствительность характеризует реакцию приёмника при действии на него монохроматического (с длиной волны λ) потока излучения. Область спектральной чувствительности охватывает такой диапазон длин волн около данной конкретной λ , в котором чувствительность ПОИ. составляет не менее 10% своего макс. значения. Относительная спектральная чувствительность - зависимость отношения монохроматической спектральной чувствительности к спектральной чувствительности в максимуме кривой спектральной чувствительности.

ПОИ обладают и частотной характеристикой - зависимостью чувствительности приёмника от частоты модуляции падающего на него излучения. Вид этой характеристики определяется постоянной времени и видом модуляции.

Тепловые приёмники оптического излучения

Мера реакции этого типа приёмника определяется интегральной энергией светового. Поглощённая энергия приводит к нагреванию чувствительного элемента и повышению его температуры, которая может быть измерена непосредственно. Современные тепловые приёмники позволяют обнаруживать повышение температуры термочувствительного элемента при его облучении на $10^{-6}—10^{-7}$ К и измерять мощности Вт. $\sim 10^{-11}$

Пироэлектрические приёмники основаны на способности сегнетоэлектрических материалов создавать электрические заряды на своей поверхности вызванных нагревом. Приёмники этого типа представляют собой тонкую пластинку, вырезанную определённым образом из пироэлектрического кристалла, на которую нанесены металлические электроды и слой поглощающей черни. Излучение, падающее на чернь, вызывает нагрев кристаллической пластинки и появление зарядов на электродах. Пороговая чувствительность пироэлектрических приёмников не зависит от размеров площадки чувствительного элемента (изменяется от 0,25 до 400 см²). Пироэлектрическим эффектом обладают кристаллы ниобата лития, керамики типа титоната бария или свинца и др. Параметры пироэлектрических

приёмников изменяются в широких пределах: постоянная времени $2 \cdot 10^{-8}$ - $2 \cdot 10^{-2}$ с, порог чувствительности $1 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{-7}$ Вт/Гц^{1/2}, коэф. преобразования 5- 10^4 В/Вт. В длинноволновой области спектра этот приёмник является единственным, работающим при ВЧ-модуляции без охлаждения. Спектральная область работы определяется областью поглощательной способности черни.

Болометры - приёмники, действие которых основано на изменении физических параметров чувствительного элемента при его нагревании вследствие поглощения потока излучения.

Для уменьшения влияния тепловых помех современные болометры делают компенсационного типа, когда в два плеча мостовой схемы включены одинаковые термочувствительные элементы. Излучение направляется на один элемент, а другой служит для компенсации изменения температуры окружающей среды и радиационных помех. Для уменьшения порога чувствительности площадь полоски делается небольшой, а для уменьшения постоянной времени - очень тонкой. Типичные размеры болометра: площадь $0,3 \text{ мм}^2$, толщина 0,1-0,01 мкм. Порог чувствительности металлических болометров, работающих без охлаждения, при собственном сопротивлении 5-50 Ом составляет 10^{-10} — 10^{-9} Вт/Гц^{1/2} при коэффициенте преобразования 5-25 В/Вт и постоянной времени $2 \cdot 10^{-1}$ с. Типичные параметры полупроводниковых болометров, работающих как без охлаждения, так и с глубоким охлаждением: собственное сопротивление 2-10 МОм, коэф. преобразования 50-5000 В/Вт, пороговый поток 10^{-11} - 10^{-10} Вт/Гц^{1/2}, постоянная времени (1-5)· 10^{-3} с. Для сверхпроводящих болометров из нитрида ниобия, Pt и Ge порог чувствительности составляет 10^{-12} - 10^{-10} Вт/Гц^{1/2}, постоянная времени 10^{-4} — 10^{-3} с.

Оптико-акустические приёмники.

К ним относятся приёмники, у которых повышение температуры, вызванное поглощением излучения, непосредственно преобразуется в механическую работу регистрирующего устройства. Оптико-акустический приёмник представляет собой небольшую герметичную камеру, наполненную газом (гелием; двуокисью углерода), в которой расположена зачернённая пластинка. Одной из сторон камеры служит окно, прозрачное для излучения, а другой - гибкая мембрана. Излучение, падающее на зачернённую пластинку, нагревает её, что приводит к повышению температуры и давления газа в камере. Изменение кривизны мембраны преобразуется в электрический сигнал, который может быть измерен. Оптико-акустические приёмники без зачернённой пластинки основаны на поглощении оптического излучения непосредственно газом, заполняющим камеру. Пульсации давления газа улавливаются микрофоном, сигнал с которого усиливается и измеряется. В

этом случае оптико-акустический приёмник является селективным, т. к. он обладает чувствительностью только в определённых областях спектра (в полосах поглощения газа). Постоянная времени оптико-акустических приёмников $(2-3) \cdot 10^{-2}$ с, порог чувствительности $1 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}, коэффициент преобразования $4 \cdot 10^4$ В/Вт.

Фотоэлектронные приёмники оптического излучения непосредственно преобразуют электромагнитную энергию излучения в электрическую. Их разделяют на ПОИ с внешним и внутренним фотоэффектом. Фотоэлемент - электровакуумный прибор, преобразующий оптическое излучение в электрический сигнал; основан на явлении эмиссии электронов с поверхности твёрдого тела при поглощении фотонов. "Красная граница" чувствительности таких приёмников определяется работой выхода электронов с поверхности твёрдого тела. Для большинства металлов она лежит в видимой и ближней УФ-областях; для полупроводников - в видимой и ближней ИК-областях, а для диэлектриков - в области вакуумного ультрафиолета. Простейший фотоэлемент с внешним фотоэффектом представляет собой вакуумированный стеклянный баллон, на часть внутренней поверхности которого нанесён фоточувствительный слой (фотокатод). В центре баллона находится анод в виде сетки или кольца; между анодом и катодом приложена разность потенциалов, создающая ускоряющее электрическое поле. Средняя величина темнового тока зависит от типа фотокатода и разности потенциалов между анодом и катодом. При комнатной температуре плотность темнового тока у мультищелочного фотокатода составляет $10^{-15} - 10^{-16}$ А/см², у фотокатода типа Ag - О - Cs - $10^{-11} - 10^{-13}$ А/см². Охлаждение фотокатода до температуры жидкого азота (77К) приводит к снижению темнового тока на три-четыре порядка, но и к одновременному уменьшению порога чувствительности. Постоянная времени вакуумных фотоэлементов составляет 10^{-8} с.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) - электровакуумный прибор, преобразующий оптическое излучение в электрический сигнал с последующим его усилением за счёт вторичной эмиссии, суть которой состоит в испускании электронов поверхностью твёрдого тела при её бомбардировке электронами большой энергии. Т. к. число вторичных электронов превышает число первичных, то, многократно повторяя такой процесс, можно получить значительное усиление первичного электронного тока. Спектральная чувствительность ФЭУ определяется типом фотокатода и полосой пропускания материала входного окна. Постоянная времени ФЭУ составляет $10^{-9} - 10^{-8}$ с. Порог чувствительности ФЭУ, как и у фотоэлементов, определяется флуктуациями темнового тока, а также флуктуациями тока вторичной эмиссии динодов и составляет $10^{-15} - 10^{-13}$ Вт/Гц^{1/2}. Для снижения величины темнового тока и порога чувствительности применяют охлаждение

Фоторезисторы (фотосопротивления) - простейшие полупроводниковые структуры с одним типом проводимости, у которых под действием падающего

оптического излучения происходит изменение проводимости вследствие образования в них носителей заряда (электронов и дырок). Этот эффект наблюдается в полупроводниках при энергии падающего фотона, недостаточной для возникновения внешнего фотоэффекта, но достаточной для перехода носителя из валентной зоны в зону проводимости. Фотоны с такой энергией вызывают внутренний фотоэффект, увеличивая в зоне проводимости и в валентной зоне число носителей заряда. Величина запрещённой зоны определяет "красную границу" чувствительности фоторезисторов. Фоторезистор представляет собой тонкую пластинку или плёнку из полупроводника, нанесённую на подложку из диэлектрика и помещённую в корпус с защитным окном; через контакты, к чувствительному слою подводится питающее напряжение. Охлаждаемые фоторезисторы обычно монтируют на внутреннем дне сосуда Дьюара. Схемы включения фоторезисторов аналогичны схемам включения болометров. Наиболее широкое применение получили фоторезисторы на основе сульфида цинка (рабочая область спектра 0,3-0,9 мкм), селенида кадмия (0,35-1,1 мкм), сульфида свинца (0,4-3,6 мкм), селенида свинца (0,54-4,0 мкм), антимонида индия (2,2-9,0 мкм), германия, легированного золотом и ртутью (1,8-9,0 мкм). Постоянная времени фоторезисторов определяется временем установления стационарного состояния неравновесных носителей заряда, возникающих при освещении, зависит от природы полупроводника и варьируется для различных фоторезисторов от 10^{-2} до 10^{-8} с. Пороговая чувствительность фоторезисторов составляет $10^{-10} - 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2}.

Приёмники излучения с *p-n*-переходом могут работать в фотогальваническом или фотодиодном режимах. В первом случае приёмник при облучении генерирует эдс без внешнего источника питания, во втором - к приёмнику подводится внешнее напряжение, и ток, проходящий через нагрузочное сопротивление, изменяется в зависимости от освещённости *p-n*-перехода. Особую группу составляют фотогальванические приёмники с ионным легированием, например HgCdTe. Обнаружительная способность приёмников на основе ионолегированных переходов равна $7 \cdot 10^{-10}$ Гц^{1/2}/Вт, при длине волны 10,6 мкм и температуре 77 К. Фотогальванические приёмники на основе сплава PbSnTe в спектральной области 8-12 мкм обладают обнаружит. способностью $2 \cdot 10^{-10}$ Гц^{1/2}/Вт и постоянной времени $1,5 \cdot 10^{-8}$ с.

Особую группу фотогальванических приёмников составляют приёмники с продольным (или латеральным) фотоэффектом. Суть эффекта состоит в том, что при неравномерном освещении *p-n*-перехода наряду с поперечной эдс между *p*- и *n*-областями образуется эдс, направленная вдоль перехода. Продольный фотоэффект на *p-n*-переходе используют в координатно-чувствительных приёмниках, предназначенных для определения координат точки, в которую сфокусировано излучение.

Вторым типом приёмника с *p-n*-переходом являются фотодиоды. Они отличаются от фотогальванических приёмников тем, что на них подаётся внешнее запирающее напряжение. В таких приёмниках при освещении приконтактной области образующиеся носители заряда уменьшают сопротивление переходного слоя, вызывая увеличение тока в цепи. Преимуществом германиевых и кремниевых фотодиодов является то, что они не требуют охлаждения.

Другие типы приёмников оптического излучения.

Для регистрации сверхкоротких импульсов лазерного излучения ИК-диапазона разработаны ПОИ принцип действия которых основан на увлечении электронов фотонами. При взаимодействии излучения с веществом (внутризонное поглощение на свободных носителях, переходы между подзонами в валентной зоне) вдоль направления распространения излучения возникает движение носителей заряда вследствие наличия у электромагнитной волны конечного импульса. Это движение носителей регистрируется в виде тока или напряжения. ПОИ такого типа имеют постоянную времени $10^{-11}—10^{-10}$ с, и не требуют принудительного охлаждения и использования источников питания.

Ещё большее временное разрешение до $10^{-14}—10^{-13}$ с может быть получено при использовании приёмников с микроантенной на основе структур металл - окисел - металл, работающих как туннельный диод. Недостатком приёмников этого типа является их малая чувствительность.

К ПОИ могут быть отнесены и глаза живых существ. Область спектра, к которой чувствителен глаз человека (0,4-0,7 мкм), называется видимой областью. Диаметр зрачка глаза в зависимости от условий освещённости изменяется от 1,5 до 8,0 мм; освещённость сетчатки глаза при этом изменяется примерно в 30 раз. Адаптированный к темноте глаз человека имеет пороговую чувствительность 10^{-17} Вт/Гц^{1/2}, что соответствует десяткам фотонов в 1 с. Свойство глаза видеть раздельно две близко расположенные точки предмета называется разрешающей способностью; она характеризуется угловым пределом разрешения. Глаза других живых существ отличаются большим разнообразием, например, глаза некоторых насекомых реагируют на поляризованный свет.

Для получения двумерного изображения излучающего объекта служат многоэлементные приёмники с дискретно или непрерывно распределёнными по поверхности приёмными элементами. К ним относятся фотопластинки, фотоплёнки, электронно-оптические преобразователи, многоплощадочные полупроводниковые болометры и фоторезисторы, ПОИ применяются в спектроскопии, квантовой электронике, астрономии, космических исследованиях, автоматических системах управления и т. д.

Тема 6. Особенности формирование оптико-электронных измерительных систем.

С целью обеспечения высокой точности измерений необходимо разрабатывать и использовать оптико-электронные системы основанные на современных технических достижениях. Проблема реализации этой деятельности заключена в сложности автоматизации процесса контроля. В условиях серийного производства на первый план метрологического обеспечения измерений и контроля выходит проблема создания измерительных систем для контроля статистических характеристик структуры объекта. По своему принципу действия такие устройства являются фотоэлектрическими измерительными приборами и могут быть построены на базе сканирующих фотометрических микроскопов, лазерных дифрактометров, интерферометров, пирометров и т.д. Практическое применение этих систем должно обеспечивать:

- сокращение времени измерения параметров, а также времени на их статистическую обработку;
- устранение влияния уровня подготовки метрологов на надежность процесса измерений и контроля;
- повышение достоверности измерения размеров путем их измерения в нескольких сечениях;
- снижение влияния субъективных причин за счёт оператора-метролога и т.д.

Например, для достижения высокой точности измерений перемещение контролируемого изделия в поле зрения оптической системы осуществляется гидравлическими приводами. Точность измерений прибора не зависит от скорости перемещения спирали. Однако вибрации контролируемого изделия, а также деталей всего прибора недопустимо и устраняется применением системы сложных гидравлических приборов. Кроме того, необходима также высокая точность фокусировки оптической системы, нарушение которой приводит к размытию изображения. Как правило в системе существует ряд деталей которые перемещаются друг относительно друга, поэтому необходима механическая стабилизация системы, что усложняет конструкцию прибора и повышает соответственно его стоимость. В последующие годы конструкция аппарата была модернизирована и улучшены его метрологические характеристики. Указанные недостатки частично устранены в фотоэлектрических измерительных микроскопах, которые также могут быть использованы для контроля геометрических размеров элементов.

В основу работы микроскопа положено формирование оптической системой увеличенного изображения измеряемого объекта. В плоскости изображения расположен фотоприемник, выходной сигнал которого поступает на электро-измерительную аппаратуру. К недостаткам этого прибора следует отнести отсутствие коррекции дрейфа “нуля”, малый предел фото-электрических измерений (до 10 мкм), ручное управление процессом измерений и окулярный

отсчет показаний прибора, что ограничивает его использование в промышленных условиях для геометрического контроля изделий.

Предположения о возможности использования явления дифракции световых волн для контроля размеров малых объектов были впервые высказаны Роулэндом в 1888 году [13, 14, 15]. Позже он использовал это для качественного контроля изготовления периодической структуры дифракционных решеток. Сущность метода заключалась в том, что, если дифракционную решетку осветить монохроматической световой волной, то на некотором расстоянии от нее формируются эквидистантно расположенные дифракционные максимумы светового потока. При наличии дефектов решетки, вокруг этих основных максимумов возникают и добавочные максимумы, которые получили название “духов”. Однако теоретическое обоснование этого явления в то время так и не было сформулировано, что и не позволило определить аналитические зависимости, описывающие функциональную взаимосвязь распределения светового потока в “духах” с дефектами решетки.

Г. Харисон в 1949 году предложил способ контроля дифракционных решеток с помощью интерферометра Майкельсона и положил, таким образом, начало разработке схемы интерферометра с дифракционной решеткой для контроля качества самих решеток. Дифракционные методы контроля качества изготовления периодических структур являются наиболее перспективными. Они положены в основу многочисленных лазерных дифракционных измерителей линейных размеров малых объектов. Для контроля диаметра тонких отверстий предложено освещать контролируемые отверстия монохроматической световой волной и измерять амплитуду четных и нечетных максимумов дифракционной картины отверстия. Для расширения диапазона диаметра измеряемых отверстий, необходимо изменять длину волны излучения до тех пор, пока амплитуда интерференционного сигнала нечетных гармоник достигнет удвоенного значения амплитуды световой волны в свободном пространстве. Недостатком метода является необходимость применения лазера с перестраиваемой длиной волны генерации. Известны также устройства для допускового контроля геометрических размеров изделий путем соответствующей обработки их дифракционного изображения сложной фотоэлектрической измерительной системой, либо оптической системой пространственной фильтрации. Однако эти устройства являются узко специализированными и требуют предварительного синтеза сложных голографических пространственных фильтров, что позволяет их использовать лишь для качественного допускового контроля изделий. Таким образом лазерные дифрактометры являются наиболее перспективным научным направлением развития автоматизированного метрологического оборудования. Оно может быть также успешно использовано и для разработки средств автоматизации контроля статистических характеристик квазипериодической структуры. Это, в свою очередь, может быть выполнено лишь с созданием специализированных оптических систем обработки изображений (ОСОИ) на базе когерентных оптических спектро-анализаторов (КОС) пространственных

сигналов, положенных в основу практически всех известных лазерных дифрактометров.

Построение голографических и дифракционных оптических систем для метрологии основано на получении изображений Френеля, либо Фурье исследуемого объекта с последующим анализом их параметров фотоэлектрической измерительной системой. Основным преимуществом таких метрологических систем, перед визуальными оптическими измерительными приборами, является высокая производительность, что позволяет автоматизировать ряд метрологических процессов в промышленности. Где требуется интегральная комплексная оценка качества изделия. Для формирования изображений Фурье или Френеля исследуемого объекта используют когерентный оптический спектроанализатор пространственных сигналов, схему построения и геометрические параметры которого выбирают в зависимости от характера решаемой задачи.

Поле в задней фокальной плоскости является пространственным амплитудно-фазовым спектром сигнала, помещенного в его передней фокальной плоскости. Описанная выше оптическая система выполняет спектральное разложение пространственного сигнала и является когерентным оптическим спектроанализатором. Он позволяет анализировать одновременно амплитудный и фазовый спектры как одномерных, так и двумерных пространственных сигналов.

Для описания спектральных и корреляционных функций случайных сигналов часто используются характеристические функции. Как в оптических, так и в электронных устройствах спектрального анализа сигналов, существует возможность получения как амплитудного, так и энергетического их спектров. Однако в теории спектрального анализа пространственных сигналов известно, что при использовании фотодетекторов для регистрации параметров дифракционного изображения, формируемого оптической системой КОС, автоматически на ее выходе формируется энергетический спектр исследуемого сигнала. Параметры такого спектра могут быть измерены соответствующими контрольно-измерительными приборами, а форма его определена с применением методов статистической радиооптики путем интегрального преобразования Винера-Хинчина, либо на основе теоремы Хилли. Поэтому используя аналогию математических методов исследования спектральных характеристик пространственных и временных сигналов, распределение комплексных амплитуд спектра пропускания в дифракционном изображении пространственной квазипериодической структуры, можно определить. Принципиальный состав такой измерительной системы:

Источник излучения газовый He-Ne лазер ЛГН-207А: • Диаметр пучка на расстоянии 40 мм от переднего зеркала резонатора 0.52 мм. • Длина волны излучения 0.6328 мкм. • Расходимость излучения 1.85 мрад. • Мощность 2 мВт. Характеристики оптических элементов: • Длина линии задержки 15 мм. • Высота линии задержки 4 мм. • Диаметр фурье-объектива 24 мм. • Фокусное

расстояние фурие-объектива 104.98 мм. Характеристики приемника излучения:

- ПЗС-матрица, • количество элементов 512x340. • Размер чувствительной площадки одного элемента 20x20 мкм. • Спектральная чувствительность 0.4 В/Вт. • Пороговый поток 10-12 Вт. 5.

Поскольку в результате статистических исследований было установлено, что целесообразно рассматривать функциональную зависимость амплитуд максимумов спектра от размеров объекта. Линейная зависимость амплитуд максимумов спектра от освещенности пространственной квазипериодической структуры ЛЗ приведет к значительным погрешностям амплитудного метода. Эти погрешности возникают из-за нестабильности выходной мощности излучения лазера при температурных дрейфах его резонатора, которая достигает 20-30%. Поэтому, используя относительные измерения путем определения величины отношения амплитуд 0-го и i -го максимумов спектра, можно избавиться от влияния временных флуктуаций выходной мощности излучения лазера.

Данная измерительная система предназначена для определения и измерения параметров энергетического спектра пространственных сигналов. Конструктивно она представляет собой когерентный оптический спектроанализатор пространственных сигналов с фотоэлектронной системой обработки и индикации. Функционально измерительная система состоит из трех основных систем:

- Оптической преобразующей системы, фотоэлектрической системы преобразования оптического сигнала в цифровой электрический сигнал, измерительной подсистемы на базе ЭВМ.

Оптическая система предназначена для формирования дифракционного изображения исследуемого пространственного объекта, в частности пространственной структуры. В качестве источника когерентного излучения применяется малогабаритный гелий-неоновый лазер ЛГН-207А ($P=2\text{ мВт}$, $\lambda=0.6328\text{ мкм}$). Для согласования апертуры фурие-объектива с источником излучения применяется короткофокусная положительная линза. В качестве фурие-объектива используется двухлинзовый объектив склейка который исправлен на сферическую абберацию. Контрастность и резкость дифракционного изображения объекта в значительной мере зависит от точности юстировки и центрирования всех оптических деталей. Поэтому для получения высокоточных результатов измерения энергетического спектра исследуемых сигналов необходима тщательная юстировка оптической системы измерительной установки. Фотоэлектрическая система состоит из: ПЗС-матрицы, блока формирования видеосигнала, модуля параллельного интерфейса ввода-вывода. Измерительная подсистема основана на применении вычислительных возможностей компьютера. Она представляет собой компьютерную программу, обеспечивающую выполнение определения относительного значения амплитуды видеосигнала. и графическое отображение измеряемого объекта и его характеристик, а также анализ измеряемого объекта на соответствие заданным параметрам.

Тема7. Эталонные измерительные системы

Калибровка измерительных систем

Калибровке подвергают измерительные каналы измерительных систем (ИС), не подлежащие применению или не применяемые в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора.

Калибровку измерительных каналов ИС проводит в соответствии с ПР 50.2.016–94- Государственная система обеспечения единства измерений.

Калибровка средств измерений - совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений.

Определение аналогично поверке, от которой калибровку отличает то, что она распространяется на средства измерений, которые не подлежат государственному метрологическому контролю и надзору, т.е. поверке.

Калибровка объединяет функции, выполнявшиеся ранее при метрологической аттестации и ведомственной поверке средств измерений.

В метрологии термин калибровка имел узко специфическое применение. Например, «калибровку меры» классифицировали как «поверку меры посредством совокупных измерений», а калибровку резервуаров - как процедуру установления его вместимости и придания статуса измерительного резервуара.

В практике метрологического обслуживания измерительных систем (ИС), информационно-измерительных и управляющих систем (ИИС и АСУ ТП) широкое распространение получил термин **«калибровка измерительных каналов»**. Широкое распространение этого термина обусловлено спецификой систем, классифицированной как ИС- “пространственно-распределенные, комплектуемые на объекте эксплуатации путем монтажа и наладки из компонентов различных фирм, и, как следствие, спецификой их метрологического обслуживания, как правило, путем декомпозиции ее измерительных каналов (ИК) и покомпонентным обслуживанием отдельных компонентов ИК с последующим проведением расчета метрологических характеристик (МХ) ИК ИС (ИИС или АСУ ТП) и, в частности погрешности ИК ИС, на основе информации о МХ компонентов.”

(ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения)

Известен способ калибровки измерительных систем, путем попеременного ввода в измерительный канал измеряемых и фиксированных эталонных сигналов, автоматического определения в интервалах между эталонными сигналами реальной рабочей преобразовательной характеристики системы по

значениям эталонных сигналов путем интерполяции значений измеряемого сигнала в соответствии с опорными эталонными значениями.

Перед началом работы и в процессе измерений (например, напряжений) периодически производится подключение ко входу набора эталонных значений сигнала. Недостатком способа является то, что под воздействием дестабилизирующих факторов (температурный дрейф, нестабильность питающих напряжений и т.п.) параметры датчика и/или измерительного канала могут значительно изменяться. В этом случае может оказаться, что использование заранее заданного набора образцовых мер не сможет обеспечить заданную погрешность измерений и необходимо будет проводить коррекцию узлов аппроксимации (эталонных значений сигнала). В результате, выбор оптимальных эталонных значений сигнала становится идентичным поиску полинома наилучшего приближения функции на основании имеющегося полинома в соответствии с обобщенной теоремой Чебышева, когда все $n+2$ экстремальные значения погрешностей ΔL на интервале интерполяции (в нашем случае измерений) поочередно меняют знак и равны между собой по абсолютной величине

Перед калибровкой измерительных систем исследуют вид преобразовательных характеристик датчиков, коэффициентов передачи измерительных трактов. В этом случае, например, снимается набор характеристик датчиков с учетом их разброса от влияния различных дестабилизирующих факторов и определяется усредненное аппроксимирующее аналитическое выражение. Исследуются характерные точки для аппроксимируемой функции, разброс значений конечных разностей, производных относительно среднего значения. Это обеспечивает уменьшение погрешностей метода при выборе степени аппроксимирующего полинома наилучшего приближения и значений аргумента в узлах аппроксимации (эталонных значений сигнала) для калибруемой системы. Поэтому необходимо исследовать упрощенные методы поиска полиномов наилучшего приближения. Тем более что во многих работах при аппроксимации функций используют не полином наилучшего приближения, а обычные полиномы Чебышева, Ньютона или модифицированный ряд Тейлора.

Ниже приведены выписки и документов различных стран, которые регламентируют процесс калибровки

1. Закон Российской Федерации "Об обеспечении единства измерений":

Статья 1. Основные понятия

ПОВЕРКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ - совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным техническим требованиям.

КАЛИБРОВКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ - совокупность операций,

выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не подлежащего государственному метрологическому контролю и надзору.

Статья 23. Калибровка средств измерений

. . . Средства измерений, не подлежащие поверке, могут подвергаться калибровке при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту, при эксплуатации, прокате и продаже.

Калибровка средств измерений производится метрологическими службами юридических лиц с использованием эталонов, соподчиненных государственным эталонам единиц величин.

Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

.

2. Содружество Независимых Государств (СНГ).

Закон "Об обеспечении единства измерений" (модельный).

(Принят Межпарламентской Ассамблеей СНГ 15 июня 1998 года)

Статья 1. Основные понятия

КАЛИБРОВКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ - совокупность операций, которые служат для установления при определенных условиях соотношения между показаниями измерительных приборов или измерительных систем или значениями величин, воспроизводимых материальной мерой или стандартным образцом, и соответствующими значениями величин, воспроизводимых эталоном . . .

Статья 23. Калибровка средств измерений

1. Средства измерений, не подлежащие обязательной поверке, калибруются при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту, при эксплуатации, прокате и продаже в порядке, устанавливаемом владельцем или потребителем этих средств.

Калибровка средств измерений производится метрологическими службами юридических лиц с использованием эталонов, соподчиненных государственным эталонам единиц величин.

Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или свидетельством (сертификатом) о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

2. На основе договоров, заключаемых с органами Государственной метрологической службы или государственными научными метрологическими центрами, заинтересованные метрологические службы юридических лиц могут быть аккредитованы на право проведения калибровочных работ.

В этих случаях аккредитованным метрологическим службам юридических лиц предоставляется право выдавать свидетельства (сертификаты) о калибровке от имени органов и организаций, которые их аккредитовали...

3. Закон Украины "О метрологии и метрологической деятельности"
от 11 февраля 1998 года

Статья 9 .

.....

п. 3 Средства измерительной техники, на которые не распространяется государственный метрологический надзор, разрешается выпускать из производства только при условии, если они прошли калибровку или метрологическую аттестацию.

4. РМГ 29-99 "Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения".

КАЛИБРОВКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ - совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения действительных метрологических характеристик этого средства измерений.

Примечания: 1. Калибровке могут подвергаться средства измерений, не подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору.

1. Результаты калибровки позволяют определить действительные значения измеряемой величины, показываемые средством измерений, или поправки к его показаниям, а также оценить погрешность этих средств.

При калибровке могут быть определены и другие метрологические характеристики.

2. Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

3. Сертификат о калибровке представляет собой документ, удостоверяющий факт и результаты калибровки средства измерений, который выдается организацией, осуществляющей калибровку.

5. МИ 2247-93 "Рекомендация. ГСИ. Основные термины и определения".

12.23 КАЛИБРОВКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определяемым с помощью эталона с целью определения действительных метрологических характеристик этого средства измерений.

Примечания:

1. Калибровке могут подвергаться средства измерений, не подлежащие метрологическому контролю и надзору.

2. Результаты калибровки позволяют определить действительные значения измеряемой величины, показываемые средством измерений, или поправки к его показаниям или же оценить погрешность этих средств. При калибровке могут быть определены и другие метрологические характеристики.

3. Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах. Сертификат о калибровке представляет собой документ, удостоверяющий факт и результаты калибровки средства измерений, который выдается организацией, осуществляющей калибровку.

6. МИ 2365-96 "ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения".

Калибровка средства измерений

Совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не применяемого в сфере, подлежащей государственному метрологическому контролю и надзору.

Примечание. Калибровка является метрологической услугой, основной задачей которой является передача калибруемому средству шкалы измерений в интересующем заказчика (потребителя) диапазоне измерений при приемлемой точности.

7. Международный словарь общих и основных метрологических терминов, 1984 год

КАЛИБРОВКА - совокупность операций, которая устанавливает при определенных условиях соотношение между показаниями измерительных

приборов или измерительных систем или значениями, воспроизводимыми мерами или стандартными образцами, и соответствующими значениями величин, воспроизводимых исходными эталонами.

Примечания:

а) результат калибровки позволяет оценить погрешность показания средства измерений, измерительной системы или меры, или приписать значения отметкам на произвольных шкалах;

б) калибровка позволяет также определять и другие метрологические свойства;

в) результат калибровки может быть зарегистрирован в документе, иногда называемом "калибровочный сертификат" или "отчет о калибровке";

г) результат калибровки иногда выражается в виде "калибровочного коэффициента" или в виде набора таких коэффициентов, имеющего форму "калибровочной кривой".

9. Национальный стандарт Канады CAN 3-L299.1-
"Программа обеспечения качества - Категория 1"

КАЛИБРОВКА - сравнение двух приборов, измерительных устройств или эталонов, один из которых имеет известную точность. Она выполняется с целью обнаружить, скорректировать, зарегистрировать или исключить посредством регулировки любые отклонения в точности прибора или измерительного устройства неизвестной точности.

10. Стандарт по аккредитации M 10 NAMAS (Великобритания), 1989
год:

"Общие критерии определения компетентности калибровочных и испытательных лабораторий".

. . . КАЛИБРОВКА - разновидность измерений, выполняемых с использованием эталонов, мер и приборов с целью установления соотношения между показаниями и известными значениями измеряемой величины.

Этот термин охватывает калибровки, выполняемые в любом месте, включая как лаборатории, действующие на постоянной основе, так и временные образования, которые могут и не контролироваться по критериям постоянных организаций.

11. Международный стандарт ИСО 10012-1:1992 "Требования по обеспечению
качества измерительного оборудования".

Часть 1. Система метрологического подтверждения для измерительного оборудования".

пункт 4.3а ... Обычно калибровку, связанную с любой проверкой пригодности, проводят в нормальных условиях, однако, когда известно, что рабочие условия значительно отличаются от нормальных условий, калибровка может быть выполнена при соответствующих значениях влияющих величин.

(В настоящее время действует МС ИСО 10012-2003)

12. М. Н. Селиванов. О понятии "калибровка средств измерений", журнал "Измерительная техника", № 7, 1992, с.16 - 17.

... во-первых, проверка проводится официальным поверочным органом метрологической службы; во-вторых... поверочными органами устанавливается пригодность поверяемых средств измерений к применению.

... При положительном исходе поверки во многих случаях выдается свидетельство о поверке или наносится оттиск поверительного клейма. Когда исход поверки отрицателен, то средство измерений не допускается к применению. В этом случае погашается ранее поставленный оттиск поверительного клейма или же вместо нового свидетельства о поверке на средство измерений выдается справка о его непригодности к применению. Наряду с этим официальные метрологические органы отслеживают соблюдение межповерочных интервалов.

Калибровка же в условиях свободного рынка свободна от диктата поверочной службы. Калибруемому средству измерений приписываются те значения величины, которые получены на основании сличения с эталоном. Могут указываться погрешность и другие метрологические характеристики. Вопрос о применении средства измерений решает клиент - держатель калибруемого средства.

По определению калибровка это сличение с заданным значением или эталоном . На методику проведения калибровки оказывают влияние связь физических принципов работы прибора с измеряемой величиной, а также условия измерений и конструктивные особенности.

1 Определение понятия «эталон»

Одной из главных задач метрологии является обеспечение единства измерений. Решение этой задачи невозможно без создания эталонной базы измерений. Попытки решения задачи обеспечения единства измерений привели более двухсот лет назад во Франции к идее создания метрической системы, а затем и к подписанию рядом стран метрической конвенции в 1875 году. Именно с тех пор в метрологическую практику вошло слово «эталон». Слово "эталон" — французского происхождения (etalon); в буквальном смысле означает образец, мерило, идеальный или узаконенный образец чего-либо. В словаре синонимов русского языка оно стоит в одном ряду с такими словами,

как образец, пример, образчик. В этом широком значении слово "эталон" и производные от него слова находят употребление в самых различных областях практической деятельности.

В Законе Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» дано следующее определение эталона: «эталон единицы величины – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины (или кратных, либо дольных значений единицы величины)». В этом определении не учитывается, что эталоны воспроизводят и хранят не только единицы, но и шкалы измерений. К тому же немногие современные государственные эталоны воспроизводят номинальное, кратное или дольное значение единицы измеряемой величины. Так, например, государственный эталон единицы электрического сопротивления воспроизводит 12906,4035 Ом; 6453,20175 Ом и 1,0 Ом. Цезиевый репер частоты воспроизводит интервал времени (период колебаний), равный $1/9122631770$ части секунды. Для многих эталонов указывают не значения единиц, а диапазоны.

В реальности эталон может воспроизводить любое значение величины (любую точку или часть шкалы), лишь бы эти значения были известны с требуемой точностью и стабильно воспроизводились. В определении эталона отсутствует также указание на то, что эталон должен воспроизводить единицу или шкалу с наивысшей при данном уровне науки и техники точностью. Точность государственного эталона должна быть достаточной для поверки (калибровки) основного парка эксплуатируемых в стране средств измерений.

Наряду с государственными эталонами существуют уникальные независимо аттестуемые средства измерений, обеспечивающие проведение научных экспериментов, более точные, чем государственные эталоны производных единиц.

Наиболее удачным определением эталона следует признать выдвинутое рядом метрологов следующее понятие: «Эталон (шкалы или единицы измерений) – устройство, предназначенное и утвержденное для воспроизведения и (или) хранения и передачи шкалы или размера единицы измерений средствам измерений».

В этом определении подчеркивается, что эталон обязан передавать размер единицы или шкалу, а не значение величины, равное принятой единице.

2 Классификация эталонов

В приведенном выше определении понятие "эталон единицы" является собирательным, так как на его основе образован целый ряд укоренившихся в отечественной литературе производных понятий-терминов, таких как "государственный эталон единицы", "первичный эталон", "специальный

эталон", "вторичный эталон", "эталон-копия", "эталон сравнения", "эталон-свидетель" и "рабочий эталон".

Чтобы разобраться в этом многообразии эталонов, следует рассмотреть как практически строятся и реализуются системы обеспечения единства измерений отдельных физических величин. Очевидно, что достижению этой цели, прежде всего, будет способствовать применение одинаковых с точки зрения их определения единиц. В этом отношении очень важным этапом в решении обеспечения единства измерений явилась разработка международной системы единиц физических величин— СИ.

Однако "словесной" одинаковости единиц какой-либо физической величины (одинаковости их определения и наименования) еще недостаточно. Для обеспечения единства измерений этой физической величины важно, чтобы единицы были одинаковы в их вещественном выражении в тех образцах (эталонах), с которыми сравнивается измеряемая физическая величина. В то же время, очевидно, что любой такой образец создается специально, и никакие два подобных образца не могут быть сделаны абсолютно одинаковыми:

Непременным элементом любой из действующих сейчас общероссийских поверочных схем является государственный эталон России единицы данной физической величины, обеспечивающий централизованное воспроизведение и хранение единицы для передачи ее размера всем остальным средствам измерений в соответствии с утвержденной поверочной схемой. Все остальные разновидности эталонов называют вторичными.

К ним относятся:

- эталоны-копии;
- эталоны-свидетели;
- эталоны сравнения;
- рабочие эталоны.

В настоящее время различают следующие виды эталонов:

Первичный эталон — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью. Первичные эталоны подразделяются на национальные (государственные), международные и специальные.

Вторичный эталон — эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталон данной единицы. Вторичные эталоны подразделяются на эталоны-копии и эталоны сравнения.

Термин "рабочий эталон" заменил используемый ранее термин "образцовое средство измерений".

Национальный эталон — эталон, признанный официальным решением служить в качестве исходного для

страны. Первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в каче-

стве исходного на территории Российской Федерации, называется государственным первичным эталоном.

Оба термина имеют адекватное значение. Термин "национальный эталон" применяется тогда, когда хотят

подчеркнуть соподчиненность государственного эталона международному.

Международный эталон — эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами.

Специальный эталон — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий для этих условий первичный эталон. Единица, воспроизводимая с помощью специального эталона,

по размеру должна быть согласована с единицей, воспроизводимой с помощью соответствующего первичного эталона.

Эталон-копия — вторичный эталон, предназначенный для передачи размеров единиц рабочим эталонам.

Эталон-копия не всегда является физической копией государственного эталона, он копирует лишь метрологические свойства государственного эталона.

Эталон сравнения — вторичный эталон, применяемый для сличения эталонов, которые по тем или иным

причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Рабочий эталон воспринимает размер единицы от вторичных эталонов и, в свою очередь, служит для передачи размера менее точному рабочему эталону (низшего разряда) или рабочим средствам измерений.

Разрядный эталон — эталон, обеспечивающий передачу размера единицы физической величины через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке размер единицы передается рабочему средству измерения. Число разрядов для каждого вида средств измерений устанавливается государственной поверочной схемой.

.

3 Основные требования к государственным эталонам

Главная функция и одновременно главная отличительная особенность любого государственного эталона состоит в том, что он (и только он!) воспроизводит единицу данной физической величины, ибо государственный эталон является исходным, т. е. "самым образцовым" (в рамках государственной системы обеспечения единства измерений) образцом единицы, а под воспроизведением единицы и понимается осуществление материализации единицы, наилучшим образом соответствующей ее определению.

В ряде случаев это приводит к необходимости создания специальных инженерно-технических сооружений.

Очевидным требованием к составу государственных эталонов, вытекающим из выполняемых ими функций, является наличие средств, непосредственно воспроизводящих единицу физической величины (наличие стабильного "генератора" физической величины), а также средств и методов, позволяющих поддерживать этот размер максимально длительное время.

По номенклатуре метрологических параметров, фиксируемых для государственных эталонов при их утверждении, для большинства эталонов указываются характеристики погрешности воспроизведения единицы в виде двух составляющих:

- оценки случайной погрешности воспроизведения единицы в виде среднего квадратического отклонения результата измерения (СКО);
- оценки неисключенной систематической погрешности воспроизведения единицы (НСП).

Способы выражения погрешностей устанавливает ГОСТ 8.881 - 80 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей».

Немаловажное значение имеет также стабильность эталона во времени.

Уникальность и исключительная значимость государственных эталонов в общероссийском масштабе предъявляют к ним ряд требований и правил организационного и юридического (правового) характера, таких как:

- постоянство места хранения и применения государственных эталонов (в соответствующем метрологическом институте Госстандарта (Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии));

- официальное назначение постоянных ученых — хранителей эталонов и их помощников из числа наиболее высококвалифицированных специалистов— метрологов в данной области измерений;

- создание ряда вторичных эталонов для случаев особо массовых и прецизионных видов измерений.

В ранге государственного каждый эталон утверждается по строго регламентированному порядку, предусматривающему обязательный перечень представляемой документации на эталон. Эталон утверждается в качестве государственного специальным решением (постановлением) Госстандарта, которое оформляется актом об утверждении. Основные сведения об эталоне заносятся в Государственный реестр эталонов России, хранящийся во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологической службы (ВНИИМС), а также в паспорт на эталон, который вместе с другой обязательной документацией хранится у ученого-хранителя в институте, создавшем данный государственный эталон.

Важным моментом в деле совершенствования эталонной базы является выполнение исследований государственных эталонов в процессе их эксплуатации и, в частности, проведение международных сличений.

4 Структура и состав эталонной базы России

Центральным звеном эталонной базы является система государственных эталонов. Поэтому иногда систему государственных эталонов для простоты называют эталонной базой. Так как государственные эталоны служат для воспроизведения единиц физических величин, структура эталонной базы России прежде всего отражает структуру системы единиц физических величин, узаконенных и применяемых в нашей стране.

Как отмечалось выше, в России и в подавляющем большинстве стран мира применяют Международную систему единиц, сокращенно СИ (от начальных букв русской транскрипции французского наименования *Systeme Internationale*). Эта система была разработана специальной международной комиссией и в первоначальном варианте утверждена в 1960 г. решением XI Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) — высшего органа метрической конвенции. В ее резолюциях были утверждены шесть упомянутых выше

основных единиц, две дополнительные (радиан и стерадиан), первый перечень производных единиц (27 единиц), а также 12 десятичных приставок для образования наименований кратных и дольных единиц. В последующих решениях Генеральной конференции по мерам и весам Международная система единиц получила дальнейшее развитие.

При построении любой системы единиц принципиально важными являются два момента: выбор основных единиц системы и выбор правил образования производных единиц

В нашей стране внедрение СИ началось еще в 1961 г. Официально СИ действует с 1 января 1982 г. В соответствии с ГОСТ 8.417 - 81 "ГСИ. Единицы физических величин".

Основу эталонной базы России составляют государственные эталоны основных и дополнительных единиц СИ. Они обеспечивают возможность воспроизведения любых производных единиц СИ, а также не-8которых внесистемных единиц, допущенных к применению (как, например, единиц твердости по различным шкалам). В настоящее время эталонная база России имеет в своем составе 118 первичных государственных эталонов и более 300 вторичных эталонов физических величин. Из них :

52 находятся во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ, Санкт-Петербург), в том числе эталоны метра, килограмма, ампера, кельвина и радиана

25 – во Всероссийском научноисследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, Москва), в том числе эталоны единиц времени и частоты;

13 – во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений, в том числе эталон канделы;

5 и 6 – соответственно в Уральском и Сибирском научно-исследовательских институтах метрологии.

Перечень эталонов не повторяет перечня физических величин. Для ряда единиц эталоны не создаются из-за того, что нет возможности непосредственно сравнивать соответствующие физические величины, например, нет эталона площади. Не создаются эталоны и в том случае, когда единица физической величины воспроизводится с достаточной точностью на основе сравнительно простых средств измерений других физических величин.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются

физической величиной, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать по крайней мере тремя взаимосвязанными свойствами:

неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Неизменность – свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в

течение длительного интервала времени. При этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны

быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных физических величин, основанных на физических постоянных.

Воспроизводимость – возможность воспроизведения единицы физической величины на основе ее теоретического определения с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Сличаемость – возможность обеспечения сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерения. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличений.

Если расположить эталоны в порядке уменьшения точности, то получится следующий перечень:

- 1 Эталон единиц времени и частоты
- 2 Эталон единицы длины
- 3 Эталон единицы массы
- 4 Эталон единицы ЭДС
- 5 Эталон единицы электрического сопротивления

- 6 Эталон единицы силы электрического тока
- 7 Эталон единицы плоского угла
- 8 Эталон единицы силы
- 9 Эталон единицы давления
- 10 Эталон единицы температуры в диапазоне
- 11 Эталон единицы силы света
- 12 Эталон единицы мощности СВЧ колебаний
- 13 Эталон единицы потока нейтронов
- 14 Эталон единицы объемной активности радиоактивных аэрозолей и т.д.

Точнее всего воспроизводятся единицы времени и частоты, относительная погрешность которых составляет $1 \cdot 10^{-14}$

.

По количественному составу эталонная база России является самой представительной: ряд государственных эталонов не имеет соответствующих аналогов за рубежом.

Необходимость обеспечения единства измерений в особых условиях является необходимым условием создания специальных эталонов, но недостаточным. Достаточным условием может служить невозможность передачи с требуемой точностью размера единицы от первичного эталона к средствам измерений данной величины в особых условиях. Таким образом, первичные государственные эталоны воспроизводят единицу данной физической величины и являются самыми высокоточными измерительными устройствами среди всех средств измерений этой величины; специальные государственные эталоны также воспроизводят эту единицу, но в соответствующих особых условиях, и являются самыми высокоточными среди всех средств измерений данной величины в этих особых условиях.

Таким образом, для каждой физической величины должен быть (если обоснована необходимость централизации воспроизведения единицы) только один государственный первичный эталон. Специальных же государственных эталонов для той же физической величины может быть несколько в зависимости от числа представляющих практический интерес особых условий

измерений и от возможностей первичной системы воспроизведения и передачи размера единицы.

Система передачи единицы физической величины от эталона к рабочим средствам измерений называется поверочной схемой. Она имеет несколько ступеней и в общем виде может быть представлена структурной схемой. Передача единицы величины от эталона ко всем рабочим средствам измерений осуществляется не единожды, а периодически, ибо нельзя гарантировать, что хранение единицы в рабочем средстве измерений не повлечет изменение размера этой единицы через некоторое время.

До 1994 года в нашей стране в течение более 200 лет применялся термин «образцовое средство измерений», которое служило промежуточным метрологическим звеном, расположенным между эталоном и рабочими средствами. С целью приближения терминологии, применяемой метрологами страны, к международной, было принято решение именовать образцовые средства измерений рабочими эталонами. Поскольку образцовые средства измерений в зависимости от точности подразделялись на разряды от 1-го (более высокой точности) до 3-его, а иногда даже до 4-го разряда, то рабочие эталоны стали называться рабочими эталонами 1-го разряда, 2-го разряда и т. д.

5 Государственные эталоны основных единиц СИ

В соответствии с современными положениями СИ в качестве основных единиц приняты:

- ☐ единица длины— метр (м);
- ☐ единица массы— килограмм (кг);
- ☐ единица времени— секунда (с);
- ☐ единица силы электрического тока— ампер (А);
- ☐ единица термодинамической температуры—кельвин (К);
- ☐ единица силы света— кандела (кд);
- ☐ единица количества вещества— моль (моль).

Каждая из основных единиц имеет строгое определение, выработанное в решениях Генеральной конференции мер и весов.

Метр — длина пути, проходимого в вакууме светом за $1/299792458$ доли секунды.

Килограмм — масса, равная массе международного прототипа килограмма, хранящегося в международном бюро мер и весов.

Секунда — интервал времени, равный 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Ампер — сила неизменяющегося электрического тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Кельвин — интервал температуры, равный $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Кандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт · ср-1

. Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в образце из углерода - 12 массой 0,012 кг.

.

В настоящее время созданы и действуют государственные эталоны для единиц длины, массы, времени, температуры, силы света, силы электрического тока. Для единицы количества вещества (моля) эталоны пока не созданы нигде в мире, по-видимому, прежде всего по той причине, что практическое использование такого эталона не очень ясно.

Общее число государственных эталонов основных единиц (18) значительно (в 3 раза) превышает число воспроизводимых ими основных единиц (6), так как и для основных единиц потребовалось создание не только первичных, но и специальных эталонов. Так, для основной единицы длины (метра) функционируют 5 государственных эталонов: помимо первичного эталона метра, созданы специальные эталоны для таких специфических областей линейных измерений, как измерения длин волн оптического излучения в спектроскопии, измерения параметров шероховатости, измерения параметров эвольвентных поверхностей для зубчатых зацеплений, измерения амплитуды перемещений при колебательном движении твердых тел.

Для основной единицы температуры — кельвина — функционируют 7 государственных эталонов; для единицы силы тока — ампера — 3

государственных эталона; для остальных основных единиц (килограмма, секунды и канделы) в настоящее время имеется только по одному (первичному) государственному эталону.

Тема 8 Примеры конструкций эталонных средств

8.1 Государственный первичный эталон единицы времени и частоты

В 1967 г. на XIII ГКМВ было принято новое определение единицы времени - секунды как промежутка времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями ($F = 4$, $mF = 0$) и ($F = 3$, $mF = 0$) сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия - 133 при отсутствии внешних возмущающих полей.

Государственный первичный эталон единиц времени и частоты является самым сложным из всех эталонов. В его состав входит большой комплекс аппаратуры, каждое звено которого представляет весьма сложное техническое устройство.

Эталон в целом предназначен для воспроизведения и хранения:

- 1) единицы времени — "атомной" секунды (с);
- 2) единицы частоты — герца (Гц);
- 3) шкалы атомного времени — ТА ;
- 4) шкалы координированного времени — UTC .

Воспроизведение единицы времени (и частоты) в соответствии с ее определением осуществляет в эталоне специально созданная, уникальная по своим характеристикам установка—цезиевый репер частоты реализующая с наивысшей точностью принцип цезиевой меры частоты (рисунок 11.1).

Государственный эталон времени и частоты обеспечивает воспроизведение размеров единиц времени и частоты (секунды и герца) со средним квадратическим отклонением, не превышающим $5 \cdot 10^{-14}$, при не исключенной составляющей систематической погрешности менее 10^{-14}

Рисунок 11.1. Государственный первичный эталон единицы времени и частоты

Эталон соответствует определению единицы времени—секунды как интервала времени, в течение которого совершается 9192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями ($F=4$, $m_F=0$ и $F=3$, $m_F=0$) основного состояния атома цезия-133 в отсутствие внешних полей.

Принцип действия эталона заключается в следующем. Атомы цезия-133 испаряются цезиевой печью при температуре около 400 К и со скоростью 20 км/с попадают в неоднородное поле первого магнита, которое направляет к центру установки атомы с квантовым числом $F = 4$ и рассеивает все остальные частицы. В центре установки расположена система из 1-го и 2-го резонаторов, где на атомы цезия действует высокочастотное магнитное поле, создаваемое кварцевым генератором. При настройке частоты генератора в резонанс с частотой квантового перехода возникает лавинообразный процесс перехода атомов цезия от уровня $F = 4$ к уровню $F = 3$. Затем атомы цезия попадают в неоднородное поле второго сортирующего магнита, которое фокусирует на детекторе атомы с уровнем $F = 3$ и рассеивает все другие. Создаваемый детектором ток ионизации достигает максимума при совпадении частоты кварцевого генератора с частотой квантового перехода. При неравенстве этих частот уменьшается ток ионизации, что служит сигналом для автоматической подстройки частоты генератора.

В состав эталона входят два цезиевых квантовых стандарта частоты и 4 водородных стандарта частоты. Входящие в состав эталона водородные реперы частоты имеют другой принцип действия, основанный на резонансном излучении с меньшей частотой (1 420 405 751,8 Гц). Они выполняют роль эталона копии и позволяют долгое время хранить однажды установленный с помощью первичного (цезиевого) репера размер секунды, не прибегая к его частому включению. Однако все реперы воспроизводят значение частоты, определяющей размер секунды, лишь периодически.

Хранители частоты — это непрерывно работающие меры (кварцевые плюс квантовые), обеспечивающие формирование и хранение шкал времени.

Основная шкала, хранимая эталоном - шкала равномерного атомного времени - ТА. Это равномерная шкала интервалов с фиксированным нулем отсчета. Размер ее секунды соответствует определению 1967 г. Шкала никак не связана с вращением Земли, с ее положением в пространстве. Наряду с ней существует группа неравномерных шкал времени, связанных с положением Земли в пространстве и калибруемых по результатам астрономических и радиоастрономических наблюдений:

□ шкала всемирного времени UT0, длительность секунды в которой равна средней солнечной секунде.

□ шкала всемирного времени UT1, которая отличается от UT0 поправкой на колебания полюсов Земли:

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda.$$

□ шкала всемирного времени UT2, которая отличается от UT1 поправкой на сезонную неравномерность вращения Земли:

$$UT2 = UT1 + \Delta T_s$$

.

Шкалы ТА и UT постепенно и постоянно расходятся. Чтобы максимально устранить последствия этого, введена шкала координированного времени UTC. Секунда UTC равна секунде ТА, а начало счета может меняться ровно на 1 секунду с первого числа каждого месяца (предпочтительно 1 января или 1 июня) в 0 часов по шкале UT2 с тем, чтобы расхождения между UTC и UT2 не превышали бы 0,9 секунды. Практически поправка вводится раз в год - 1 января.

Шкала UTC (точнее, ее национальная версия UTC-SU) также поддерживается эталоном времени и частоты России.

Именно шкала UTC-SU используется для передачи сигналов времени через радио- и телевизионные каналы.

Постепенно точность «горизонтальных» цезиевых реперов перестала удовлетворять требованиям науки и техники. Выход был найден в разработке нового репера, получившего полуофициальное название "фонтан". В нем атомы цезия движутся вертикально со скоростями порядка единиц сантиметров в секунду (применяется так называемое лазерное охлаждение). При таких скоростях уже можно пренебрегать эффектом Доплера и рядом других мешающих факторов. В результате можно ожидать значений относительной погрешности порядка $1 \cdot 10^{-16}$

Главным недостатком нового репера является очень большая стоимость, от 500000 до миллиона долларов. На сегодня работают три «фонтана»: французский, американский и германский. На очереди четвертый - российский.

Комплекс аппаратуры Государственного первичного эталона хранится и применяется во ВНИИФ-ТРИ, где он размещен в пяти термостатных комнатах и четырех аппаратных залах. Аппаратура размещена на специальных фундаментах, развязанных от корпуса здания, и экранирована от внешних магнитных полей. Температура в термостатных комнатах в течение года изменяется не более чем на 4°C , в течение суток – не более $0,2^{\circ}\text{C}$. Влажность колеблется в пределах $70 \pm 10\%$.

8.2 Государственный первичный эталон единицы длины

Каким длительным и сложным бывает путь к новому определению основных единиц и к их практической реализации, наглядно свидетельствует история создания современного первичного государственного эталона длины - метра.

В 1791 г. Национальное собрание Франции постановило принять за основную единицу длины $1/10\,000\,000$ часть четверти земного меридиана. В 1799 г. на основе геодезических измерений Парижского меридиана и его соответствующей части был изготовлен вещественный образец (прототип) метра в соответствии с его определением. Этот образец, изготовленный в виде платиновой концевой меры и получивший название "архивного метра" прослужил в качестве единственного эталона метра почти 90 лет. К 1889 г. Международное бюро мер и весов, изготовило из платиноиридиевого сплава 34 копии архивного метра, одна из которых (№ 6 — наиболее близкая к архивному метру) была принята 1-й ГКМВ (1889 г.) в качестве между народного прототипа метра, а остальные копии переданы странам, подписавшим метрическую конвенцию.

Две такие копии (№28 и №11) получила Россия, из них копия №28 явилась первым Государственным эталоном метра в нашей стране, утвержденным в 1918 г., и просуществовавшим в этом ранге вплоть до 1968 г., когда в качестве государственного первичного был утвержден новый эталон метра, соответствующий новому "световому" определению единицы длины. Размер новой единицы ($1\,650\,763,73$ длин волн оранжевой линии криптона-86) соответствовал размеру прежнего международного прототипа метра. В основе Государственного первичного эталона метра, как и в основе определения этой единицы, были заложены два фундаментальных свойства материи:

1) атомное "происхождение" оптического излучения, имеющего квантово-механический характер и

2) явление интерференции электромагнитных волн.

В 1983 г. XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра: "Метр— длина пути, проходимого в вакууме светом за $1/299\,792\,458$ доли секунды".

Новый эталон метра опирается на эталон единиц времени и частоты. Создание единого эталона единиц времени-частоты-длины является значительным шагом в использовании современной физики в метрологии, в осуществлении программы перехода на естественные эталоны, основанные на фундаментальных физических константах. Преодолеть технические трудности, стоящие на пути создания единого эталона, стало возможным лишь после разработки систем, использующих фундаментальные достижения квантовой

механики. Возможность создания единого эталона, т. е. возможность воспроизведения в одном физическом процессе - распространении плоской электромагнитной волны в вакууме - двух единиц физических величин - единиц времени и длины, базируется на фундаментальной постоянной - скорости света в вакууме $c = 299792458$ м/с и соотношении, связывающем пространство и время

Ранее использовать значение скорости света как фундаментальной физической константы было затруднительно. К 1980 г. ее значение принималось как $(299792,458 \pm 0,0012)$ км / с, т.е. не могло рассматриваться как константа. Использование высокостабильных лазеров при измерении скорости света позволило постулировать значение скорости света точно равной $299792,458$ км / с.

В настоящее время для обеспечения высокой степени стабилизации важнейшего параметра лазерного излучения – частоты широко применяются гелий – неоновые лазеры на длине волны излучения $\lambda = 3,39$ мкм (инфракрасная область спектра) и $\lambda = 0,63$ мкм (видимая область спектра), стабилизированные соответственно по насыщенному поглощению в метане (He–Ne/ CH₄) и молекулярном йоде (He–Ne/I₂). Лазеры на основе (He–Ne/ CH₄) по воспроизводимости частоты приближаются к цезиевому стандарту частоты, являющемуся основой эталона единиц времени и частоты. Работающий в видимом диапазоне спектра He–Ne/I₂ лазер позволяет реализовать новое определение метра через скорость распространения света в вакууме. Наличие излучения на двух длинах волн ($\lambda = 0,63$ мкм и $\lambda = 3,39$ мкм) дает возможность с помощью интерферометра обеспечить высокую точность измерений.

На рисунке приведена структурная схема единого эталона. В состав его входят: государственный первичный эталон единиц времени и частоты, включающий государственный эталон единиц времени и частоты (радиодиапазона), радиооптический частотный мост, лазеры ($\lambda = 3,39$ мкм), а также государственный первичный эталон единицы длины (метра), включающий лазеры ($\lambda = 0,633$ мкм), интерферометры 1 и 2 и установку для измерения отношения длин

Рисунок . Государственный единый эталон единиц времени, частоты и длины

Этот эталон имеет погрешность воспроизведения в виде среднего квадратического отклонения результата измерений $1 \cdot 10^{-11}$

.

8.3 Государственный первичный эталон единицы температуры

Специфика температурных измерений, связанная с неаддитивностью температуры, требует построения температурной шкалы, в которой единица должна быть определена фактически в каждой точке этой шкалы (во всей области реализуемых температур). Сущность такой (термодинамической) температуры раскрывается при изучении обратимого цикла Карно, осуществляемого тепловой машиной, при котором поглощаемое количество теплоты Q_1 при температуре T_1 и отдаваемое количество теплоты Q_2 при температуре T_2

T характеризует энергию внутреннего состояния и называется термодинамической температурой, а построенная на ее основе температурная шкала называется термодинамической температурной шкалой (ТТШ), или — шкалой Кельвина. Именно термодинамическая температура входит во все фундаментальные физические законы.

Особенность термодинамической температуры состоит также в том, что она является неаддитивной физической величиной. Поэтому, если для эталонов длины, массы, и других аддитивных величин можно опираться на воспроизведение размеров установленных единиц (метр, килограмм и др.), то для температуры воспроизведение одной эталонной точки не позволит точно установить другие эталонные точки. Таким образом, измерение температуры требует осуществить точное воспроизведение многих температурных точек, совокупность которых образует температурную шкалу. Температуры, определяемые по этой шкале, должны максимально совпадать с термодинамической шкалой температуры Кельвина. Это требование выполняется тем, что носителями шкалы Кельвина в основном являются термометры сопротивления, градуированные по результатам предельно точных измерений термодинамических температур, полученных и сопоставленных в ведущих термометрических лабораториях мира. Кроме того, указанное требование выполняется за счет возможности независимого воспроизведения международной шкалы в любой стране.

Для построения температурной шкалы необходимо выбрать начало отсчета и определить размер единицы. Естественным и удобным началом отсчета в ТТШ служит абсолютный нуль температуры; хотя он практически не реализуем, но этого и не требуется ввиду того, что существование $T = 0$ следует из самого понятия термодинамической температуры. Выбор единицы в ТТШ достигают фиксацией—273,16 К — температурного интервала между абсолютным нулем и одной из наиболее точно реализуемых опорных (реперных) точек — температурой тройной точки воды.

Температурная шкала МТШ — 90 поддерживается двумя государственными первичными эталонами единицы температуры. Государственный эталон единицы температуры в диапазоне 0...2500°C представляет комплекс эталонов, включающий эталон кельвина, установку

для воспроизведения реперных точек затвердевания цинка, серебра, золота и др., а также интерполяционных приборов – платиновых термометров сопротивления и термоэлектрических термометров. Для измерения тройной точки воды используется газовый термометр.

На рисунке 2 показана схема исходного эталона единицы температуры - кельвина.

Внутри защищенной от внешних источников тепла камеры помещается сосуд (ампула) для образования тройной точки воды. В ампулу загружается лед (ледяная крошка). В результате длительного воздействия льда и воды в той области ампулы, которая соприкасается с ледяной крошкой, образуется слой льда, а на внутренней области ампулы, в центре которой имеется цилиндрическая полость для помещения термометра, остается очень тонкий слой воды. В верхней части ампулы вода находится в парообразном состоянии. Таким образом, воспроизводится тройная точка воды. В качестве термометра, регистрирующего состояние тройной точки воды, применяется газовый термометр, представляющий замкнутый объем, снабженный главным манометром и точным ртутным манометром для измерения давления газа. Температура с помощью газового термометра в первом приближении определяется по формуле $PV=RT$ (для идеального газа), где P и V - давление и объем термометра с газом, R -газовая постоянная.

Государственный первичный эталон в диапазоне температур 0,8...303 К хранится во ВНИИФТРИ.

.

8.4 Государственный первичный эталон единицы силы света

Все световые величины описывают видимое излучение (свет), т. е. электромагнитное излучение с длиной волны в диапазоне 380 760 нм. Их введение было обусловлено практическими потребностями в характеристиках источников и приемников освещения, воспринимаемых человеческим глазом. В качестве основной световой единицы с давних пор выбрана единица силы света, характеризующая источники видимого излучения.

В 1909 г. за единицу силы света была принята "международная свеча", осуществляемая на основе электрических ламп накаливания. Такие электрические эталонные лампы сохраняли световые единицы в течение многих лет с погрешностью 0,1%. Однако воспроизводимость их не могла быть высокой, так как зависела от конструкции и технологии изготовления.

Наиболее универсальным излучателем является абсолютно черное тело (полный излучатель). Его излучение и приняли в качестве эталонного на IX

ГКМВ (1948 г.), хотя уже в конце 30-х годов многие страны создали эталоны на основе абсолютного воспроизведения свечи в виде полного излучателя при температуре затвердевания платины. Температура, при которой должно находиться излучающее тело, играет важную роль по двум причинам. Во-первых, эта температура должна быть достаточно большой, так как при этом увеличивается яркость (и сила света) источника. Кроме того, наиболее приближающимся по составу излучения к солнечному свету является абсолютно черное тело при температуре около 6000 К. Во-вторых, температура излучающего тела должна фиксироваться с возможно большей точностью, так как интенсивность излучения резко зависит от температуры. Такую фиксацию температуры наилучшим образом реализуют реперные точки — фазовые состояния чистых веществ. Выбор в качестве такой температуры точки затвердевания платины (2042 К) обусловлен практическими соображениями: большую температуру трудно реализовать в лабораторных условиях при соблюдении требований высокой точности аппаратуры эталона.

Размер единицы силы света (свечи), определенной на IX ГКМВ и уточненной на 20 ГКМВ (1967 г.) с присвоением наименования "кандела", определялся (кроме температур излучателя) площадью поперечного сечения полного излучателя и отличался от прежнего размера "международной свечи" на 0,5%.

В 1979 году на XVI Генеральной конференции мер и весов было принято новое определение канделы, по которому она воспроизводится путем косвенных измерений.

Световые измерения имеют ту особенность, что в них очень большую роль играет ощущение человека, воспринимающего световой поток посредством глаз. В связи с этим обычные энергетические характеристики являются не совсем удобными для описания результатов таких измерений. Между энергетическими и световыми величинами существует однозначная зависимость, и, строго говоря, для проведения измерений световых величин не требуется введения новой основной величины. Однако, учитывая исторически сложившееся к моменту возникновения системы СИ число основных единиц физических величин, а также значительное влияние на результаты световых измерений субъекта измерений — человека, было принято решение ввести единицу силы света — канделу. Кандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683 \text{ Вт} \cdot \text{sr}^{-1}$

Исследования показали, что средний глаз человека имеет наибольшую чувствительность при длине волны около 0,555 мкм, что соответствует частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц. Эту зависимость чувствительности глаза от длины волны излучения описывают абсолютной световой эффективностью, которая равна

отношению светового потока (т.е. оцениваемой нашим глазом мощности излучения) к полному потоку излучения. Световая эффективность представляет собой величину, позволяющую переходить от энергетических величин к световым. Она измеряется в люменах, деленных на ватт. При существующем определении канделы максимальной световой эффективности придано точное значение $K_m = 683 \text{ Лм/Вт}$, тем самым она введена в ранг фундаментальных констант. В связи с этим кандела определяется путем косвенных измерений и, следовательно, является производной физической величиной, формально оставаясь основной.

Современный государственный эталон канделы имеет диапазон номинальных значений 30 – 15000 кд, среднее квадратическое отклонение результата измерений – $1 \cdot 10^{-3}$ кд ; неисключенная систематическая погрешность составляет $2,5 \cdot 10^{-3}$ кд.

Эталонная база России является, с одной стороны, самостоятельной и независимой, а с другой стороны, адаптированной к европейской и мировой системам обеспечения единства измерений.

Основными направлениями развития эталонной базы России в настоящее время являются:

- оптимизации эталонной базы по составу и структуре;
- создание системы взаимосвязи эталонов, в том числе "естественных", основанных на фундаментальных физических константах и статистических физических исследованиях в области воспроизведения основных и важнейших производных единиц;
- создание систем эталонов, в которой разумно сочетается централизованное и децентрализованное воспроизведение единиц;
- поисковое исследование и внедрение новых физических явлений и технологий, способных обеспечить научный прорыв при создании эталонов;
- разработка предельных по точности методов и средств измерений эталонного значения.

Эти направления конкретизованы в научно-технической программе "Эталонная база России", главная цель которой – создание новых и совершенствование существующих государственных эталонов в таких важнейших областях науки и техники, как механика, электромагнетизм, термодинамика, оптико-физика, физикохимия, ядерная физика и др.

Приложение 1

На базе ФГУП ВНИИОФИ размещена уникальная база государственных первичных эталонов

Государственный первичный эталон единицы силы света и светового потока непрерывного излучения ГЭТ 5-2003	ГОСТ 8.023-2003	Саприцкий Виктор Ильич
Государственный первичный эталон единиц спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещенности, силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2÷25,0 мкм		Саприцкий Виктор Ильич
ГЭТ 86-2010	ГОСТ 8.195-89	
Государственный специальный эталон единицы энергетической освещенности малых уровней в диапазоне длин волн 1,0 – 50,0 мкм		Морозова Светлана Петровна
ГЭТ 157-92	ГОСТ 8.1558-92	
Государственный первичный специальный эталон единиц координат цвета и координат цветности		Горшкова Татьяна Борисовна
ГЭТ 81-2009	ГОСТ 8.205-90	
Государственный первичный эталон единиц спектральных коэффициентов направленного пропускания в диапазоне длин волн 0,2 – 50 мкм, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн 0,2 – 2,5 мкм		Саприцкий Виктор Ильич
ГЭТ 156-91	ГОСТ 8.557-2007	
Государственный первичный эталон единиц спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности потока излучения, спектральной плотности силы излучения в диапазоне длин волн 0,001 – 0,400 мкм		Аневский Сергей Иосифович
ГЭТ 84-2011	ГОСТ 8.197-2003	
Государственный первичный эталон единиц потока излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,001 – 0,400 мкм		Минаева Ольга Александровна
ГЭТ 162-2010	ГОСТ 8.552-2001	
Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения		Либерман Анатолий Абрамович
ГЭТ 28-2009	ГОСТ 8.275-2007	
Государственный первичный специальный эталон единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации		Тихомиров Сергей Владимирович
ГЭТ 170-2011	ГОСТ 8.585-05	
Государственный специальный эталон единицы мощности импульсного лазерного излучения в диапазоне 0,4 - 10,6 мкм		Тихомиров Сергей Владимирович

ГЭТ 90-85 Государственный первичный эталон единицы показателя преломления	ГОСТ 8.198-85	Вишняков Геннадий Николаевич
ГЭТ 138-2010 Государственный первичный эталон единицы угла вращения плоскости поляризации.	ГОСТ 8.583-2003	Вишняков Геннадий Николаевич
ГЭТ 50-2008 Государственный первичный специальный эталон единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей	ГОСТ 8.590-2009	Михеев Олег Викторович
ГЭТ 148-2009 Государственный первичный специальный эталон единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов до 20 пс.	ГОСТ 8.540-2006	Михеев Олег Викторович
ГЭТ 178-2010 Государственный первичный специальный эталон единиц спектральной плотности энергетической яркости и относительного спектрального распределения мощности излучения в диапазоне длин волн 0,3÷25,0 мкм		Саприцкий Виктор Ильич
ГЭТ 179-2010 Государственный первичный специальный эталон единицы хроматической дисперсии в оптическом волокне		Григорьев Василий Викторович
ГЭТ 184-2010 Государственный первичный специальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне		Митюрев Алексей Константинович
ГЭТ 185-2010 Государственный первичный эталон единиц эллипсометрических углов		Вишняков Геннадий Николаевич
ГЭТ 186-2010 Государственный первичный специальный эталон единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения		Москалюк Сергей Александрович

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

а) основная литература:

1. Половцев, И. Г. Оптическое приборостроение: учеб. пособие для вузов/ И.Г.Половцев, Г.В.Симонова, под ред. И.В.Самохвалова. – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. – 400 с.
2. СГГА. Оптико-электронные лазерные системы и приборы: учеб. пособие. Ч.1.: Основы оптико-электронных измерительных систем/ Ю.В. Чугуй, И.Г.Пальчикова, Р.В.Куликов. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 59 с.
3. СГГА. Оптические методы и приборы для научных исследований: учеб. пособие. Ч.2: Интерференционные и поляризационные приборы/ О.К.Ушаков, Н.Ф.Чайка В.Б.Шлишевский. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 57 с.

б) дополнительная литература:

1. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фото-электрические явления. М.: Мир, 1980, 208 с.
2. Бахмутский В.Ф., Гореликов Н.И., Кузин Ю.Н. Оптоэлектроника в измерительной технике. М.: Машиностроение, 1979, 152 с.
3. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1976, 432 с.
4. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. М.: Мир, 1979, 292 с.
5. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений Том 2 / под ред. Б. Кайзана. М.: Мир, 1978, 328 с.
6. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений. Том 3. / под ред. Б. Кайзана. М.: Мир, 1980, 311 с.
7. Изнар А.Н. Электронно-оптические приборы. М.: Машиностроение, 1977, 264 с.
8. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986, 173 с.
9. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978, 400 с.

Электронные ресурсы:

1. Прикладная оптика [Электронный ресурс] / под ред. Н.П. Заказнова. – 3-е изд. - СПб.: Лань, 2009. – 320 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/books> - Загл. с экрана.