

## ЛЕКЦИЯ 3 Сравнительный анализ источников света

### 3.1. Характеристики источников света

Источники света по физическим принципам действия могут быть разделены на газоразрядные, тепловые, люминесцентные и лазерные. Если ОНК используется для изучения свойств самосветящихся тел, то объект контроля – свойства излучателя. В таких системах источник света не нужен.

Обычно основные свойства источника ОИ определяют путем сравнения с излучением *черного тела*.

Все тела при температуре  $T > 0$  являются источниками теплового излучения, которое представляет собой электромагнитные волны. *Черным телом* называется тело, которое при данной температуре  $T$  на всех частотах имеет наибольшую, по сравнению с другими (нечерными) телами, энергию излучения. Черное тело полностью поглощает любое электромагнитное излучение, падающее на его поверхность. Величины, характеризующие свойства черных тел, обозначают с помощью верхнего индекса «<sup>0</sup>», например  $M^0$ . Для теплового излучения черного тела установлены следующие законы.

*Закон Планка:*

$$M_{e,\lambda}^0 = \frac{c_1}{\lambda^5 e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (1)$$

где  $M_{e,\lambda}^0$  – спектральная плотность энергетической светимости ( $[M_{e,\lambda}^0] = 1 \text{ Вт/м}^3$ ),  $\lambda$  – длина волны,  $T$  – температура,  $c_1 = 3,71 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ ,  $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ .

Длина волны  $\lambda_m$ , при которой функция  $M_{e,\lambda}^0$  имеет максимум, связана с температурой черного тела *законом Вина*

$$\lambda_m T = b, \quad (2)$$

где  $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина. При этом справедливо равенство

$$(M_{e,\lambda}^0)_{\max} = AT^5, \quad (3)$$

где  $A = 1,301 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$

*Согласно закону Стефана–Больцмана:*

$$M_e^0 = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda}^0 d\lambda = \sigma T^4, \quad (4)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана–Больцмана.

Все тела, отличающиеся по характеру излучения от абсолютно черного тела, делятся на селективные и серые. Селективным телом называется тело, обладающее селективным излучением и поглощением, т.е. его энергетическая светимость  $M_e$  и коэффициент поглощения  $a_e$  являются функциями длины волны и температуры.

Энергетическая светимость реальных тел  $M_e$  всегда меньше, чем энергетическая светимость черного тела  $M_e^0$ . Их отношение

$$\varepsilon = \frac{M_e}{M_e^0} \quad (5)$$

называют *коэффициентом излучения* (теплового излучателя). Для данной длины волны  $\lambda$  вводится понятие *спектрального коэффициента излучения*

$$\varepsilon_\lambda = M_{e,\lambda} / M_{e,\lambda}^0. \quad (6)$$

Величины  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_\lambda$  определяются экспериментально. Их значения для различных тел и веществ приведены в справочниках.

Согласно *закону Ламберта* яркость черного тела  $L$  (Кд/м<sup>2</sup>) не зависит от направления излучения, при этом сила света  $I$  такого излучателя есть функция направления

$$I = I_0 \cos \theta, \quad (7)$$

где угол  $\theta$  отсчитывается от направления нормали к излучающей площадке,  $I_0$  – сила света в направлении, нормальном к этой площадке.

Если яркость излучателя не подчиняется закону Ламберта, то для характеристики его энергетической светимости  $M_e$  используется энергетическая яркость  $L_e = dM_e / d\Omega$ , где  $d\Omega$  – телесный угол, а вместо  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_\lambda$  применяются *коэффициенты направленного теплового излучения*

$$\begin{aligned} \varepsilon(\theta, \varphi) &= L_e(\theta, \varphi) / L_e^\circ \\ \varepsilon_\lambda(\theta, \varphi) &= L_{e,\lambda}(\theta, \varphi) / L_{e,\lambda}^\circ \end{aligned} \quad (8)$$

*Серым телом* называется тело, у которого  $\varepsilon_\lambda = const$ , т.е. не зависит от длины волны. В качестве характеристик тепловых излучателей используют также следующие величины:

*Радиационная температура* ( $T_M, T_R$ ) – физическая величина, которая равняется температуре черного тела, при которой энергетическая яркость равняется энергетической яркости рассматриваемого теплового излучателя.

*Яркостная температура* ( $T_L, T_S$ ) – физическая величина, которая равняется температуре черного тела, при которой для данной длины волны (частоты, волнового числа) оно имеет спектральную плотность энергетической яркости, такую же как и у рассматриваемого теплового излучателя.

*Цветовая температура* ( $T_c$ ) – физическая величина, которая равняется температуре черного тела, при которой его излучение имеет такую же цветность, как и у рассматриваемого излучения.

Кроме основных видов источников света, рассмотренных ниже, в системах ОНК, особенно при визуальном контроле часто используется *естественное освещение, создаваемое Солнцем*.

### 3.2. Тепловые источники света (ТИ)

Наиболее употребительные источники света – тепловые, особенно лампы накаливания. Спектр ТИ близок к спектру черного тела.

Основным металлом, применяемым для нитей ламп накаливания, является вольфрам. Зависимость  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  для вольфрама показывает, что для температуры 2800 К, при которой работают лампы накаливания, в диапазоне от  $\lambda_1 = 300$  нм до  $\lambda_2 = 1$  мкм  $E_\lambda$  изменяется примерно на 20%. С указанной точностью вольфрам можно считать серым телом и расчет спектральной плотности энергетической светимости вести по формуле Планка (1). С повышением температуры излучение вольфрама приближается к излучению абсолютно черного тела. Кроме вольфрама, в качестве тела накала применяются молибден, платина, графит и др.

В ОИС ОНК используют различные ТИ в зависимости от назначения системы.

*Ленточные лампы*, которые имеют постоянную яркость и удобное для измерительных целей тело накала, калибруются по излучению абсолютно черного тела и служат в качестве световых и энергетических эталонов, применяемых в различных приборах.

В инфракрасной области спектра применяются накаляющиеся *штифты и сетки*. Большое распространение получил штифт Нернста, который представляет собой цилиндр, спрессо-

ванный из порошкообразной массы циркония, смешанной с 15% окиси натрия. Излучение штифта Нернста при высоких температурах ( $\approx 2000^\circ\text{C}$ ) до длин волн  $\lambda \approx 15$  мкм близко к излучению абсолютно черного тела ( $\lambda_m \approx 1,3$  мкм). Для этих же целей применяют штифт Глобара – стержень из спрессованного порошкообразного карборунда, который нагревается до  $1200^\circ\text{C}$  и применяется при инфракрасной спектроскопии (при  $\lambda \approx 10$  мкм).

*Галогенные лампы накаливания* имеют более высокую светимость при той же температуре нити накала. Спектр их излучения лежит в интервале  $0,3 \div 3,5$  мкм.

Индикатрисса излучения ТИ близка к сферической, их яркость составляет от  $10^5$  до  $10^7$  кд/м<sup>2</sup>.

*Недостатки ТИ:* инерционность, вследствие чего их модуляция по цепи питания возможна только при низких частотах (1–10 Гц), изменение спектра излучения при колебаниях напряжения питания, высокая температура нити накала, *достоинства ТИ* – широкий спектральный диапазон, который легко перестраивается, надежность, большая световая мощность (до  $10^6$  лм).

Разновидностью ТИ являются *различные виды пламени, электрическая дуга и искра*. Их применение ограничено лабораторией, где они применяются в качестве источников очень яркого света – до  $10^9$  кд/м<sup>2</sup>.

### **3.3. Газоразрядные источники света (ГИ)**

В ГИ высокого и низкого давления используется эффект свечения газов при электрическом разряде. Для них характерна высокая яркость ( $10^6 - 10^8$  кд/м<sup>2</sup>), способность работать в модулированном и непрерывном режимах, причем модуляция осуществляется по цепи питания лампы.

Индикатрисса излучения ГИ близка к сферической, размеры излучающей области 0,1–1,0 мм.

Спектр излучения ГИ обычно линейчатый или смешанный (отдельные интенсивные линии на фоне непрерывного спектра). Спектр ксеноновых ламп близок к солнечному.

ГИ находят применение в стробоскопических осветителях, при люминесцентном контроле, в качестве мощных источников ИК- и УФ-излучения для длин волн 0,25–2 мкм.

### **3.4. Люминесцентные источники света (ЛИ)**

Действие ЛИ основано на эффекте электро- или катодолюминесценции. Наиболее известны такие ЛИ, как лампы дневного света, светодиоды (СД) и электронно-лучевые трубки (ЭЛТ).

В последнее время появились новые *компактные люминесцентные лампы*, которые потребляют в 6-7 раз меньше энергии, чем привычные лампы накаливания при той же яркости.

*СД* имеют высокий КПД, малые габариты, модулируются по цепи питания до частот 1–5 мГц, обладают линейной зависимостью яркости от тока питания. Спектр СД близок к линейному (монокроматичен). Основные области излучения СД – зеленая, желтая, красная и ИК (0,9 мкм). Индикатрисса излучения СД – полусферическая или направленная (угол раскрытия  $30 - 60^\circ$ ). Создан СД с перестройкой спектра излучения по цепи питания. Яркость СД невелика ( $1 - 100$  кд/м<sup>2</sup>). В настоящее время освоен выпуск линеек и матриц на основе СД с числом элементов до 1024.

*ЭЛТ* применяют в основном в системах бегущего луча, устройствах анализа фотоснимков и в телевизионных микроскопах. Для них характерны: высокое быстродействие, большая ин-

формационная емкость (до  $10^6$  элементов на растр). Недостаток ЭЛТ – невысокая яркость ( $10^2 - 10^3$  кд/м<sup>2</sup>), сложность системы электронной развертки, большая дисторсия.

### 3.5. Лазерные источники света

*Лазеры* наиболее перспективны для использования в ОНК. Эти приборы позволяют получить высокомонохроматические, параллельные и когерентные пучки света, которые удобно использовать при построении систем сигнализации и связи, в интерферометрах, дальномерах, телемеханических системах и т.п. Подробно принципы работы и устройство лазеров будут рассмотрены во второй части курса «Оптический контроль» – «Лазерная техника в ОНК».

Лазеры могут работать в импульсном режиме, когда большая энергия лазера высвечивается в малые промежутки времени, и в непрерывном режиме, когда мощность излучения значительно меньше. Поскольку лазеры дают монохроматическое излучение, задача определения светового потока, поступающего от лазера в приемное устройство, значительно облегчается.

Недостатком лазера является малый коэффициент полезного действия, что приводит к значительному увеличению габаритов системы и сложности конструкции. В этом смысле весьма перспективными являются полупроводниковые лазеры, которые обладают большим коэффициентом полезного действия (~90%) и малыми габаритами. Эти лазеры менее монохроматичны, что, однако, не может препятствовать их применению для ОИС, так как диапазон длин волн, в которых они работают, значительно уже, чем диапазон, определяемый спектральными характеристиками светофильтров и приемника излучения.

Число типов ОКГ, выпускаемых серийно, составляет многие десятки. Диапазон длин волн их излучения охватывает УФ, ВИ и ИК диапазоны области спектра. Мощность излучения ОКГ колеблется от 0,1 мВт до 10 Вт. Расходимость луча составляет  $1 - 10'$  (угловых минут).

По временным характеристикам выделяют импульсные лазеры (длительность импульса  $10^{-6} - 10^{-9}$  с при скважности 0,01–10 с) и непрерывные. Среди импульсных наиболее широко применяются ОКГ на иттрий-алюминиевом гранате (ИАГ), неодимовом стекле, углекислом газе, некоторых жидких красителях (родамин и др.). Малогабаритные лазерные диоды модулируются до частот  $10^9$  Гц. Среди лазеров непрерывного типа наиболее широко в дефектоскопии применяют гелий-неоновые (красный цвет излучения,  $\lambda = 0,63$  мкм, мощность 1–20 мВт), отличающиеся большой долговечностью (до 10 000 ч), гелий-кадмиевые (синее излучение,  $\lambda = 0,415$  мкм, мощность 1–40 мВт), аргоновые (зеленое излучение,  $\lambda = 0,46 \div 0,51$  мкм, мощность 1–2 Вт). Сверхмощные (до 1 кВт) ОКГ на  $CO_2$  ( $\lambda = 10,6$  мкм) и на  $CO$  ( $\lambda = 5,5$  мкм) находят применение в устройствах нагрева объектов.

### 3.6. Светофильтры (СФ)

Для корректировки яркости и спектрального состава ОИ, созданного источником света в ОИС используются светофильтры.

Существуют светофильтры следующих видов: светофильтры из стекла, окрашенного в массу, желатиновые светофильтры, газовые, поляризационные и интерференционные. По области применения различаются светофильтры для фотографических работ, для выделения узких участков спектра, нейтральные для равномерного ослабления спектра, с изменяющейся характеристикой (фотометрические клинья), для изменения излучения источника света в соответствии с чувствительностью приемника и т.п.

Основными характеристиками СФ служат следующие величины.

Пусть  $\Phi_e$  – поток энергии излучения, упавший на светофильтр, и  $\Phi_e'$  – поток энергии, прошедший через него, тогда отношение

$$\tau = \Phi_e' / \Phi_e \quad (9)$$

называется *интегральным коэффициентом пропускания светофильтра*. По характеру изменения коэффициента пропускания СФ подразделяются на дискретные, плавные, постоянные.

По спектральным свойствам различают селективные и неселективные СФ. Коэффициент пропускания селективного светофильтра зависит от длины волны  $\lambda$  и называется *спектральным коэффициентом пропускания*  $\tau_\lambda$ . Практически весьма удобно пользоваться спектральным коэффициентом пропускания, выраженным через оптическую плотность:

$$D_\lambda = -\lg \tau_\lambda \quad (10)$$

Интегральный коэффициент пропускания СФ  $\tau$  может быть вычислен по формуле

$$\tau = \int_0^\infty M_{e\lambda} \tau_\lambda d\lambda / \int_0^\infty M_{e\lambda} d\lambda, \quad (11)$$

где числитель получается путем перемножения ординат кривой спектрального распределения в источнике света на ординаты кривой спектрального коэффициента пропускания светофильтра.

По изменению характеристик излучения при ослаблении отличают светофильтры, не меняющие структуру пучка излучения (направление, поляризация, расходимость, когерентность и т.д.), от светофильтров, меняющих эту структуру.

Развитие лазерной техники, фотометрии, спектроскопии привело к широкому развитию светофильтров, имеющих весьма малые коэффициенты пропускания. Эти приборы в настоящее время называются *ослабителями*. Для них введено понятие *коэффициента ослабления*  $K$  ( $K = 10^{-2} \div 10^{-9}$ ), который также определяется формулой (9).