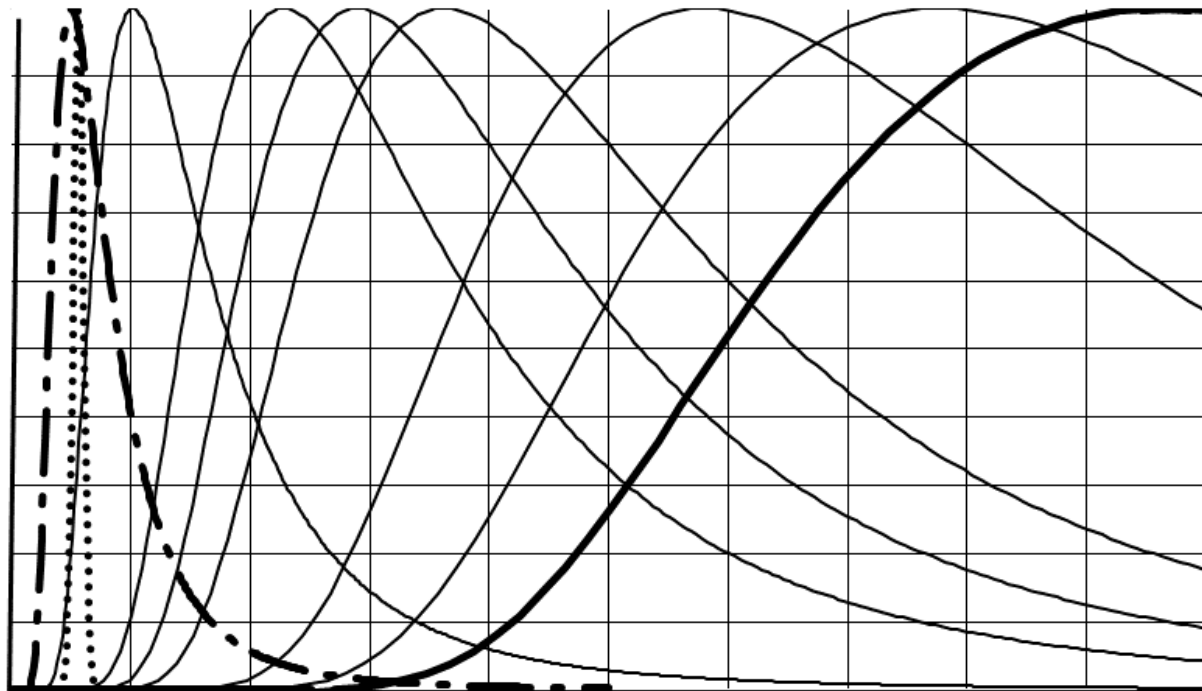


ИТМО

В.В. Коротаяев, В.А. Рыжова

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ
ПРИБОРОВ**



Санкт-Петербург 2025

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.В. Коротаев, В.А. Рыжова

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

Учебное пособие

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО**

по направлению подготовки 12.04.02 Опотехника
в качестве учебного пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

ИТМО

**Санкт-Петербург
2025**

Коротаев В.В., Рыжова В.А. Энергетический расчёт оптико-электронных приборов. – СПб: Университет ИТМО, 2025. – 160 с.

Рецензент(ы):

Коняхин Игорь Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория "ординарный профессор") института "Высшая инженерно-техническая школа", Университета ИТМО.

Учебное пособие содержит изложение этапов энергетического расчёта оптико-электронного прибора от параметров и характеристик элементов: к оценке параметров прибора в целом.

ИТМО

ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере IT. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2025

© Коротаев В.В., Рыжова В.А., 2025

Содержание

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	12
1 СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ	13
2 ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОПТИКИ И ФОТониКИ	18
2.1 Оптическое излучение и его диапазоны	18
2.2 Величины физической оптики	20
2.3 Геометрический фактор пучка излучения	22
2.4 Энергетические величины	23
2.5 Фотонные величины	26
2.6 Редуцированные величины	28
2.7 Световые величины	29
2.8 Распределения спектральных плотностей энергетических и световых величин	33
2.9 Взаимосвязь световых и энергетических величин, коэффициент использования глазом излучения источника	35
3 ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ МОДЕЛИ	38
3.1 Основные законы теплового излучения	38
3.2 Излучение нечёрных тел	42
3.3 Относительные распределения спектральной плотности оптических величин источников излучения	44
3.4 Пространственное распределение параметров излучения тепловых источников	45
3.5 Диапазон изменения спектральной плотности энергетической яркости тепловых источников излучения	49
3.6 Пространственное распределение излучения светодиодов	50
3.7 Отражающая поверхность как вторичный источник оптического излучения	51
4 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПАДАЮЩЕГО НА ФОТОПРИЁМНИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА	60
4.1 Приёмное устройство опτικο-электронного прибора	60
4.1.1 Схема приёмного устройства	60
4.1.2 Облучённость и освещённость в плоскости изображения, создаваемые объективом приёмного устройства	61
4.1.3 Облучённость и освещённость в плоскости изображения, создаваемые отражённым от объекта или фона излучением	64
4.1.4 Поток излучения, создаваемый объективом приёмного устройства на чувствительной площадке фотоприёмника	65

4.1.5 Поток излучения «большого» источника, создаваемый объективом приёмного устройства на чувствительной площадке фотоприёмника	67
4.1.6 Поток излучения «малого» источника, создаваемый объективом приёмного устройства на чувствительной площадке фотоприёмника	69
4.2 Встречная коллиматорная (прожекторная) схема оптико-электронного прибора.....	71
4.2.1 Структура пучка лучей коллиматора (прожектора).....	73
4.2.2 Распределение облучённости в пучке лучей коллиматора (прожектора)	77
4.2.3 Энергетический расчёт оптико-электронного прибора, построенного по встречной коллиматорной схеме	79
5 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОПРИЁМНИКА К ИЗЛУЧЕНИЮ ЦЕЛИ, ПОМЕХИ И ФОНА.....	85
5.1 Параметры токов, напряжения и чувствительности фотоприёмника	85
5.2 Квантовая эффективность и чувствительность фотоприёмников	90
5.3 Коэффициент использования фотоприёмником потока излучения	94
6 ШУМ ФОТОПРИЁМНИКА.....	98
6.1 Ток и напряжение шума фотоприёмника	98
6.2 Шумовые и пороговые параметры фотоприёмников.....	99
6.3 Квантовый порог чувствительности	105
6.4 Расчёт параметров тока и напряжения шума на выходе фотоприёмника на основании паспортных данных.....	107
7 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ШУМ ФОТОПРИЁМНИКА ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РАСЧЁТЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА	110
7.1 Паспортные параметры фотоприёмников и их пересчёт при энергетическом расчёте оптико-электронных приборов	110
7.2 Расчёт чувствительности, порога чувствительности и обнаружительной способности фотоприёмника по отношению к излучению заданного источника	113
7.2.1 Пересчёт параметров фотоприёмников, заданных в энергетических величинах по паспортному источнику, к параметрам, заданным в энергетических величинах по произвольному (заданному) источнику	113
7.2.2 Пересчёт параметров фотоприёмников, заданных в световых величинах по паспортному источнику, к параметрам, заданным в энергетических единицах по тому же источнику	119

7.2.3 Пересчёт параметров фотоприёмников, заданных в световых величинах по паспортному источнику, к параметрам, заданным в энергетических величинах по произвольному (заданному) источнику	121
7.2.4 Пересчёт параметров фотоприёмников, заданных в световых величинах по паспортному источнику, к параметрам в световых величинах по произвольному (заданному) источнику	124
7.3 Расчёт составляющих тока и напряжения шума фотоприёмника	125
8 СИГНАЛ И ШУМ В ЭЛЕКТРОННОМ ТРАКТЕ	134
8.1 Расчёт переменной составляющей сигнала и величины постоянной составляющей тока на выходе фотоприёмника	134
8.2 Расчёт основных составляющих шума оптико-электронного прибора в заданной полосе частот электронного тракта	140
8.3 Расчёт шума предварительного усилителя	143
8.4 Отношение сигнал/шум в оптико-электронном приборе	147
8.5 Расчёт шумовой погрешности измерительного оптико-электронного прибора.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	154
Литература	155

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- $A_{\text{из}}$ – площадь изображения источника
- $A_{\text{ист}}$ – площадь источника
- A_1 – площадь выходного зрачка объектива коллиматора
- A_2 – площадь входного зрачка объектива приёмного устройства
- $A_{\text{эфф}}$ – эффективная фоточувствительная площадь фотоприёмника
- $-a$ – расстояние от объекта до главной точки объектива в пространстве предметов
- a' – расстояние от главной точки объектива в пространстве изображений до осевой точки изображения
- c – скорость электромагнитного излучения в вакууме, $c \approx 2,998 \cdot 10^8$, [м/с]
- C'_λ – постоянная, $C'_\lambda = 1,286 \cdot 10^{-11}$ Вт/(м²·мкм·К⁵)
- D – обнаружительная способность фотоприёмника
- D_1 – обнаружительная способность фотоприёмника в единичной полосе частот
- D^* – удельная обнаружительная способность фотоприёмника
- $D_{fI_{\text{фот.ш.фп.}}}$ – спектральная плотность дисперсии тока фотонного шума в выходной цепи фотоприёмника
- $D_{fI_{\text{др.ш.фп.}}}$ – спектральная плотность дисперсии тока дробового шума фотоприёмника
- $D_{fI_{\text{т.ш.фп.}}}$ – спектральная плотность дисперсии тока теплового шума фотоприёмника
- $D_{fI_{\text{ток.ш.фп.}}}$ – спектральная плотность дисперсии тока токового шума фотоприёмника
- $D_{fI_{\text{мерц.ш.фп.}}}$ – спектральная плотность дисперсии тока шума мерцания фотоэлемента
- $D_{fI_{\Sigma\text{ш.фп.}}}(f)$ – частотное распределение дисперсии (мощности) суммарного шума тока в выходной цепи фотоприёмника
- $D_{fI_{\text{ш.фп.}}}(f)$ – распределение спектральной плотности дисперсии (мощности) тока шума фотоприёмника на его выходе
- $D_{fU_{\text{ш.фп.}}}(f)$ – распределение спектральной плотности дисперсии (мощности) напряжения шума фотоприёмника на его выходе
- $D_{\text{из}}$ – диаметр изображения источника

$D_{\text{ист}}$ – диаметр источника
 $D_{\text{об}}$ – диаметр входного зрачка объектива
 $D'_{\text{об}}$ – диаметр выходного зрачка объектива
 $D_{\text{п}}$ – диаметр области с постоянной облучённостью
 E_e – энергетическая освещённость, облучённость
 $E_{e\lambda}$ – спектральная плотность облучённости
 $E_{e,\lambda,2}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности облучённости в
 точке изображения на элементарной площадке dA_2
 $E_{e,\text{п}}$ – облучённость в изображении источника на чувствительной
 площадке фотоприёмника
 $E_{e,\lambda,\text{п}}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности облучённости в
 изображении источника на чувствительной площадке
 фотоприёмника
 E_p – фотонная облучённость
 E_v – освещённость
 $E_{v\lambda}$ – спектральная плотность освещённости
 f' – фокусное расстояние объектива в пространстве изображений
 $(-f)$ – фокусное расстояние объектива в пространстве предметов
 $(-f_1)$ – фокусное расстояние объектива коллиматора в пространстве
 предметов
 (f'_2) – фокусное расстояние объектива приёмного устройства в
 пространстве изображений
 G – геометрический фактор пучка излучения
 H_e – Энергетическая экспозиция
 H_v – экспозиция
 $H_{v\lambda}$ – спектральная плотность экспозиции
 I_e – сила излучения
 $I_{e\lambda}$ – спектральная плотность силы излучения
 $I_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности силы
 излучения
 $i_{e,\lambda}(\lambda)$ – относительное распределение спектральной плотности силы
 излучения
 I_p – фотонная сила излучения
 I_v – сила света
 $I_{v\lambda}$ – спектральная плотность силы света
 $I_{\text{общ}}$ – общий ток фотоприёмника

$\overline{I_{\text{общ}}}$ – постоянная составляющая общего тока фотоприёмника
 $I_{\sim\text{общ}}$ – амплитуда переменной составляющей общего тока фотоприёмника
 I_{T} – темновой ток фотоприёмника
 $I_{\text{ш.фп.}} = \sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2(f)}$ – ток шума фотоприёмника
 $K_{\text{V}} = 683 \text{ лм/Вт}$ – переводной множитель от единиц энергетических величин к световым
 L_{e} – энергетическая яркость
 $L_{\text{e},\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости излучения
 $l_{\text{e},\lambda}(\lambda)$ – относительное распределение спектральной плотности энергетической яркости излучения
 $L_{\text{e},\lambda}^0(\lambda, T)$ – распределение спектральной плотности энергетической яркости абсолютно чёрного тела
 $L_{\text{e}\lambda 1}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности энергетической яркости площадки dA_1 источника
 L_{p} – фотонная яркость
 L_{v} – яркость
 $L_{\text{v}\lambda}$ – спектральная плотность яркости
 l – расстояние между объектами, источником (коллиматором или прожектором) и приёмным устройством оптико-электронного прибора
 M_{e} – энергетическая светимость
 $M_{\text{e}\lambda}$ – спектральная плотность энергетической светимости
 $M_{\text{e},\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости излучения
 $m_{\text{e},\lambda}(\lambda)$ – относительное распределение спектральной плотности энергетической светимости излучения
 M_{e}^0 – энергетическая светимость абсолютно чёрного тела
 $M_{\text{e}\lambda \text{ макс}}^0$ – максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела
 $M_{\text{e}\lambda}^0(\lambda, T)$ – распределение спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела при длине волны λ и при температуре T

$m_{e\lambda}^0(\lambda, T)$ – относительное спектральное распределение
 энергетической светимости абсолютно чёрного тела
 M_p – фотонная светимость
 M_v – светимость
 $M_{v\lambda}$ – спектральная плотность светимости
 p'_0 – дистанция оформления пучка лучей коллиматора
 $Q_e(W)$ – энергия излучения
 $Q_{e\lambda}$ – спектральная плотность энергии излучения
 $Q_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности энергии
 излучения
 $q_{e,\lambda}(\lambda)$ – относительное распределение спектральной плотности
 энергии излучения
 Q_p – фотонная энергия, энергия фотона
 Q_v – световая энергия
 $Q_{v\lambda}$ – спектральная плотность световой энергии
 S_I – токовая чувствительность фотоприёмника
 S_U – вольтовая чувствительность фотоприёмника
 $S_{\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной характеристики
 чувствительности фотоприёмника на длине волны излучения
 $\lambda_{\text{макс}}$
 $S_\lambda(\lambda)$ – спектральная характеристика чувствительности
 фотоприёмника
 $s(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности
 фотоприёмника
 $S_{\text{инт, ф}}$ – чувствительность фотоприёмника к излучению сложного
 спектрального состава
 $S_{I\text{фона}}$ – токовая чувствительность фотоприёмника к излучению фона
 $U_{\text{общ}}$ – общее напряжение фотоприёмника
 U_T – темновое напряжение фотоприёмника
 $U_{\text{ш.фп.}} = \sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2(f)}$ – напряжение шума фотоприёмника
 $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность
 монохроматического излучения для дневного зрения
 $V'(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность
 монохроматического излучения для сумеречного зрения
 X – энергетическая, фотонная или световая величина

X_λ – спектральная плотность (энергетической, фотонной, световой) величины
 $X_{\lambda_{\max}}$ – максимальное значение спектральной плотности оптической величины
 $X_\lambda(\lambda)$ – распределением спектральной плотности величины
 $x_\lambda(\lambda)$ – относительное распределение спектральной плотности оптической величины
 X_e – энергетические величины
 X_p – фотонные величины
 X_r – редуцированные величины
 X_v – световые величины
 $2\beta_1$ – угловой размер источника излучения из точки наблюдения
 $\Delta f_{\text{экв}}$ – эквивалентная шумовая полоса пропускания измерительного тракта
 $\varepsilon(\lambda, T)$ – коэффициент теплового излучения тела
 η – квантовая эффективность фотоприёмника
 k – коэффициент использования фотоприёмником падающего потока излучения
 k_r – КПД глаза или коэффициент использования глазом излучения данного источника
 λ – длина волны оптического излучения
 λ_{\max} – длина волны максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела
 μ – отношение сигнал/шум
 ρ – коэффициент отражения
 $\rho(\lambda)$ – спектральная характеристика коэффициента отражения
 ρ_r – коэффициент зеркального отражения
 ρ_d – коэффициент диффузного отражения
 $\rho_s(\lambda)$ – спектральная характеристика коэффициента отражения объекта
 σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К⁴)
 $\sigma'_{A'}$ – апертурный угол оптической системы в пространстве изображений
 $\sigma_{ш I}$ – средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды тока фотосигнала
 $\sigma_{ш U}$ – средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды напряжения фотосигнала

$\tau(\lambda)$ – спектральная характеристика коэффициента пропускания
 $\tau_1(\lambda)$ – спектральное распределение коэффициента пропускания среды
 $\tau_{oc}(\lambda)$ – спектральное распределение коэффициента пропускания оптической системы
 $\Phi_e(P)$ – поток излучения, мощность излучения
 $\Phi_{e\lambda}$ – спектральная плотность потока излучения
 $\Phi_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности потока излучения
 $\varphi_{e,\lambda}(\lambda)$ – относительное распределение спектральной плотности потока излучения
 $\Phi_{e,2}$ – поток излучения на фотоприёмнике
 $\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности потока излучения на фотоприёмнике
 $\Phi_{эфф}$ – эффективный для данного фотоприёмника поток падающего излучения
 $\Phi_{e,эфф,г}$ – эффективный для глаза поток излучения от данного источника, измеряется в ваттах эффективных
 Φ_p – поток фотонов
 Φ_v – световой поток
 $\Phi_{v\lambda}$ – спектральная плотность светового потока
 $\Phi_{п}$ – порог чувствительности фотоприёмника
 $\Phi_{п1}$ – порог чувствительности фотоприёмника в единичной полосе частот (noise equivalent power - NEP)
 $\Phi_{п}^*$ – удельный порог чувствительности фотоприёмника
 $\Phi_{p\lambdaп}$ – квантовый порог чувствительности фотоприёмника
 $\Phi_{с=}$ – постоянная составляющая потока излучения на фотоприёмнике;
 Φ_{\sim} – амплитуда переменной составляющей потока излучения на фотоприёмнике
 $\Phi_{фона}$ – поток излучения фона
 2ω – угловое поле приёмного устройства оптико-электронного прибора
 ω_m – круговая частота модуляции оптического излучения

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящего учебного пособия является изложение логической цепочки этапов энергетического расчёта оптико-электронного прибора – от параметров и характеристик элементов, таких как источники оптического излучения (объекты, цели, фоны, помехи), оптические элементы, фотоприёмники, элементы предварительной обработки сигнала, к оценке энергетических параметров и характеристик оптического излучения по мере его преобразования в оптической системе, а также оценка параметров сигнала и шума на выходе фотоприёмника и звена первичной обработки сигнала (предварительного усилителя), позволяющая рассчитать соотношение параметров сигнала и шума, вероятностные характеристики при решении задач обнаружения, параметры объектов и передачи информации.

В учебном пособии представлены возможные модели параметров и характеристик источников оптического излучения и их преобразований в оптических системах, которые могут быть приняты при проектных расчётах. Разработчику необходимо учитывать разнообразие источников и оптических систем и применимость их моделей при расчётах конкретных оптико-электронных приборов различного назначения и принципа действия.

Особенность предлагаемых методик расчёта состоит в том, что они не только основаны на результатах исследований, известных из классических работ по оптике и теории оптико-электронных приборов, но и ориентированы на использовании измеряемых технических параметров и характеристик элементов, которые приводятся в их паспортах и информационных материалах производителей.

При написании данного учебного пособия в максимально возможной степени использованы термины и определения, установленные государственными стандартами в области оптики и фотоники.

Учебное пособие предназначено для формирования у обучающихся профессиональных компетенций в области проектирования оптико-электронных приборов. Материалы настоящего пособия могут быть использованы при освоении таких дисциплин, как «Оптико-электронные приборы и системы», «Проектирование оптико-электронных приборов и систем», «Измерительные оптико-электронные приборы и системы», «Оптико-электронные приборы и системы измерения линейных и угловых перемещений». Учебное пособие может найти применение в реальной практике проектирования оптико-электронных приборов.

1 СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Зрительный аппарат является уникальным инструментом, позволяющим человеку и животным ориентироваться в окружающем пространстве и познавать его. Более 95% информации, поступающей в мозг человека, формируется его зрительным аппаратом. Поступающее в глаз оптическое излучение видимого спектрального диапазона (свет) преобразуется в энергию нервных импульсов, которые обрабатываются мозгом человека и позволяют не только познавать окружающее пространство и ориентироваться в нем, но и принимать решения для различных действий, в том числе для активного воздействия на окружающий мир.

Глаз – уникальный по функциональности приёмник оптического излучения, который за счёт своих адаптационных возможностей преобразует свет в диапазоне яркостей от 2×10^{-6} до 2×10^5 кд/м, то есть его относительный яркостный диапазон составляет 10^{11} . В то же время спектральный диапазон зрения человека достаточно узок: мы воспринимаем оптическое излучение в диапазоне длин волн электромагнитного излучения примерно от 0,38 мкм до 0,78 мкм, который называется светом. Этот спектральный диапазон чувствительности сформировался в процессе эволюции человека под влиянием излучения естественного источника, которым является Солнце.

Однако собственное излучение большинства предметов окружающего нас мира связано со степенью их нагрева и не регистрируется органами зрения. Человек начинает видеть нагретые участки объектов только при достижении ими определенной температуры, когда часть спектра их излучения попадает в темно-красную зону диапазона видимого света:

- 800°C ($\lambda_{\text{макс}}=2,7$ мкм) при неярком дневном освещении;
- 600°C ($\lambda_{\text{макс}}=3,2$ мкм) в затемненном помещении;
- 420°C – 450°C ($\lambda_{\text{макс}}=6,9$ – $6,4$ мкм) после 15-минутной адаптации в полной темноте.

Оптическое излучение с длиной волны более 0,78 мкм называется инфракрасным (ИК). Регистрация ИК излучения объектов материального мира позволяет получить информацию об их температуре. Визуализация ИК изображений позволяет определить распределение температуры в пределах наблюдаемой сцены.

Человек регистрирует ИК излучение за счёт нагрева кожного покрова, воспринимая его как ощущение «тепла», исходящего, например, от печки или иного нагретого объекта, но кожный покров не позволяет его визуализировать.

Как писал М.М. Мирошников [1], «...все предметы материального мира являются источниками оптического излучения. В оптических сигналах содержится информация о размерах, форме, положении и энергетическом состоянии тел. Эта информация может использоваться различным образом, однако во всех случаях в процессе её использования происходит преобразование энергии оптического излучения в другие виды энергии».

Развитие оптики как науки об оптическом излучении, т.е. электромагнитном излучении в диапазоне от 1 нм до 1 мм [2], и его взаимодействии с веществом привело к появлению технических средств (элементов, приборов и систем), которые позволяют регистрировать оптическое излучение во всем спектральном диапазоне, в том числе формировать и обрабатывать изображения в видимом (0,38–0,78 мкм), в ИК (0,78–1000 мкм) и в ультрафиолетовом (0,001–0,38 мкм) диапазонах оптического излучения.

Оптико-электронными называют приборы, в которых информация об исследуемом или наблюдаемом объекте переносится оптическим излучением (содержится в оптическом сигнале), а ее первичная обработка сопровождается преобразованием энергии оптического излучения в энергию электрического сигнала.

Теоретические основы и методы расчёта оптико-электронных приборов раскрыты в ряде трудов известных учёных в области оптико-электронного приборостроения [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Свойства объектов материального мира как источников оптического излучения рассмотрены в ряде фундаментальных работ и учебников [9, 10, 11]

Важнейшим элементом оптико-электронного прибора являются приёмники оптического излучения (фотоприёмники) – элементы или устройства, предназначенные для преобразования энергии оптического излучения в другие виды энергии (электрическую, тепловую, энергию химического процесса, энергию нервных импульсов) [12, 13].

После преобразования в фотоприёмнике информация об излучающем объекте содержится в параметрах электрического сигнала – амплитуде, частоте, фазе, длительности импульсов и т.д. Эта информация подвергается

обработке по заданному алгоритму и передаётся оператору или используется для автоматического управления наблюдаемым процессом.

Структура оптико-электронного прибора представлена на рис. 1.1. Излучение объекта поступает во входной зрачок оптической системы, которая строит его изображение на чувствительной площадке фотоприёмника. Фотоприёмник преобразует оптический сигнал в электрический. Электрический сигнал преобразуется в электронном тракте и поступает в выходной блок, в качестве которого может выступать монитор, визуализирующий изображение объекта, или устройство управления параметрами объекта, например, его температурой или распределением температуры, что характерно для систем управления технологическими процессами.

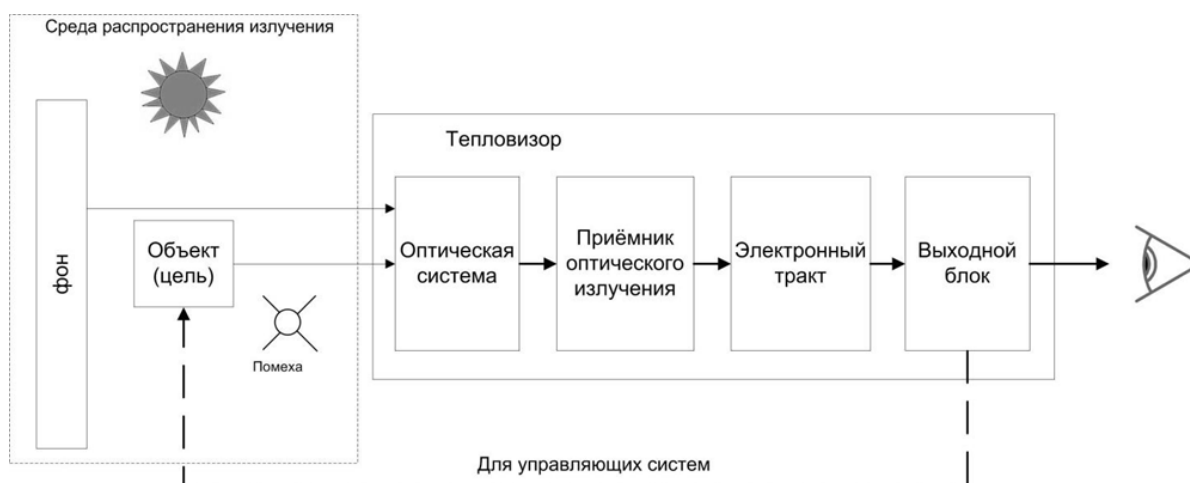


Рисунок 1.1 – Обобщённая структурная схема оптико-электронного прибора

В реальной обстановке, кроме собственного излучения объекта, во входной зрачок поступает излучение внешних источников (например Солнца), как прямое, так и отражённое от объекта, а также излучение фона (собственное и отражённое), расположенного за объектом, и помех, попадающих в поле зрения прибора.

Тепловидение сформировалось как важное направление оптико-электронного приборостроения. Теория и схемотехника тепловидения анализируется в ряде монографий и учебников [1, 6, 8, 14, 15], а также в многочисленных научных статьях.

Рассмотрим типичную ситуацию – с помощью тепловизора осуществляется наблюдение за человеком. Человек как объект наблюдения находится в поле зрения тепловизора. Но, кроме него, в поле зрения

тепловизора присутствует фон, например деревья. Между объектом и тепловизором могут присутствовать помехи, например кусты, которые также попадают в поле зрения. Объект, фон и помехи освещаются источниками фонового излучения, например Солнцем. Таким образом, во входной зрачок оптической системы тепловизора поступает излучение объекта (собственное и отражённое), фона (собственное и отражённое) и помех. Во входной зрачок оптической системы также попадает прямое солнечное излучение. Если Солнце не находится в поле зрения тепловизора, то всегда присутствуют блики, обусловленные отражением излучения от оправы объектива и других элементов конструкции, которые также создают помехи.

В результате на фотоприёмник поступает как излучение объекта (полезный оптический сигнал), так и смесь составляющих, обусловленных отражённым от объекта, а также собственным и отражённым излучением фона, помех и внешних источников. Элементы оптико-электронного прибора (рис. 1.1) должны выделить полезный сигнал и обеспечить решение функциональной задачи с заданными параметрами качества.

Основные функции элементов оптико-электронного прибора распределяются следующим образом.

Оптическая система, как правило, содержит объектив и спектральный фильтр. Объектив строит изображение объекта в зоне анализа. Спектральный фильтр выделяет излучение в заданном спектральном диапазоне. Фотоприёмник преобразует оптический сигнал в электрический. Чувствительный элемент фотоприёмника является последним элементом оптической системы. Как элемент электрической схемы фотоприёмник является генератором и элементом обработки сигнала. При этом и объектив, и спектральный фильтр, и фотоприёмник формируют спектральную характеристику прибора в целом, которая должна обеспечить достаточное для последующей обработки превышение полезного сигнала над шумами и помехами.

Функция преобразования сигнала в электронном тракте может иметь совершенно разный вид в зависимости от назначения и требуемых параметров качества выходного сигнала, а также принятых алгоритмов его обработки.

Вопросы по 1 разделу

1. Как реализуется процесс зрительного восприятия человеком окружающего мира?
2. В чём состоит уникальность зрительного аппарата человека?
3. Как связано зрительное восприятие человека с температурой объектов?
4. Какое излучение называется инфракрасным?
5. Какой спектральный диапазон электромагнитного излучения соответствует оптическому излучению?
6. В чем отличие понятий «оптическое излучение» и «свет»?
7. Какой структурный элемент оптико-электронного прибора определяет прибор как оптико-электронный?
8. Что представляет собой оптическая система оптико-электронного прибора и каково её назначение в схеме?
9. Приведите примеры реализации выходного блока оптико-электронного прибора для схем приборов информационного, измерительного и следящего (управляющего) типов.
10. Каков может быть состав оптического сигнала на входе оптико-электронного прибора в зависимости от реальной сцены? Приведите примеры.
11. Какова основная цель обработки сигналов элементами оптико-электронного прибора?

2 ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОПТИКИ И ФОТОНИКИ

2.1 Оптическое излучение и его диапазоны

Оптическим излучением, согласно ГОСТ Р 58568—2019 [2], называется электромагнитное излучение с длинами волн, лежащими в пределах между областью перехода к рентгеновским лучам (приблизительно 1 нм) и областью перехода к радиоволнам (приблизительно 1 мм).

Оптическое излучение охватывает значительный интервал, и его разбивают на ряд диапазонов в соответствии с различными критериями.

В оптико-электронном приборостроении эти диапазоны определяются сочетанием нескольких факторов: спектральной характеристикой излучения Солнца, физиологическими свойствами человеческого глаза, спектральным пропусканием (окнами прозрачности) атмосферы, а также достигнутыми характеристиками фотоприёмников.

Границы диапазонов излучения весьма условны и в различных источниках определяются по-разному. Примем классификацию, принятую в [16, 17] и приведённую в таблице 2.1.

Видимое излучение (свет) – это область максимума излучения Солнца и чувствительности человеческого глаза.

Видимое (VIS) и ближнее инфракрасное излучение (NIR) – это область чувствительности фотоприёмников на основе кристаллического кремния, которые обладают лучшими параметрами и характеристиками в этом диапазоне. Максимум излучения ламп накаливания, температура нити накаливания которых приходится на интервал 2800–3000 К, составляет примерно 1 мкм.

Коротковолновое инфракрасное излучение (SWIR) приходится на область чувствительности фотоприёмников на основе ряда двойных и тройных полупроводников, среди которых можно выделить соединения InGaAs, InSb, InP и ряд других, а также их сочетания.

Средневолновое инфракрасное излучение (MWIR) приходится на область чувствительности фотоприёмников на основе соединений InSb, PtSi и ряда других, а также фотоприёмников на квантово-размерных ямах (Quantum Well Infrared Photo-detector, QWIP-фотоприёмники). Чувствительные элементы в них создаются на основе соединений GaAs/Al_xGa_{1-x}As и некоторых других [13].

Таблица 2.1 Классификация диапазонов оптического излучения

Длина волны, мкм	Название	Обозначение
0,001–0,025	Экстремальный ультрафиолет (extreme ultraviolet)	EU
0,025–0,2	Вакуумный ультрафиолет (vacuum ultraviolet)	VUV
0,2–0,38	Ультрафиолет (ultraviolet)	UV
0,38–0,78	Видимое оптическое излучение, свет (visible)	VIS
0,78–1	Ближнее инфракрасное излучение (near infrared radiation)	NIR
1–3	Коротковолновое инфракрасное излучение (short-wavelength infrared)	SWIR
3–5	Средневолновое инфракрасное излучение (medium-wavelength infrared)	MWIR
5–14	Длинноволновое инфракрасное излучение (long-wavelength infrared)	LWIR
14–30	Особо длинноволновое инфракрасное излучение (very long wavelength infrared)	VLWIR
30–100	Дальнее инфракрасное излучение (far-infrared)	FIR
100–1000	Субмиллиметровое (терагерцовое) излучение (submillimeter)	SubMM

Длинноволновое инфракрасное излучение (LWIR) приходится на область чувствительности фотоприемников на основе таких соединений, как кадмий–ртуть–теллур (КРТ), GeHg и болометров на основе оксида ванадия (VOx-микроболометров), а также QWIP-фотоприемников.

Поскольку диапазон температур большинства окружающих нас предметов материального мира приходится на интервал от –100 С до +700 С, т.е. от 173 К до 973 К, а спектральный состав излучения – на интервал от 1 мкм до 14 мкм, тепловизоры работают в диапазонах SWIR, MWIR и LWIR-излучения.

Примерное соответствие диапазонов излучения и основных материалов фотоприёмников приведено в таблице 2.2. [13]

Таблица 2.2 Диапазоны излучения и основные материалы фотоприёмников

Спектральный диапазон, мкм	Название	Материалы фотоприёмников
0,38–1,0	видимое (VIS) и ближнее ИК (NIR)	Si, матрицы на лавинных InGaAs-диодах
1–3	коротковолновое ИК (SWIR)	InGaAs, InSb, InP
3–5	средневолновое ИК (MWIR)	InSb, PtSi, GaAs/Al _x Ga _{1-x} As, QWIP-матрицы
8,0–12,0	длинноволновое ИК (LWIR)	микроболометры, КРТ, GeHg, QWIP-матрицы

2.2 Величины физической оптики

Термины и определения основных величин, применяемых в области физической оптики, а также их буквенные обозначения регламентированы ГОСТ Р 70973—2023 [18] и ГОСТ 8.654-2016 Фотометрия [19].

В настоящем учебном пособии приведены определения и соотношения величин, которые требуются для изложения основного материала настоящего издания. Необходимость изложения данного материала также обусловлена тем, что определения в [18, 19] несколько отличаются от принятых в ранее действовавших стандартах, например в ГОСТ 7601-78. Соответственно, и формальные выражения несколько отличаются от приводимых в ранее изданных учебниках и учебных пособиях, например [1, 11, 12].

Величины физической оптики определяют временное, пространственное, спектральное распределение энергии оптического излучения и свойств веществ, сред и тел как источников, посредников переноса или приёмников энергии излучения.

Различают:

1. **Энергетические величины** (X_e), которые количественно выражают в единицах энергии или мощности.
2. **Фотонные величины** (X_p), которые выражают числом фотонов, содержащихся в излучении.

3. **Редуцированные величины** (X_r), которые образованы по математической модели линейного спектрально-аддитивного для рассматриваемого явления приёмника.
4. **Световые величины** (X_v), которые связаны с чувствительностью человеческого глаза.

Спектральная плотность (энергетической, фотонной, световой) величины X_λ – это физическая величина, определяемая отношением энергетической, фотонной или световой величины dX , приходящейся на малый спектральный интервал $d\lambda$, содержащий данную длину волны λ , к ширине этого интервала [18].

Спектральную плотность энергетической, фотонной или световой величины (далее – оптической величины) определяют по формуле [18]:

$$X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda} . \quad (2.1)$$

Распределением спектральной плотности величины $X_\lambda(\lambda)$ в шкале длин волн называют зависимость спектральной плотности оптической величины X_λ от длины волны.

Из выражения (2.1) следует [11] соотношение между спектральной плотностью величины и самой величиной:

$$X = \int_0^{\infty} X_\lambda(\lambda) d\lambda . \quad [\text{размерность величины}] \quad (2.2)$$

Здесь и далее наряду с формулой указана размерность величины для исключения неоднозначности при выводе соотношений между величинами.

Максимальное значение спектральной плотности оптической величины будем обозначать $X_{\lambda\max}$.

Относительное распределение спектральной плотности оптической величины по длинам волн будем обозначать строчной буквой x_λ и определять соотношением:

$$x_\lambda(\lambda) = \frac{X_\lambda(\lambda)}{X_{\lambda\max}} . \quad (2.3)$$

Интеграл относительного распределения спектральной плотности оптической величины по длинам волн имеет размерность [мкм]:

$$x = \int_0^{\infty} x_\lambda(\lambda) d\lambda , \quad [\text{мкм}] . \quad (2.4)$$

Соотношения (2.1)–(2.4) справедливы для любой (энергетической, фотонной, световой) величины.

Пример распределения спектральной плотности оптической величины приведён на рис. 2.1. Показан спектральный интервал от λ_1 до λ_2 , длина волны максимума спектральной характеристики λ_{\max} . Физическая величина в интервале от λ_1 до λ_2 равна площади фигуры под графиком распределения спектральной плотности $X_\lambda(\lambda)$.

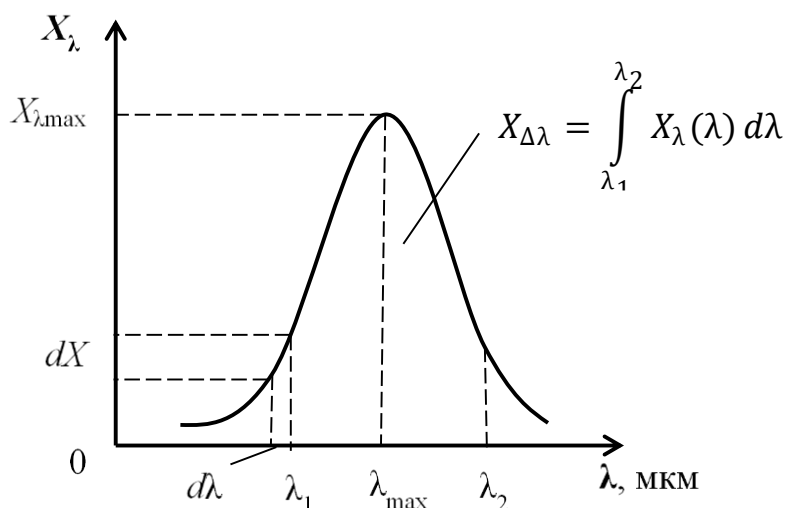


Рисунок 2.1 – Распределение спектральной плотности величины $X_\lambda(\lambda)$

Индикатриса (энергетической, фотонной, световой) величины $X(\varphi, \theta)$ – угловое распределение (энергетической, фотонной, световой) величины в пространстве или в плоскости [18].

2.3 Геометрический фактор пучка излучения

При определении ряда терминов используется термин «геометрический фактор пучка излучения».

Геометрический фактор пучка излучения G (geometric extent) – это физическая величина, определяемая интегралом [18]

$$G = \int_A \int_{\Omega} \cos \theta d\Omega dA_1 \quad (2.5)$$

и равная для узкого пучка излучения произведению малой площади dA_1 сечения пучка излучения на малый телесный угол $d\Omega$, который заполняется этим пучком, и на косинус острого угла θ между нормалью к dA_1 и направлением распространения пучка:

$$d^2G = \cos \theta \, d\Omega \, dA_1. \quad (2.6)$$

Геометрические параметры, входящие в выражения (2.5) и (2.6) показаны на рис. 2.2.

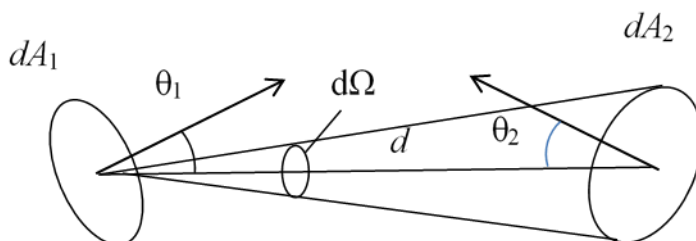


Рисунок 2.2 – Геометрические параметры к определениям величин физической оптики [12]

2.4 Энергетические величины

Энергетическая величина X_e (radiant quantity) - физическая величина, количественно выражаемая в единицах энергии или мощности и производных от них [18].

Энергия излучения $Q_e(W)$ (radiant energy) – энергия, переносимая оптическим излучением. Энергия излучения измеряется в Джоулях или в электрон-вольтах [18].

Из выражения (2.1) следует, что спектральная плотность энергии излучения

$$Q_{e\lambda} = \frac{dQ_e}{d\lambda}, \quad [\text{Дж/мкм}]. \quad (2.7)$$

Здесь и далее наряду с формулой указана размерность величины для исключения неоднозначности при выводе соотношений между величинами.

Поток излучения $\Phi_e(P)$ (radiant flux) – это мощность излучения, определяемая отношением энергии, переносимой излучением, ко времени переноса dt , значительно превышающему период электромагнитных колебаний [18]:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}, \quad [\text{Вт}]. \quad (2.8)$$

Из выражений (2.1) и (2.8) следует, что спектральная плотность потока излучения

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}, \quad [\text{Вт/мкм}]. \quad (2.9)$$

Для характеристики поверхностной плотности потока излучения протяжённого источника используется энергетическая светимость.

Энергетическая светимость (в точке поверхности) M_e – это отношение потока излучения $d\Phi_e$, исходящего от элемента поверхности, который содержит данную точку, к площади этого элемента dA_1 :

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_1}, \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (2.10)$$

Из выражения (2.1) и (2.10) следует, что спектральная плотность энергетической светимости:

$$M_{e\lambda} = \frac{dM_e}{d\lambda}, \quad [\text{Вт/м}^2\text{мкм}]. \quad (2.11)$$

Для характеристики источника излучения, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до него, используется такая величина, как сила излучения, характеризующая пространственную плотность потока излучения (рис. 2.2).

Сила излучения I_e (radiant intensity) – это физическая величина, определяемая отношением потока излучения $d\Phi_e$, распространяющегося от источника излучения внутри малого телесного угла, содержащего рассматриваемое направление, к этому углу $d\Omega$ [18]:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}, \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{ср}} \right]. \quad (2.12)$$

Величины, входящие в выражения (2.10) и (2.12), показаны на рис. 2.3.

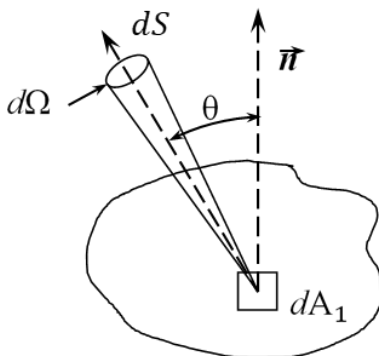


Рисунок 2.3 – Поток излучения, испускаемый источником с бесконечно малой площадью dA_1 внутри телесного угла $d\Omega$, направление потока имеет угол θ с нормалью \vec{n} к элементу поверхности [17]

Телесный угол — это отношение части площади на поверхности сферы к квадрату радиуса r сферы:

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2}, \quad [\text{ср}] \quad (2.13)$$

Телесный угол — это угол, образуемый конусом с половинным углом ϕ , вершина которого находится в центре сферы, определяется выражением:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \phi) = 4\pi \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (2.14)$$

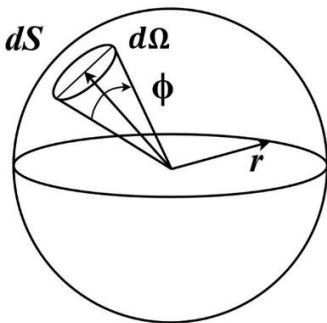


Рисунок 2.4 – Телесный угол $d\Omega$ в центре сферы – это площадь dS поверхности сферы, заключённая в основании конуса, делённая на квадрат радиуса сферы [17]

Спектральная плотность силы излучения $I_{e\lambda}$ определяется согласно выражению (2.1).

При определении термина «энергетическая яркость» используется термин «геометрический фактор пучка излучения».

Энергетическая яркость L_e (radiance) – это физическая величина, определяемая отношением потока излучения $d^2\Phi_e$, проходящего в рассматриваемом направлении в пределах малого телесного угла $d\Omega$ через участок поверхности dA_1 , к произведению этого телесного угла, площади участка и косинуса угла θ между рассматриваемым направлением и нормалью \vec{n} к участку dA_1 [18] (рис. 2.3).

Энергетическую яркость определяют формулой [18]:

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA_1 \cos \theta d\Omega} = \frac{d^2\Phi_e}{d^2G} = \frac{dI_e}{dA_1 \cos \theta}, \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}} \right] \quad (2.15)$$

Энергетическая освещённость, облучённость (в точке поверхности) E_e (irradiance) – это физическая величина, определяемая отношением потока

излучения $d\Phi_e$, падающего на элемент поверхности, содержащий рассматриваемую точку, к площади dA_2 этого элемента (рис. 2.2):

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_2} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (2.16)$$

Спектральная плотность облучённости $E_{e\lambda}$ определяется согласно выражению (2.1).

Энергетическая экспозиция (в точке поверхности для данной длительности - времени переноса энергии излучения dt) H_e – это отношение энергии излучения dQ_e , падающей на элемент поверхности, содержащей данную точку, в течение заданной длительности времени, к площади dA_2 этого элемента (рис. 2.2):

$$H_e = \frac{dQ_e}{dA_2}, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right]. \quad (2.17)$$

Приведённый перечень энергетических величин не является исчерпывающим. Более полный набор приведён в ГОСТ Р 70973—2023 [18].

2.5 Фотонные величины

При анализе слабых оптических сигналов и их преобразований в фотоприёмниках с низким уровнем собственных шумов расчёты в некоторых случаях целесообразно вести в фотонных величинах, которые определены ГОСТ Р 70973—2023 [18].

Фотонная величина X_p (photon quantity) – физическая величина, количественно выражаемая в безразмерных единицах числа фотонов и производных от него [18].

Фотонная энергия Q_p (photon energy), то есть энергия одного фотона, определяется как произведение постоянной Планка h на частоту ν [9, 18]:

$$Q_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad [\text{Дж}] \quad (2.18)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [Дж · с]; ν – частота электромагнитных колебаний, [Гц]; c – скорость электромагнитного излучения в вакууме, $c \approx 2,998 \cdot 10^8$, [м/с]; λ – длина волны излучения [м].

В практических расчётах длину волны, как правило, выражают в микрометрах, тогда и скорость электромагнитного излучения $c \approx 3 \cdot 10^{14}$ [мкм/с].

С учётом значений $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [Дж · с] и $c \approx 3 \cdot 10^{14}$ [мкм/с]; выражение (2.18) принимает вид:

$$Q_p = \frac{19,86 \cdot 10^{-20}}{\lambda}, \quad [\text{Дж}] \quad (2.19)$$

где λ – длина волны излучения, [мкм].

Зависимость энергии фотона от длины волны излучения $Q_p(\lambda)$ представлена на рис. 2.5.

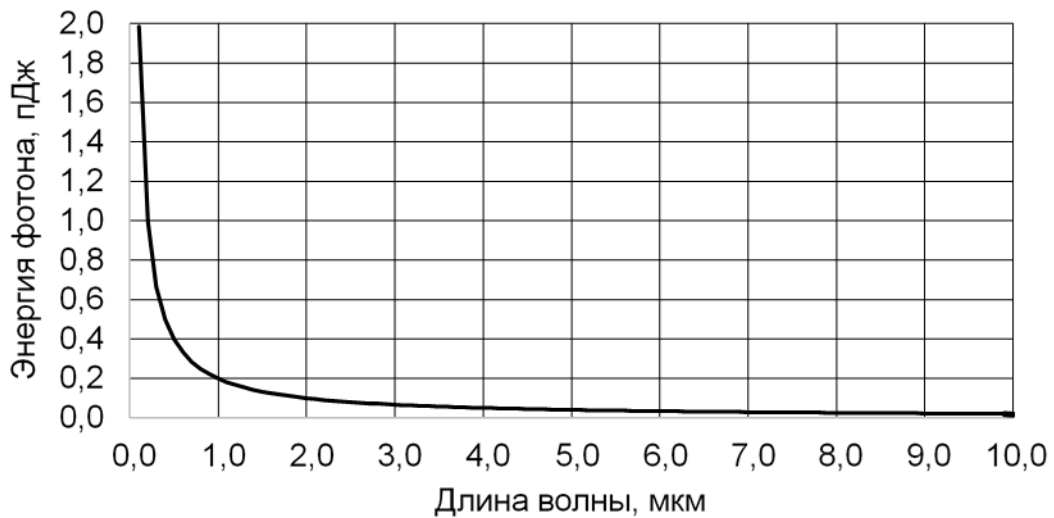


Рисунок 2.5 – Зависимость энергии фотона от длины волны излучения

Поток фотонов Φ_p (photon flux) – это физическая величина, определяемая отношением числа фотонов dN_p , излучённых, переданных или принятых за малый интервал времени, к этому интервалу dt [18]:

$$\Phi_p = \frac{dN_p}{dt} \left[\frac{\text{ФОТОН}}{\text{с}} \right]. \quad (2.20)$$

Фотонная светимость M_p – физическая величина, определяемая отношением потока фотонов $d\Phi_p$ исходящего от малого участка поверхности, содержащего рассматриваемую точку, к площади этого участка dA_1 :

$$M_p = \frac{d\Phi_p}{dA_1} \left[\frac{\text{ФОТОН}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right]. \quad (2.21)$$

Спектральные плотности фотонных величин определяются согласно выражению (2.1) [18].

Фотонная сила излучения I_p (photon intensity) – это физическая величина, определяемая отношением потока фотонов $d\Phi_p$, исходящего от источника и распространяющегося внутри элементарного телесного угла, содержащего данное направление, к этому телесному углу $d\Omega$ [18]:

$$I_p = \frac{d\Phi_p}{d\Omega} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{с} \cdot \text{ср}} \right]. \quad (2.22)$$

Фотонная яркость L_p (photon radiance) – это физическая величина, определяемая отношением фотонного потока, проходящего в рассматриваемом направлении в пределах малого телесного угла $d\Omega$ через участок поверхности dA , к произведению этого телесного угла, площади участка и косинуса угла θ между рассматриваемым направлением и нормалью к участку dA [18].

Фотонную яркость определяют по формуле [18]:

$$L_p = \frac{d^2\Phi_p}{dA_1 \cos \theta d\Omega} = \frac{d^2\Phi_p}{d^2G} = \frac{dI_p}{dA_1 \cos \theta} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}} \right]. \quad (2.23)$$

Фотонная облучённость (в точке поверхности) E_p (photon irradiance) – это физическая величина, определяемая отношением потока фотонов $d\Phi_p$, падающего на элемент поверхности, содержащий рассматриваемую точку, к площади этого элемента dA_2 :

$$E_p = \frac{d\Phi_p}{dA_2} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right]. \quad (2.24)$$

Приведённый перечень фотонных величин не является исчерпывающим. Более полный набор приведён в ГОСТ Р 70973—2023 [18].

2.6 Редуцированные величины

В ряде практических случаях используются редуцированные фотометрические величины (обозначение - X_r), оценивающие оптическое излучение по степени его воздействия на некоторый приёмник [18,12]. При этом энергетические и редуцированные величины связаны соотношением [18]:

$$X_r = K \int_0^{\infty} X_{e,\lambda}(\lambda) S'(\lambda) d\lambda , \quad (2.25)$$

где K – переводной множитель от единиц энергетических величин к единицам, применяемым в данной системе редуцированных величин; $S'(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность реального или модельного приёмника, которая определяет меру его реакции на излучение той или иной длины волны.

2.7 Световые величины

Световые величины оценивают оптическое излучение по его действию на человеческий глаз.

Глаз является совершенным мозаичным приёмником оптического излучения в спектральном диапазоне 0,38–0,78 мкм. Сетчатка глаза (толщиной 0,2 мм) состоит из трех слоёв различно специализированных клеток зрительного нерва – нейронов. Излучение, пройдя глазные среды и минуя третий и второй слои нейронов, достигает первого слоя. Каждый нейрон первого слоя заканчивается одним или несколькими светочувствительными элементами, называемыми палочками и колбочками.

Светочувствительные вещества палочек и колбочек диссоциируют при поглощении света. Образовавшиеся при диссоциации ионы вызывают импульсы тока в нервных клетках, поступающие в мозг человека.

Световая величина X_v – физическая величина, образованная по формуле редуцированных величин (2.25) с учётом относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения [18].

Световую величину определяют по формуле [18]:

$$X_v = K_v \int_0^{\infty} X_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda , \quad (2.26)$$

где $K_v = 683$ лм/Вт – переводной множитель от энергетических величин к световым; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения, определяемая по ГОСТ 8.332–3013 [20].

Физический смысл величины $K_v = 683$ лм/Вт – максимальное значение спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения.

Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$ [20] определяет эффективность преобразования глазом энергии излучения в зрительное ощущение.

На рисунке 2.6 и в таблице 2.3 приведены зависимости спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$ и для сумеречного зрения $V'(\lambda)$

Переводной множитель $K_v = 683 \text{ лм/Вт}$ соответствует максимальной спектральной световой эффективности монохроматического излучения при длине волны $\lambda_{max} = 0,555 \text{ мкм}$.

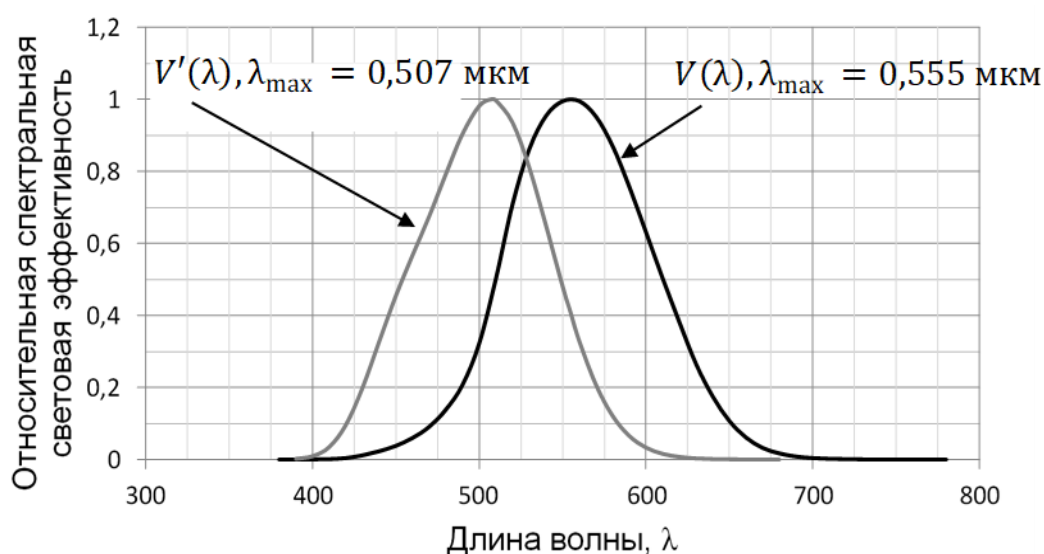


Рисунок 2.6 – Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$ и для сумеречного зрения $V'(\lambda)$

В соответствии с определением [18, 19], световая энергия Q_v – физическая величина, образованная по формуле редуцированных величин (2.26), измеряемая в лм·с:

$$Q_v = 683 \int_0^{\infty} Q_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.27)$$

где $Q_{e,\lambda}$ – распределение спектральной плотности энергии излучения (2.7).

Световой поток Φ_v – это величина, образуемая от потока излучения $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя МКО.

Для дневного зрения

$$\Phi_v = 683 \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.28)$$

где $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности потока излучения (2.9).

Названия, определения и физический смысл других световых величин и их спектральных плотностей регламентированы ГОСТ 8.654-2016 [19] и ГОСТ Р 70973-2023 [18]. Они аналогичны рассмотренным ранее энергетическим величинам. Соотношения для ряда световых величин приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.3 Относительные спектральные эффективности излучения $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$ по ГОСТ 8.332–3013 [20]

Длина волны λ , нм	Дневное зрение $V(\lambda)$	Ночное зрение $V'(\lambda)$	Длина волны λ , нм	Дневное зрение $V(\lambda)$	Ночное зрение $V'(\lambda)$
380	0,0000	0,000589	590	0,757	0,0685
390	0,0001	0,002209	600	0,631	0,03315
400	0,0004	0,00929	610	0,503	0,01593
410	0,0012	0,03489	620	0,381	0,00737
420	0,0040	0,0966	630	0,265	0,003335
430	0,0116	0,1998	640	0,175	0,001497
440	0,023	0,3281	650	0,107	0,000677
450	0,038	0,455	660	0,061	0,0003129
460	0,060	0,567	670	0,032	0,0001480
470	0,091	0,676	680	0,017	0,0000715
480	0,139	0,793	690	0,0082	0,00003533
490	0,208	0,904	700	0,0041	0,00001780
500	0,323	0,982	710	0,0021	0,00000914
510	0,503	0,997	720	0,00105	0,00000478
520	0,710	0,935	730	0,00052	0,000002546
530	0,862	0,811	740	0,00025	0,000001379
540	0,954	0,650	750	0,00012	0,000000760
550	0,995	0,481	760	0,00006	0,000000428
560	0,995	0,3288	770	0,00003	0,000000241
570	0,952	0,2076	780	0,000015	0,000000139
580	0,870	0,1212			

Единицей силы света является кандела (кд), которая в международной системе единиц является основной единицей.

Согласно ГОСТ 8.417—2002 [21], кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср (16 Генеральная конференция по мерам и весам (1979 г.). Резолюция 3).

Частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц соответствует длина волны $\lambda = 555$ нм.

Таблица 2.4 Световые величины

Термин	Определяющее выражение	Основная единица измерения	
Световой поток	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	лм (люмен)	(2.29)
Светимость	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA_1}$	лм/м ²	(2.30)
Сила света	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} = \int_{A_1} L_v \cos \theta dA_1$	кд (кандела)	(2.31)
Яркость	$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d^2G} = \frac{d^2\Phi_v}{dA_1 \cos \theta d\Omega} = \frac{dI_v}{dA_1 \cos \theta}$	кд/м ²	(2.32)
Освещённость	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA_2}$	лк (люкс)	(2.33)
Экспозиция	$H_v = \int_{\Delta t} E_v(t) dt$	лк·с	(2.34)

Спектральные плотности световых величин определяются в соответствии с выражением (2.1). В таблице 2.5 приведён ряд выражений спектральных плотностей световых величин.

Таблица 2.5 Спектральные плотности световых величин

Термин	Определяющее выражение	Основная единица измерения	
Спектральная плотность световой энергии	$Q_{v\lambda} = \frac{dQ_v}{d\lambda}$	лм · с/мкм	(2.35)
Спектральная плотность светового потока	$\Phi_{v\lambda} = \frac{d\Phi_v}{d\lambda}$	лм/мкм	(2.36)
Спектральная плотность светимости	$M_{v\lambda} = \frac{dM_v}{d\lambda}$	лм/(м ² · мкм)	(2.37)
Спектральная плотность силы света	$I_{v\lambda} = \frac{dI_v}{d\lambda}$	кд/мкм	(2.38)
Спектральная плотность яркости	$L_{v\lambda} = \frac{dL_v}{d\lambda}$	кд/(м ² · мкм)	(2.39)
Спектральная плотность освещённости	$E_{v\lambda} = \frac{dE_v}{d\lambda}$	лк/мкм	(2.40)
Спектральная плотность экспозиции	$H_{v\lambda} = \frac{dH_v}{d\lambda}$	лк·с/мкм	(2.41)

Приведённый перечень световых величин не является исчерпывающим. Более полный набор приведён в ГОСТ Р 70973—2023 [18].

2.8 Распределения спектральных плотностей энергетических и световых величин

Относительные распределения спектральных плотностей энергетических величин по длинам волн обозначаются в соответствии с выражением (2.3) строчными буквами. Максимальные значения спектральных плотностей соответствующих величин обозначены в соответствии с выражением (2.3): $Q_{e,\lambda,\max}$, $\Phi_{e,\lambda,\max}$, $M_{e,\lambda,\max}$, $I_{e,\lambda,\max}$, $L_{e,\lambda,\max}$, $E_{e,\lambda,\max}$, $H_{e,\lambda,\max}$.

Относительное распределение спектральной плотности энергии излучения:

$$q_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{Q_{e,\lambda}(\lambda)}{Q_{e,\lambda \text{ макс}}}, \quad (2.42)$$

где $Q_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности энергии излучения.

Относительное распределение спектральной плотности потока излучения:

$$\varphi_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{\Phi_{e,\lambda}(\lambda)}{\Phi_{e,\lambda \text{ макс}}}, \quad (2.43)$$

где $\Phi_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности потока излучения.

Относительное распределение спектральной плотности энергетической светимости излучения:

$$m_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{M_{e,\lambda}(\lambda)}{M_{e,\lambda \text{ макс}}}, \quad (2.44)$$

где $M_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости излучения.

Относительное распределение спектральной плотности силы излучения:

$$i_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{I_{e,\lambda}(\lambda)}{I_{e,\lambda \text{ макс}}}, \quad (2.45)$$

где $I_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности силы излучения.

Относительное распределение спектральной плотности энергетической яркости излучения:

$$l_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{L_{e,\lambda}(\lambda)}{L_{e,\lambda \text{ макс}}}, \quad (2.46)$$

где $L_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости излучения.

Приведённый перечень относительных распределений спектральной плотности энергетических величин не является исчерпывающим. Для других величин выражения для относительных распределений спектральной плотности могут быть получены аналогично.

2.9 Взаимосвязь световых и энергетических величин, коэффициент использования глазом излучения источника

Световые и энергетические величины связаны между собой посредством функции спектральной световой эффективности монохроматического излучения $V(\lambda)$ (рис. 1.5). Из выражений (2.28) и (2.36) следует, что световой поток

$$\Phi_v = 683 \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda = K_v \Phi_{e,\text{эфф},\Gamma} , \quad (2.47)$$

где $\Phi_{e,\text{эфф},\Gamma}$ – эффективный для глаза поток излучения от данного источника, измеряется в ваттах эффективных:

$$\Phi_{e,\text{эфф},\Gamma} = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda . \quad (2.48)$$

КПД глаза или коэффициентом использования глазом излучения данного источника называется величина, которая определяется формулой:

$$\kappa_{\Gamma} = \frac{\Phi_{e,\text{эфф},\Gamma}}{\Phi_e} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\Phi_{e,\text{эфф},\Gamma}}{\Phi_e} . \quad (2.49)$$

Из выражений (2.47) и (2.49) следует, что связь светового потока и потока излучения имеет вид:

$$\Phi_v = 683 \Phi_{e,\text{эфф},\Gamma} = 683 \kappa_{\Gamma} \Phi_e = 683 \kappa_{\Gamma} \Phi_e = k_v \Phi_e , \quad (2.50)$$

где $k_v = 683 \kappa_{\Gamma}$ – световая отдача источника излучения, лм/Вт.

Аналогичные соотношения можно записать для других соответствующих пар энергетических и световых величин.

На рисунке 2.7 представлены графики для расчёта коэффициента использования глазом излучения лампы накаливания.

Согласно выражению (2.49), КПД глаза κ_{Γ} равен отношению площадей под графиками $\varphi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda)$ и $\varphi_{e\lambda}(\lambda)$.

Расчёт показывает, что КПД глаза по отношению к лампе накаливания составляет $\kappa_{\Gamma} = 0,025$, что говорит о низкой эффективности лампы накаливания как источника света.

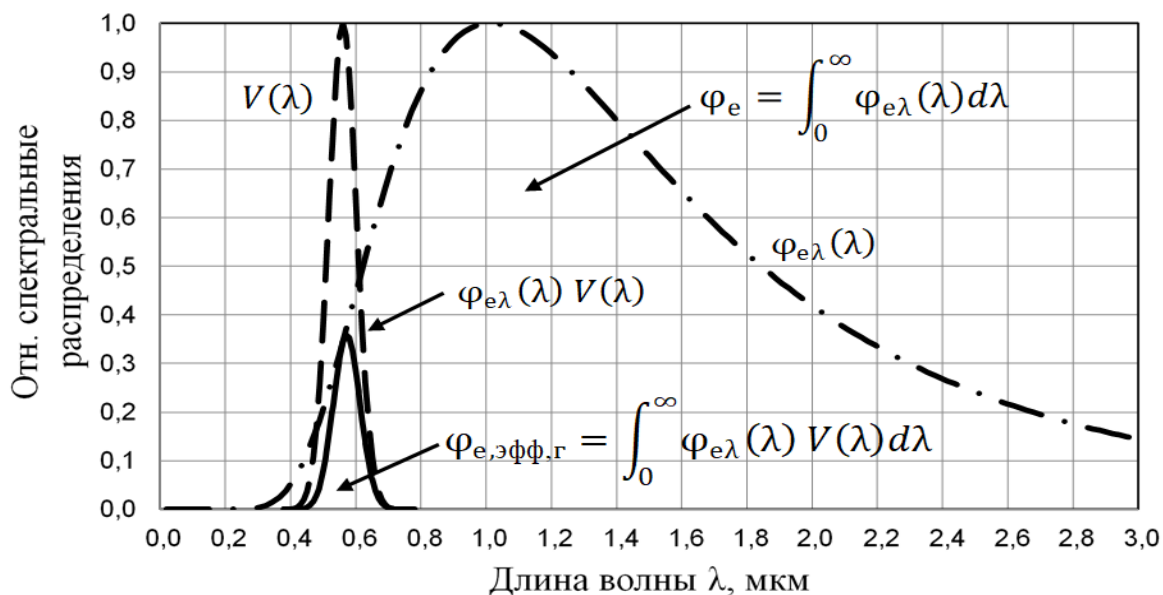


Рисунок 2.7 – К расчёту коэффициента использования глазом излучения лампы накаливания:

относительное распределение спектральной плотности энергетической светимости лампы накаливания $\phi_{e\lambda}(\lambda)$ с цветовой температурой $T = 2856$ К, относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$, их произведение $\phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda)$

Вопросы по 2 разделу

1. Что такое оптическое излучение?
2. Каковы критерии разделения оптического излучения на спектральные диапазоны?
3. Какие оптические материалы используются для изготовления фотоприёмников, работающих в разных спектральных интервалах?
4. В каких спектральных диапазонах работают тепловизоры и каким температурам объектов они соответствуют?
5. Чем отличаются световые величины физической оптики от энергетических?
6. Каков физический смысл спектральной плотности величин физической оптики?
7. Как связана спектральная плотность величины с самой величиной?
8. Чему численно равна физическая величина в заданном спектральном интервале (графическая интерпретация)?
9. Как определяется геометрический фактор пучка излучения для узкого пучка?

10. При определении какой физической величины используется понятие геометрического фактора пучка?
11. Какая величина характеризует скорость переноса энергии оптического излучения?
12. Что характеризует энергетическая светимость?
13. Какие физические величины характеризуют поверхностную плотность потока излучения?
14. В каких случаях используются фотонные физические величины?
15. Как энергия фотона зависит от длины волны излучения?
16. В чем необходимость использования редуцированных физических величин? Укажите их связь с энергетическими величинами.
17. Каков физический смысл переводного множителя от единиц энергетических величин к световым?
18. Что определяет относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения?
19. Какая единица световой величины является основной в международной системе единиц?
20. Какая функция используется для связи энергетических величин со световыми?
21. Поясните графическую интерпретацию отношения потоков излучения, которые используются для расчёта коэффициента использования глазом излучения источника.

3 ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ МОДЕЛИ

3.1 Основные законы теплового излучения

Рассмотрим основные законы излучения, которым подчиняется тепловое излучение фона, помех и внешних источников. Излучение газоразрядных, люминесцентных, светодиодных источников, а также лазеров описывается другими законами.

В 1860 г. Густав Роберт Кирхгоф установил, что отношение излучательной способности любого тела к его поглотительной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной длины волны и не зависит от их формы и химической природы. Другими словами, чем больше тело поглощает, тем больше оно излучает.

В соответствии с законом Кирхгофа отношение спектральной плотности энергетической светимости тела и его спектрального коэффициента поглощения на той же длине волны не зависит от природы тела и является универсальной функцией, определяемой длиной волны излучения и температурой тела [1, 9, 11]:

$$\frac{M_{e\lambda}(\lambda, T)}{\alpha_{\lambda}(\lambda, T)} = f(\lambda, T), \quad (3.1)$$

где $M_{e\lambda}(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической светимости при длине волны λ и при температуре T , $\alpha_{\lambda}(\lambda, T)$ – спектральный коэффициент поглощения при длине волны λ и при температуре T .

Если тело поглощает все падающее на него излучение независимо от длины волны, направления падения и состояния поляризации излучения, ($\alpha(\lambda)_T = 1$), то оно называется **абсолютно черным телом (АЧТ)**. Для АЧТ справедливо соотношение:

$$f(\lambda, T) = M_{e\lambda}^0(\lambda, T), \quad (3.2)$$

где $M_{e\lambda}^0(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической светимости АЧТ при длине волны λ и при температуре T .

АЧТ – физическая абстракция, у реальных тел $\alpha(\lambda)_T < 1$, следовательно:

$$M_{e\lambda}(\lambda, T) = M_{e\lambda}^0(\lambda, T) \alpha_{\lambda}(\lambda, T). \quad (3.3)$$

В 1900 г. Макс Планк вывел формулу, определяющую зависимость спектральной плотности энергетической светимости АЧТ от длины волны излучения. Вывод формул основан на представлении, что тепловое излучение генерируется в процессе простого гармонического колебания линейных атомных осцилляторов не непрерывным образом, а дискретными квантами, энергия Q_p которых является функцией частоты излучения ν [9, 18]:

$$Q_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad [\text{Дж}] \quad (3.4)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [Дж · с]; ν – частота, [Гц]; c – скорость электромагнитного излучения в вакууме, $c \approx 2,998 \cdot 10^8$, [м/с]; λ – длина волны излучения [м].

Закон Планка выражает зависимость величины спектральной плотности энергетической светимости ЧТ $M_{e\lambda}^0(\lambda, T)$ от длины волны излучения и температуры:

$$M_{e\lambda}^0(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{м}) \quad (3.5)$$

где λ – длина волны излучения в метрах; T – абсолютная температура АЧТ в кельвинах; C_1 и C_2 – постоянные $C_1 = 3,74150 \cdot 10^{-16}$ Вт · м² $C_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$ м · К.

Длину волны в практических расчётах, как правило, выражают в микрометрах, поэтому выражение (3.5) можно представить в следующем виде:

$$M_{e\lambda}^0(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм}) \quad (3.6)$$

где λ – длина волны излучения в метрах; T – абсолютная температура АЧТ в кельвинах; C_1 и C_2 – постоянные ($C_1=3,74150 \cdot 10^8$ Вт · м⁻² · мкм⁴, $C_2 = 1,43879 \cdot 10^4$, мкм · К.

На рисунке 3.1 показан вид зависимостей $M_{e\lambda}^0(\lambda, T)$ для ряда значений температуры, близких к температуре окружающей среды.

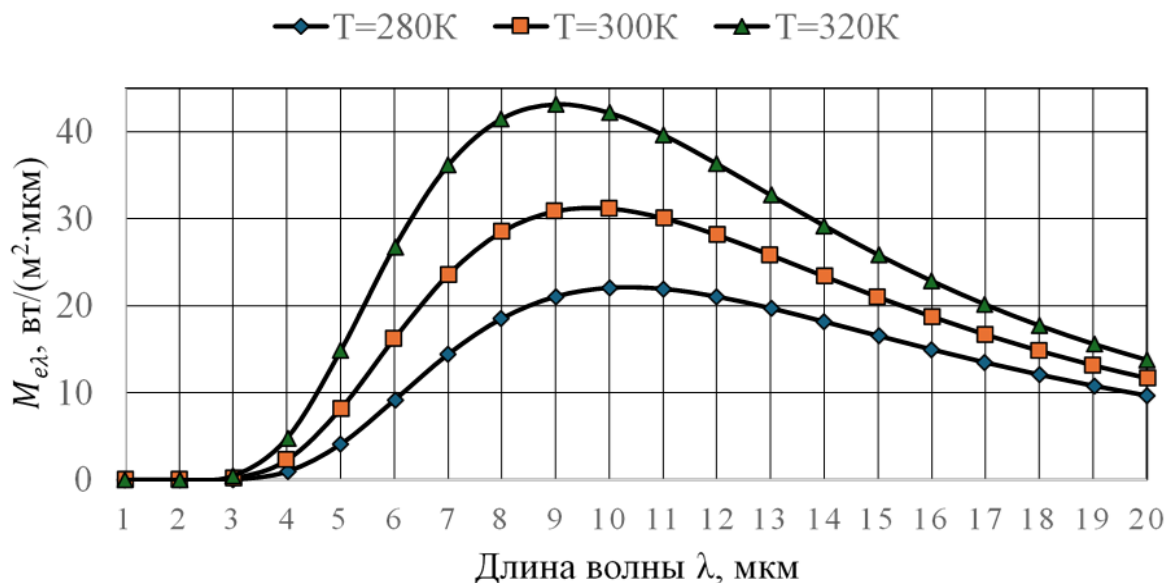


Рисунок 3.1 – Распределение спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела в зависимости от длины волны для ряда значений температуры близких к температуре окружающей среды $T = 320\text{K}$ (57°C), $T = 300\text{K}$ (27°C), $T = 280\text{K}$ (7°C)

Закон Стефана–Больцмана определяет интегральное значение энергетической светимости ЧТ. Его можно получить, взяв интеграл по функции Планка (3.5) во всем интервале длин волн:

$$M_e^0 = \int_0^{\infty} M_{e\lambda}^{\text{ЧТ}}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (3.7)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К⁴).

Абсолютно чёрное тело всегда окружено окружающей средой, которая создаёт излучение фона. С учётом излучения окружающей среды избыточная энергетическая светимость абсолютно чёрного тела в установившемся режиме равна

$$\Delta M_e^0 = \sigma(T^4 - T_{\text{окр}}^4), \quad (3.8)$$

где T – температура абсолютно чёрного тела; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Закон смещения Вина определяет длину волны λ_{max} , при которой имеет место максимальная спектральная плотность энергетической светимости, т.е. максимум функции Планка (3.5).

Взяв производную функции Планка (3.5) по длине волны и приравняв её нулю, получаем уравнение, которое даёт следующее решение:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-6}}{T}, \quad [\text{м}] \quad \text{или} \quad \lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad [\text{мкм}], \quad (3.9)$$

где λ_{\max} – длина волны максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела при заданной температуре T , К.

Если в формулу Планка (3.5) подставить λ_{\max} из закона смещения Вина (3.9), то получим значение максимальной спектральной плотности энергетической светимости ЧТ:

$$M_{e\lambda_{\max}}^0 = C'_\lambda \cdot T^5, \quad [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм}).] \quad (3.10)$$

где C'_λ – постоянная, $C'_\lambda = 1,286 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{К}^5)$.

Из рис. 3.1 следует, что поток излучения абсолютно чёрного тела быстро возрастает с ростом температуры, при этом максимум спектральной плотности энергетической светимости с увеличением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

Из выражений (3.5) и (3.10) следует, что относительное спектральное распределение энергетической светимости абсолютно чёрного тела:

$$m_{e\lambda}^0(\lambda, T) = \frac{M_{e\lambda}^0(\lambda, T)}{M_{e\lambda_{\max}}^0} = \frac{2,9082 \cdot 10^{19}}{(\lambda \cdot T)^5} \cdot \left(e^{\frac{14388}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (3.11)$$

здесь λ – длина волны в мкм.

Если ввести следующие обозначения:

$$x = \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}, \quad y = \frac{M_{e\lambda}^0(\lambda, T)}{M_{e\lambda_{\max}}^0}, \quad (3.12)$$

то получаем выражение для нормированной (приведённой) функции Планка [11, 12]:

$$y = 142,32 \cdot x^{-5} \cdot \left(e^{\frac{4,9651}{x}} - 1 \right)^{-1}. \quad (3.13)$$

Зависимость $y(x)$ приведена на 3.2.

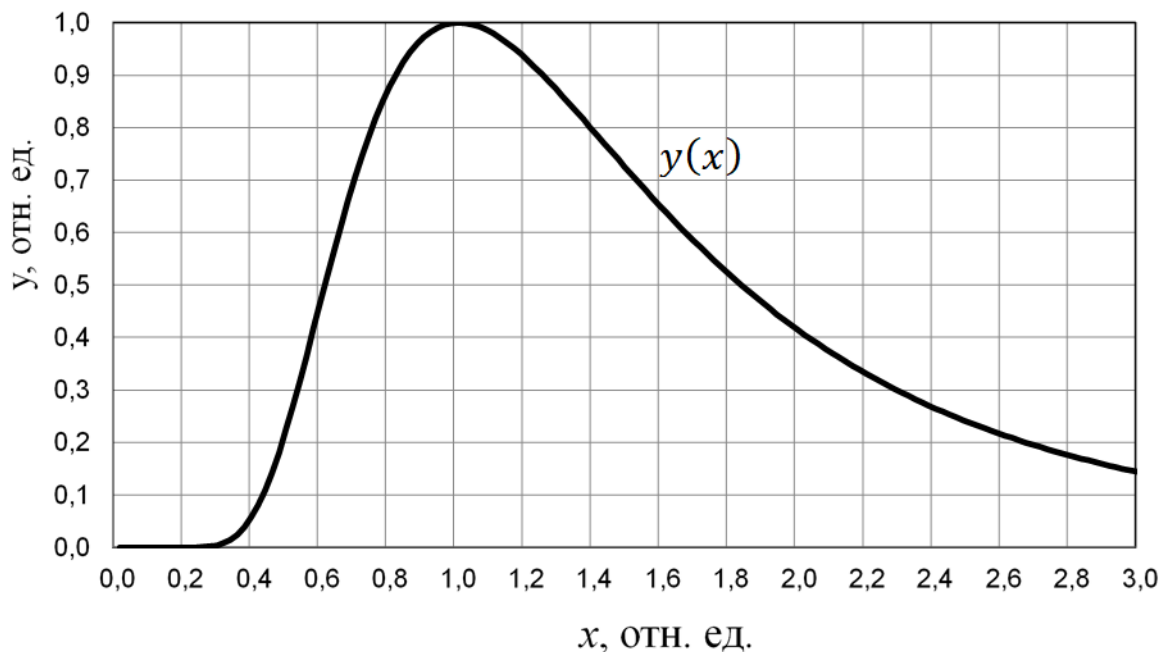


Рисунок 3.2 – Нормированная (приведённая) функция Планка

Формулы, описывающие излучение абсолютно чёрного тела, используются в энергетических расчётах опико-электронных приборов.

3.2 Излучение нечёрных тел

Чёрное тело – не существующий реально источник излучения. Для реальных тел в соответствии с законом Кирхгофа:

$$M_{e,\lambda,T}(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) M_{e,\lambda,T}^0(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) M_{e,\lambda,T}^0(\lambda, T), \quad (3.14)$$

где $\varepsilon(\lambda, T)$ – коэффициент теплового излучения тела ($\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$) [9].

Если коэффициент теплового излучения тела не зависит от длины волны излучения ($\varepsilon(\lambda) = \text{const}$), то такое тело называется серым, а если коэффициент теплового излучения тела зависит от длины волны излучения ($\varepsilon(\lambda) \neq \text{const}$), то такой излучатель называется селективным (рис. 3.3).

Значения $\varepsilon(\lambda, T)$ для различных тел приведены в литературе [22, 23].

На рисунке 3.3 показан вид возможных зависимостей спектральных характеристик коэффициентов теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ (а) и спектральных характеристик энергетической светимости $M_{e,\lambda}(\lambda)$ этих излучателей (б): абсолютно чёрное тело ($\varepsilon(\lambda) = 1$), серое тело ($\varepsilon(\lambda) = 0,8$), селективный излучатель ($\varepsilon(\lambda) \neq \text{const}$), зеркало.

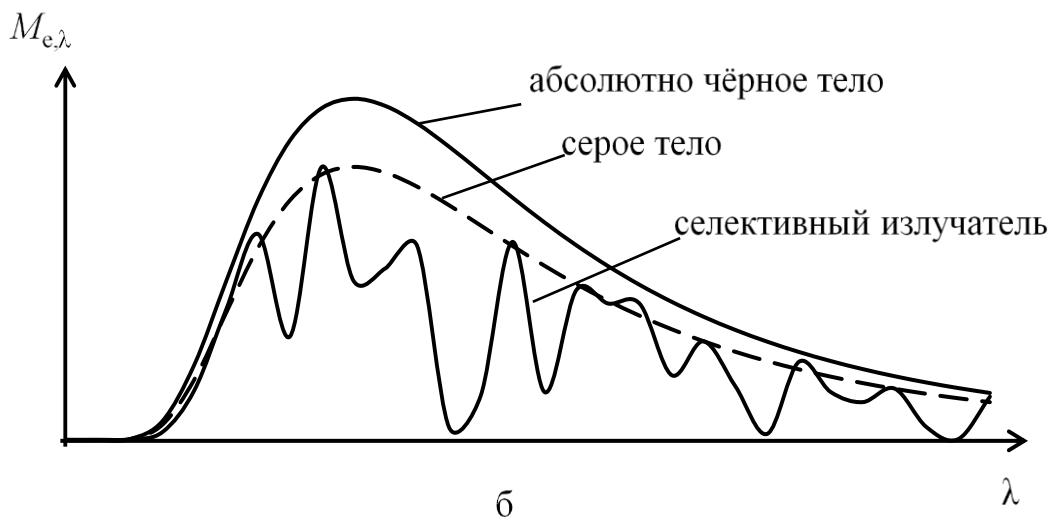
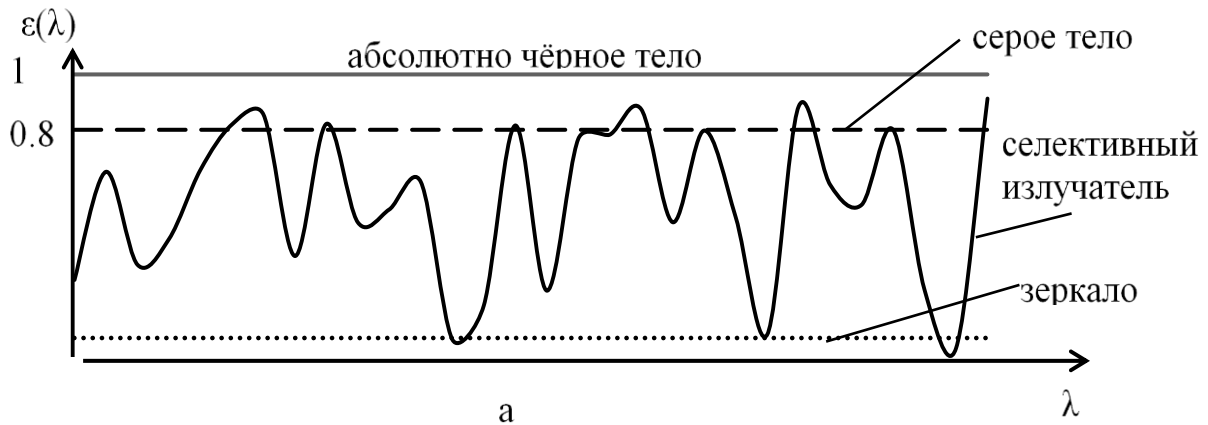


Рисунок 3.3 – Зависимости спектральных характеристик коэффициентов теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ (а) и спектральных характеристик энергетической светимости $M_{e,\lambda}(\lambda)$ (б) тех же излучателей

В соответствии с законом сохранения энергии для любого тела

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1, \quad (3.15)$$

где $\rho(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ – спектральные характеристики коэффициентов отражения и пропускания соответственно. Поэтому для непрозрачных тел с $\tau(\lambda) = 0$ коэффициент теплового излучения $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)$, то есть тела с хорошей отражательной способностью (например, зеркала) являются плохими излучателями, и наоборот (рис.3.3).

3.3 Относительные распределения спектральной плотности оптических величин источников излучения

Относительные распределения спектральной плотности оптических величин источников излучения часто используются для их описания в нормативных, информационных и рекламных документах.

Энергетические величины, характеризующие излучение одного источника, распределены по спектру одинаково и отличаются только постоянными множителями, равными максимальным значениям спектральных плотностей соответствующих величин, которые в соответствии с выражением (2.3) обозначены: $Q_{e,\lambda,\max}$, $\Phi_{e,\lambda,\max}$, $M_{e,\lambda,\max}$, $I_{e,\lambda,\max}$, $L_{e,\lambda,\max}$, $E_{e,\lambda,\max}$, $H_{e,\lambda,\max}$.

Следовательно, относительные распределения спектральных плотностей энергетических величин, характеризующих излучение одного источника [11]:

$$q_{e,\lambda}(\lambda) = \varphi_{e,\lambda}(\lambda) = m_{e,\lambda}(\lambda) = i_{e,\lambda}(\lambda) = l_{e,\lambda}(\lambda). \quad (3.16)$$

Аналогичное равенство справедливо для всех световых и других редуцированных величин [11]:

$$q_{v,\lambda}(\lambda) = \varphi_{v,\lambda}(\lambda) = m_{v,\lambda}(\lambda) = i_{v,\lambda}(\lambda) = l_{v,\lambda}(\lambda). \quad (3.17)$$

Если при расчёте можно пренебречь влиянием поглощающих сред между источником оптического излучения и поверхностью, на которую падает это излучение, то выражения (3.16) и (3.17) можно дополнить характеристиками излучения, падающего на объект ($e_{e,\lambda}(\lambda)$, $h_{e,\lambda}(\lambda)$, $e_{v,\lambda}(\lambda)$, $h_{v,\lambda}(\lambda)$):

$$q_{e,\lambda}(\lambda) = \varphi_{e,\lambda}(\lambda) = m_{e,\lambda}(\lambda) = i_{e,\lambda}(\lambda) = l_{e,\lambda}(\lambda) = e_{e,\lambda}(\lambda) = h_{e,\lambda}(\lambda). \quad (3.18)$$

$$q_{v,\lambda}(\lambda) = \varphi_{v,\lambda}(\lambda) = m_{v,\lambda}(\lambda) = i_{v,\lambda}(\lambda) = l_{v,\lambda}(\lambda) = e_{v,\lambda}(\lambda) = h_{v,\lambda}(\lambda). \quad (3.19)$$

На рис. 3.4 представлено относительное распределение спектральной плотности энергетических величин $x_{e,\lambda}(\lambda)$, характеризующие излучение абсолютно чёрного тела с температурой $T = 600 \text{ K}$, $\lambda_{\max} = 4,82 \text{ мкм}$.

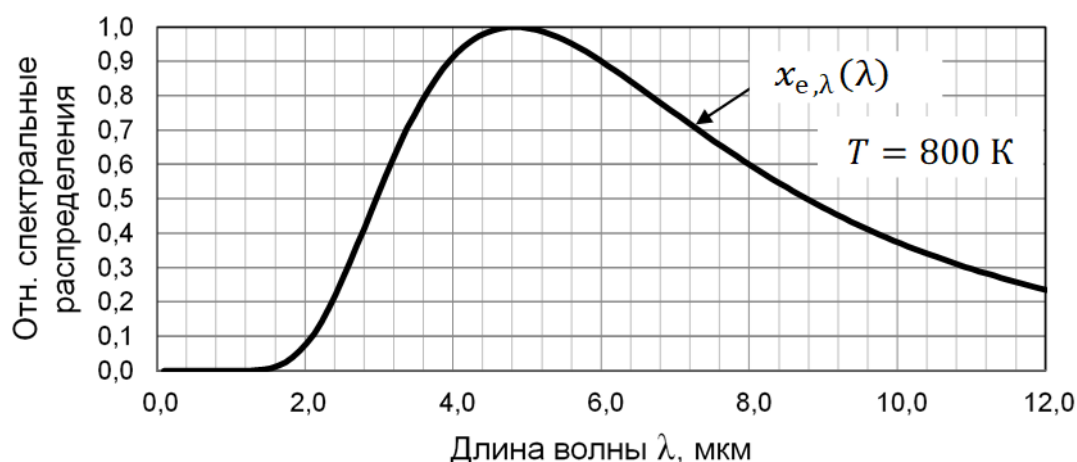


Рисунок 3.4 – Относительные распределения спектральных плотностей энергетических величин характеризующие излучение абсолютно чёрного

тела с температурой $T = 600 \text{ К}$, $\lambda_{\text{max}} = 4,82 \text{ мкм}$:

$$x_{e,\lambda}(\lambda) = q_{e,\lambda}(\lambda) = \varphi_{e,\lambda}(\lambda) = m_{e,\lambda}(\lambda) = i_{e,\lambda}(\lambda) = l_{e,\lambda}(\lambda)$$

В энергетических расчётах оптико-электронных приборов широко используются относительные распределения спектральных плотностей оптических величин.

3.4 Пространственное распределение параметров излучения тепловых источников

Пространственное распределение параметров излучения источников характеризуется индикатрисами их излучения.

Индикатриса (энергетической, фотонной, световой) величины $X(\varphi, \theta)$ – это угловое распределение (энергетической, фотонной, световой) величины в пространстве или в плоскости [18].

Индикатрисы излучения реальных источников имеют достаточно сложный характер.

В практических расчётах для многих источников индикатриса их излучения принимается соответствующей закону Ламберта.

В 1760 году Иоганн Генрих Ламберт предложил для идеальной отражающей рассеивающей поверхности как вторичного источника оптического излучения принять яркость постоянной во всех направлениях (рис. 3.5а). Закон Ламберта для энергетической яркости и яркости имеет следующий вид:

$$L_e = const, \quad L_v = const \quad (3.20)$$

Такому характеру отражения соответствуют шероховатые поверхности гипса, окиси магния, сернокислого бария, а также некоторые типы молочных стёкол, которые используются в качестве эталонных рассеивающих поверхностей.

Следствием из закона Ламберта является угловое распределение изменения силы излучения источника в зависимости от угла наблюдения:

$$I_{e,\theta} = I_{e,0} \cos \theta, \quad (3.21)$$

где $I_{e,0}$ и $I_{e,\theta}$ - сила излучения источника по нормали к излучающей поверхности и под углом θ к нормали соответственно (рис. 3.5) [9, 11, 17].

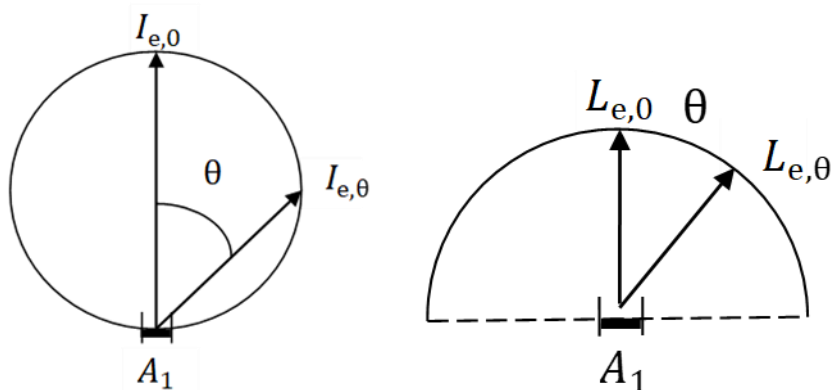


Рисунок 3.5 – Пространственное распределение параметров излучения ламбертовского источника

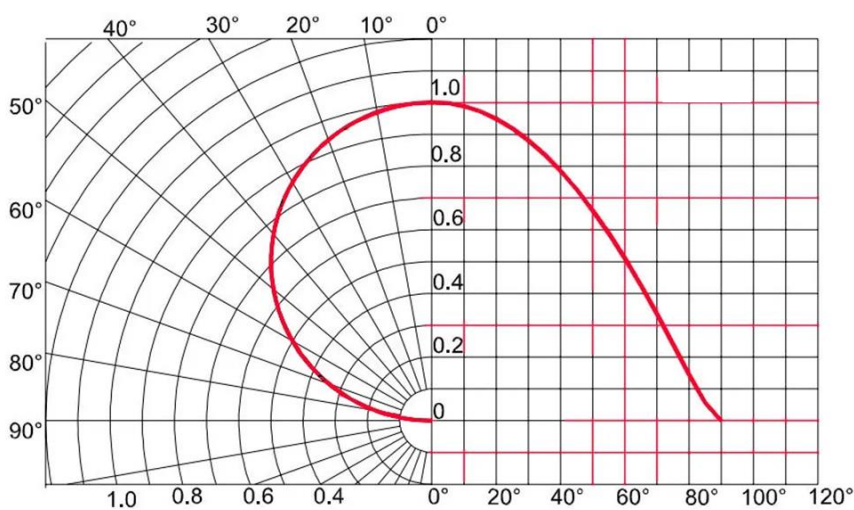


Рисунок 3.6 – Индикатриса силы излучения $I_e(\theta)$ идеального (ламбертовского) источника в полярных координатах и в прямоугольных

Для спектральной плотности силы излучения также справедливо соотношение:

$$I_{e,\lambda,\theta} = I_{e,\lambda,0} \cos \theta, \quad (3.22)$$

где $I_{e,\lambda,0}$ и $I_{e,\lambda,\theta}$ – спектральные плотности силы излучения источника по нормали к излучающей поверхности и под углом θ к нормали.

Из определений энергетической яркости и энергетической силы света для малого источника площадью A_1 следует:

$$L_{e,\lambda,\theta} = \frac{I_{e,\lambda,\theta}}{A_1 \cos \theta}, \quad (3.23)$$

где $L_{e,\lambda,\theta}$ и $I_{e,\lambda,\theta}$ – спектральные плотности энергетической яркости и силы излучения источника, A_1 – площадь малого источника.

Из выражений (3.22) и (3.23) следует, что для ламбертовского источника пространственное распределение яркости имеет следующий вид:

$$L_{e,\lambda,\theta}(\theta) = \frac{I_{e,\lambda,\theta}}{A_1 \cdot \cos \theta} = \frac{I_{e,\lambda,0}}{A_1} = L_{e,\lambda} = \text{const}, \quad (3.24)$$

Выражение, аналогичное (3.24), может быть записано для интегральных величин:

$$L_{e,\theta}(\theta) = \frac{I_{e,\theta}}{A_1 \cdot \cos \theta} = \frac{I_{e,0}}{A_1} = L_e = \text{const}, \quad (3.25)$$

Используя соотношения (3.21) и (3.22) можно показать [9, 11], что для ламбертовского источника связь энергетической яркости и энергетической светимости имеет вид:

$$L_e = \frac{M_e}{\pi}, \quad (3.26)$$

где L_e и M_e – энергетическая яркость и энергетическая светимость указанного излучателя.

Для спектральных распределений указанных величин также справедливо соотношение:

$$L_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{M_{e\lambda}(\lambda)}{\pi}, \quad (3.27)$$

Строго согласно закону Ламберта излучает абсолютно чёрное тело, то есть идеальный источник.

Для абсолютно чёрного тела (ламбертовского излучателя) из соотношений (3.5) и (3.27) следует, что распределение спектральной плотности энергетической яркости по длинам волн:

$$L_{e,\lambda}^0(\lambda, T) = \frac{M_{e\lambda}^0(\lambda, T)}{\pi} = \frac{C_1}{\pi \lambda^5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1}. \quad (3.28)$$

Соотношения (3.20) (3.21) и (3.28) в полной мере справедливы только для абсолютно чёрного излучателя, то есть идеального излучателя. Однако их часто используют в приближённых расчётах параметров реальных источников излучения, в частности в тех случаях, когда пространственное распределение излучения источника не известно.

Модель пространственного распределения излучения, представленная на рис. 3.5, не всегда в достаточной мере отражает пространственное распределение излучения реальных источников.

Например, для шероховатых поверхностей относительная неизменность яркости ($L_{e,\lambda,\theta}(\theta) = \text{const}$) сохраняется в ограниченном диапазоне углов θ (для металлов – $0 \dots 40^\circ$, для диэлектриков – $0 \dots 60^\circ$).

Для ряда задач с достаточной степенью приближения пространственное распределение яркости шероховатой поверхности может быть принято в виде, представленном на рисунке 3.7.

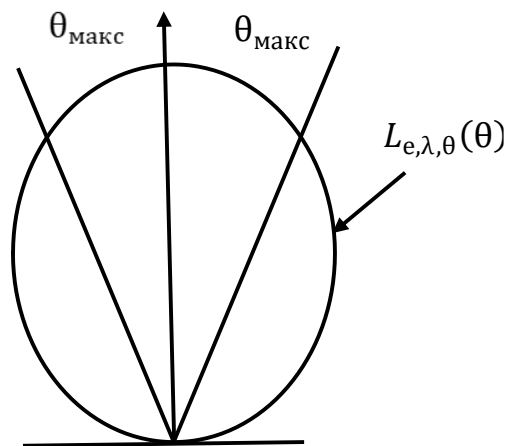


Рисунок 3.7 – Возможная модель пространственного распределения яркости $L_{e,\lambda,\theta}(\theta)$ излучения реальных источников

Для таких источников можно приближённо считать, что в пределах угла излучения $\theta_{\text{макс}}$ яркость постоянна ($L_{e,\lambda,\theta}(\theta) = \text{const}$), а за пределами этого угла яркость ($L_{e,\lambda,\theta}(\theta) = 0$) [11, 24, 25, 26]. Можно показать, что в

этом случае яркость источника излучения в пределах угла $\theta_{\text{макс}}$ можно найти из соотношения [24,25]:

$$L_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{M_{e\lambda}(\lambda)}{\pi \sin^2 \theta_{\text{макс}}}, \quad (3.29)$$

Модель пространственного распределения излучения источника согласно выражению (3.29) может приниматься при энергетическом расчёте оптико-электронного прибора с учётом её допустимости в зависимости от решаемой задачи.

3.5 Диапазон изменения спектральной плотности энергетической яркости тепловых источников излучения

Выражение (3.28) позволяет оценить диапазон изменения спектральной плотности энергетической яркости тепловых источников излучения

На рисунке 3.8 [27] приведены графики распределения спектральной плотности энергетической яркости $L_{e,\lambda}^0(\lambda, T)$, Вт см⁻²ср⁻¹мкм⁻¹ при различных значениях температуры абсолютно чёрного тела.

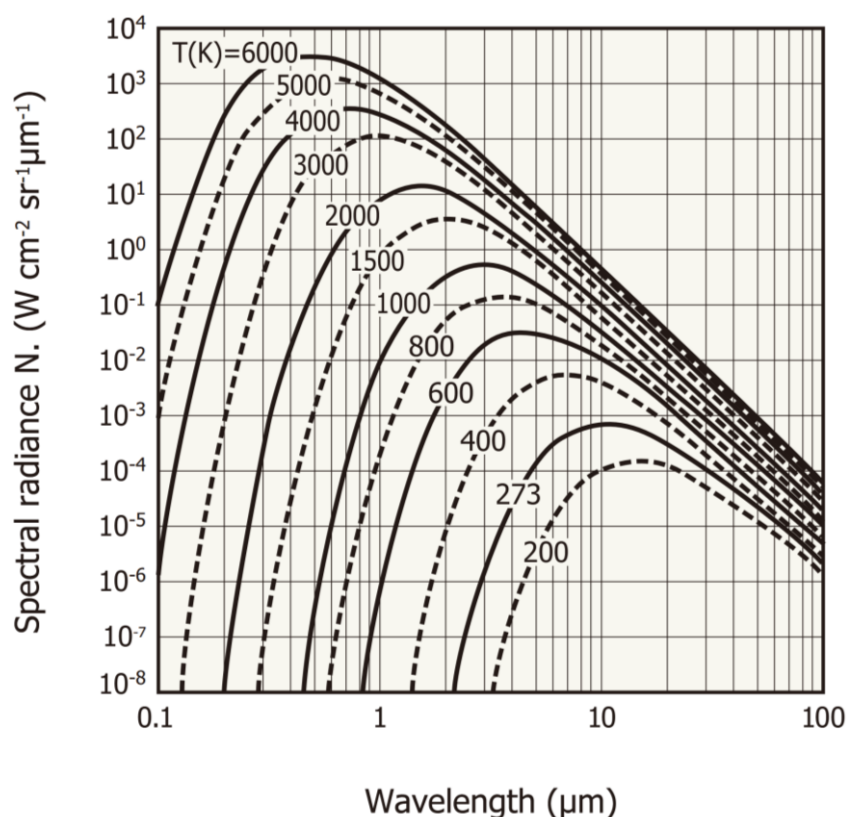


Рисунок 3.8 – Распределение спектральной плотности энергетической яркости по длине волны $L_{e,\lambda}^0(\lambda, T)$, Вт см⁻²ср⁻¹мкм⁻¹ при различных значениях температуры абсолютно чёрного тела [27]

Необходимо обратить внимание на размерность величин.

Графики на рисунке 3.8 представлены в логарифмическом масштабе, который позволяет оценить широкий диапазон изменения величин. Диапазон длин волн составляет от 0,1 до 100 мкм. Диапазон яркостей, представленных на рисунке 3.8, составляет 12 порядков.

3.6 Пространственное распределение излучения светодиодов

Параметры и характеристики инфракрасных и ультрафиолетовых светодиодов задаются в энергетических величинах. Параметры и характеристики светодиодов видимого диапазона, как правило, задаются в световых величинах.

Согласно ГОСТ Р 54814 — 2018 [28] пространственное распределение излучения светодиодов характеризуется параметром **угол излучения** (beam angle), то есть углом между двумя воображаемыми линиями, расположенными в плоскости, проходящей через оптическую ось источника света, так что эти линии проходят через центр передней части источника света и через точки, в которых сила света составляет 50 % максимального значения. Причём под углом излучения подразумевается полный угол $2\theta_{\text{изл СД}}$, а не его половина.

Производители светодиодов приводят, например, такие параметры:

- яркость L_v , кд/м², при заданном значении прямого тока;
- сила света I_v , кд, при заданном значении прямого тока.

Если известна сила света I_v , то величина яркости источника излучения может быть найдена из соотношения:

$$L_v = \frac{I_v}{A_{\text{ии}}}, \quad (3.30)$$

где $A_{\text{ии}}$ – площадь источника излучения.

Индикатриса излучения светодиодов зависит от ряда факторов, в том числе от конструктивных параметров световыводящей поверхности.

Примеры индикатрисы излучения светодиодов приведены на рис. 3.9.

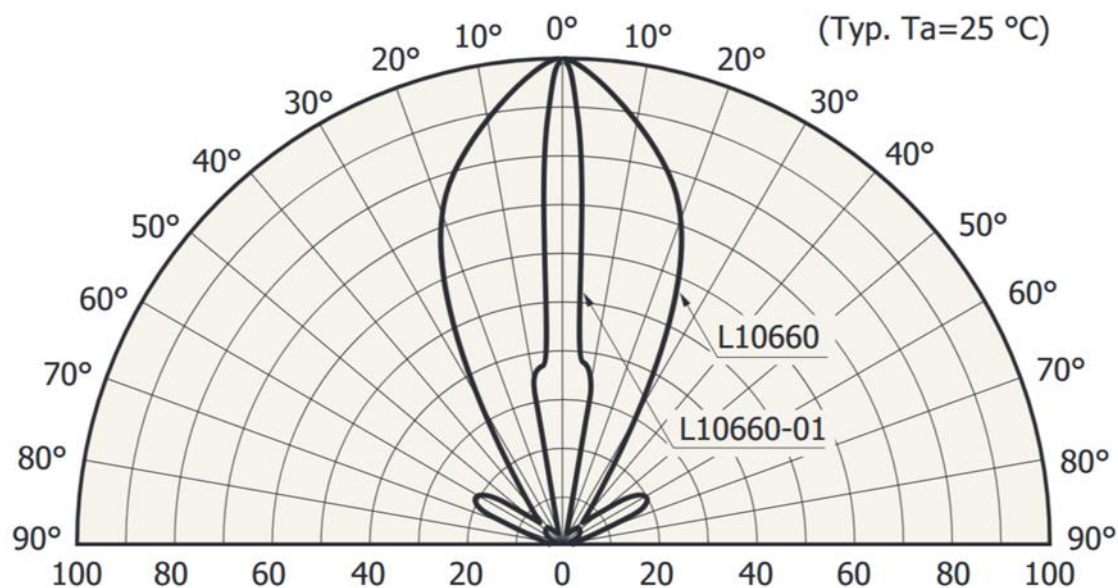


Рисунок 3.9 – Примеры индикатрисы излучения светодиодов НАМАМАТСУ [29]

Из рисунка 3.9 следует, что модель пространственного распределения излучения светодиодов согласно выражению (3.29) может приниматься при энергетическом расчёте опико-электронного прибора с учётом её допустимости в зависимости от решаемой задачи.

Для приблизительного расчёта опико-электронного прибора угол излучения $2\theta_{\text{изл СД}}$ светодиода L10660 может быть принят в диапазоне от 20° до 40° в соответствии с принятой моделью индикатрисы излучения.

Производители ИК и УФ светодиодов приводят мощность их излучения P , Вт. Если принять модель излучения согласно выражению (3.29), то энергетическая яркость:

$$L_e = \frac{P}{\pi A_{\text{ИИ}} \sin^2 \theta_{\text{макс}}} . \quad (3.31)$$

Соотношение между углом излучения светодиода $2\theta_{\text{изл СД}}$ и углом $\theta_{\text{макс}}$ в рассматриваемой модели должно приниматься разработчиком по совокупности всех факторов.

3.7 Отражающая поверхность как вторичный источник оптического излучения

Объекты материального мира отражают падающее на них излучение внешних источников, то есть других объектов. Наиболее часто

встречающимися внешними источниками являются Солнце, различные лампы и светильники. Благодаря этим источникам мы видим предметы окружающего нас мира.

Отражённое излучение объектов, наряду с их собственным излучением, вносит вклад в формирование сигнала в ОЭП.

Солнце как источник описано в ряде монографий, учебников [11] и научных статей.

На рисунке 3.10 показано распределение спектральной плотности облучённости $E_{e,\lambda}(\lambda)$, создаваемое Солнцем в верхней части атмосферы Земли (вне атмосферы), а также на уровне моря. Максимальное значение спектральной плотности облучённости вне атмосферы Земли составляет примерно $E_{e,\lambda \text{ макс}} \approx 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм})$.

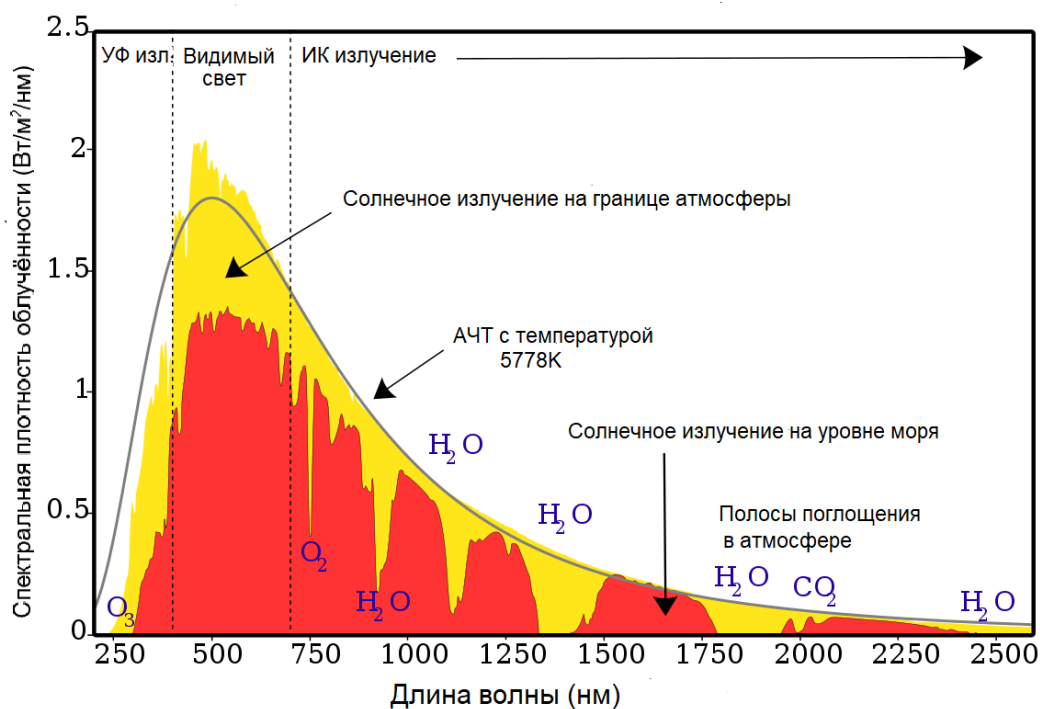


Рисунок 3.10 – Распределение спектральной плотности облучённости, создаваемой излучением Солнца на границе земной атмосферы и на уровне моря [30]

Спектральное распределение солнечного излучения в первом приближении соответствует излучению чёрного тела с температурой примерно 5800 К. Это приблизительно равно температуре поверхности Солнца. При прохождении солнечного излучения через атмосферу Земли

оно частично поглощается составляющими её парами и газами и частично рассеивается на частицах и аэрозолях, содержащихся в атмосфере. Наиболее сильно влияющими компонентами являются пары воды, углекислый газ и озон. Поглощение оптического излучения этими компонентами имеет селективный характер и сосредоточено в определённых полосах поглощения.

Облучённость земной поверхности зависит от состояния атмосферы, времени года и суток, географических координат. В таблице 3.1 показаны значения освещённости поверхности Земли, создаваемой солнечным излучением.

Таблица 3.1. Освещённость поверхности Земли Солнцем [11]

Высота Солнца над горизонтом (в градусах)	5	15	10	20	30	40	50	55
	Освещённость поверхности Земли, клк							
Освещённость на солнце, безоблачно	4	9	15	23	39	58	76	85
Освещённость в тени, безоблачно	3	4	6	7	9	12	14	15
Освещённость при сплошной облачности	2	3	4	6	9	12	5	16
Отношение освещённостей в тени и на солнце	0,75	0,44	0,4	0,3	0,22	0,21	0,18	0,18
Отношение освещённостей в пасмурный день и на солнце	0,5	0,33	0,27	0,26	0,23	0,21	0,2	0,19

Излучение внешних источников (Солнца, ламп, светодиодов, лазеров и других) отражается от наблюдаемых объектов. Излучение, отражённое от объектов, используется в оптико-электронных приборах различного назначения.

Коэффициентом отражения (для падающего излучения с заданными спектральным составом, поляризацией и пространственным распределением) ρ называется отношение отражённого потока излучения или светового потока к падающему потоку при заданных условиях [19]:

$$\rho = \frac{\Phi_1}{\Phi_0} . \quad (3.32)$$

Коэффициент отражения ρ представляет собой сумму коэффициента зеркального отражения ρ_r и коэффициента диффузного отражения ρ_d [18, 19]:

$$\rho = \rho_r + \rho_d . \quad (3.33)$$

Если поверхность представляет собой идеальный диффузный рассеиватель, то

$$\rho_d = 1, \quad \rho_r = 0. \quad (3.34)$$

Понятие идеальной рассеивающей поверхности ввёл Ламберт в 1760 году [31].

При описании свойств отражающей поверхности как вторичного источника отражённого излучения используют понятие **совершенный рассеиватель**, под которым понимают идеальный однородный рассеиватель с коэффициентом отражения, равным единице для всех длин волн [19].

Метрологические организации во всём мире изготавливают стандартные образцы светорассеивающих поверхностей. В Российской Федерации такие образцы изготавливают во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева [32]. Стандартный образец белой поверхности ВНИИМ как основной элемент содержит светорассеивающее стекло марки МС-20 диаметром 60 мм. Спектральный диапазон стандартного образца составляет 380–780 нм. Диапазон воспроизводимых значений спектрального коэффициента отражения от 0,91 до 0,99.

Другие лаборатории изготавливают такие образцы из окиси магния или сернокислого бария.

Из выражения (3.32), а также из определений облучённости (2.16) и энергетической светимости (2.10) следует, что для совершенного рассеивателя выполняется соотношение:

$$M_{e,\lambda,1}(\lambda) = E_{e,\lambda,0}(\lambda) , \quad (3.35)$$

где $M_{e,\lambda,1}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности энергетической светимости совершенного рассеивателя, $E_{e,\lambda,0}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности облучённости совершенного рассеивателя.

Если отражающая поверхность не является совершенной, а характеризуется распределением спектрального коэффициента отражения $\rho(\lambda)$, а на отражающую поверхность падает излучение внешнего источника, то спектральная плотность энергетической светимости излучения, отражённого от поверхности, согласно [1, 11] равна:

$$M_{e,\lambda,1}(\lambda) = \rho(\lambda) \cdot E_{e,\lambda,0}(\lambda), \quad (3.36)$$

где $\rho(\lambda)$ – распределение спектрального коэффициента отражения.

Если облучаемая поверхность является идеальной диффузно отражающей, то спектральная плотность энергетической яркости излучения, отражённого от поверхности, согласно закону Ламберта [33] равна:

$$L_{e,\lambda,1}(\lambda) = \frac{M_{e,\lambda,1}(\lambda)}{\pi}. \quad (3.37)$$

Из выражений (3.36) и (3.37) следует:

$$L_{e,\lambda,1}(\lambda) = \frac{\rho(\lambda) \cdot E_{e,\lambda,0}(\lambda)}{\pi}. \quad (3.38)$$

Распределение спектральной плотности облучённости отражающей поверхности можно представить в следующем виде:

$$E_{e,\lambda}(\lambda) = E_{e,\lambda \text{ макс}} \cdot e_{e,\lambda}(\lambda) \quad (3.39)$$

где $E_{e,\lambda \text{ макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности облучённости поверхности; $e_e(\lambda)$ – относительное распределение спектральной плотности облучённости поверхности.

Если внешний источник является тепловым и его относительное спектральное распределение излучения совпадает с относительным спектральным распределением излучения АЧТ, тогда:

$$e_e(\lambda) = m_{e\lambda}^0(\lambda, T). \quad (3.40)$$

В этом случае из выражения (3.11) и (3.39) получаем:

$$\begin{aligned}
E_{e,\lambda}(\lambda) &= E_{e,\lambda \text{ макс}} m_{e\lambda}^0(\lambda, T) = \\
&= E_{e,\lambda \text{ макс}} \frac{2,9082}{(\lambda \cdot T)^5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (3.41)
\end{aligned}$$

где T – температура внешнего источника.

Из выражений (3.38) и (3.41) следует, что распределение спектральной плотности энергетической яркости излучения, отражённого от поверхности:

$$L_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{E_{e,\lambda \text{ макс}} \rho(\lambda)}{\pi} \cdot \frac{2,9082}{(\lambda \cdot T)^5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1}. \quad (3.42)$$

Спектральное распределение излучения реальных источников не совпадает с излучением абсолютно чёрного тела. Для реальных источников вместо температуры T с той или иной степенью приближения можно использовать их цветовую температуру $T_{\text{цв}}$. Из выражения (3.41) следует, что спектральное распределение облучённости объекта $E_{\lambda}(\lambda)$ излучением внешнего источника с цветовой температурой $T_{\text{цв}}$:

$$E_{\lambda}(\lambda) = E_{\lambda \text{ макс}} \frac{2,9082}{(\lambda \cdot T_{\text{цв}})^5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\text{цв}}}} - 1 \right)^{-1}. \quad (3.43)$$

Из выражения (3.42) следует, что спектральное распределение яркости отражённого от объекта излучения внешнего источника с цветовой температурой $T_{\text{цв}}$:

$$L_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{E_{e,\lambda \text{ макс}} \rho(\lambda)}{\pi} \cdot \frac{2,9082}{(\lambda \cdot T_{\text{цв}})^5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\text{цв}}}} - 1 \right)^{-1}. \quad (3.44)$$

На рисунке 3.11 представлены графики относительных распределений спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрных тел с температурами $T = 5800 \text{ K}$, $T = 3200 \text{ K}$ и $T = 2856 \text{ K}$, а также относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$.

Излучение абсолютно чёрного тела с температурой $T = 5800 \text{ K}$ может применяться в расчётах как модель излучения Солнца, а модель излучения абсолютно чёрного тела с температурой $T = 2856 \text{ K}$ может применяться в расчётах как модель излучения эталонной светоизмерительной лампы накаливания, применяемой, например при аттестации фотоприёмников по методам согласно ГОСТ Р 59607—2021 [34].

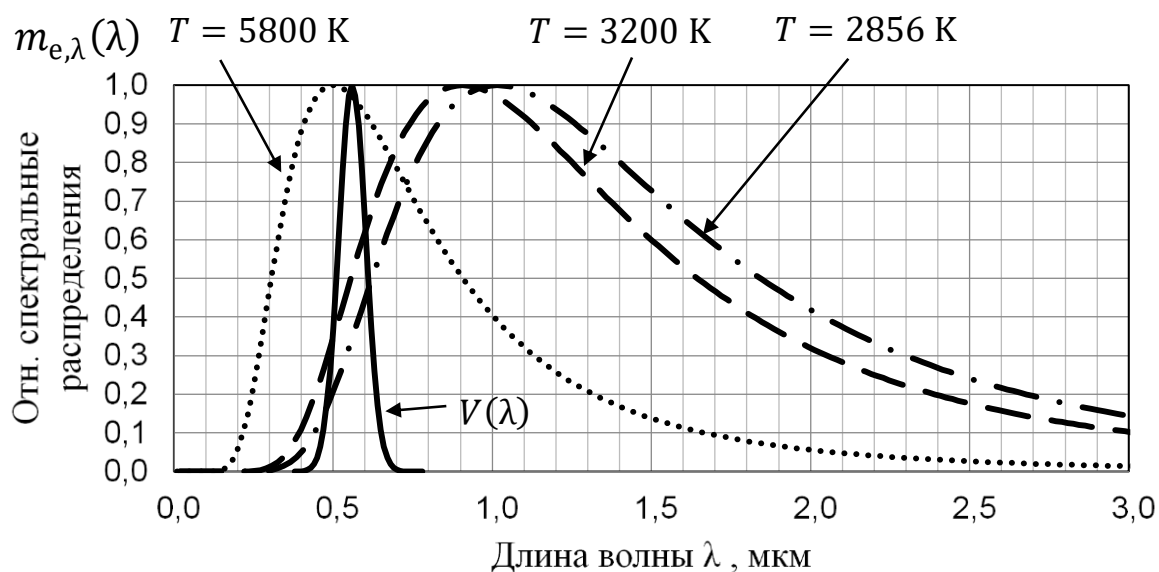


Рисунок 3.11 – Относительные распределения спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела $m_{e,\lambda}(\lambda)$: с температурой $T = 5800\text{ K}$ (модель излучения Солнца), с температурой $T = 3200\text{ K}$ (модель излучения галогенной лампы), с температурой $T = 2856\text{ K}$ (модель излучения лампы накаливания), а также относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$

Вопросы по 3 разделу

2. Сформулируйте закон Кирхгофа. От каких параметров зависят излучательная и поглощательная способности любого тела?
3. В чем отличие абсолютно чёрного тела от реальных тел? Чему равен спектральный коэффициент поглощения абсолютно чёрного тела?
4. Каким законом описывается зависимость спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела от длины волны и температуры?
5. Каким образом рассчитать энергетическую светимость абсолютно чёрного тела, зная функцию Планка?
6. Что можно определить, применив закон Вина?
8. Как максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела связана с его температурой?
9. Начертите примерные графики спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела для двух различных

значений температур. Укажите, чем они отличаются и объясните физический смысл этих различий.

10. Запишите закон сохранения энергии для любого тела. Каковы его следствия?

11. В чем отличие энергетических величин, характеризующих излучение одного источника?

12. Какое соотношение справедливо для относительных распределений спектральных плотностей редуцированных величин, характеризующих излучение одного источника?

13. Что такое индикатриса излучения источника?

14. Какие системы координат могут использоваться для представления индикатрис излучения?

15. Сформулируйте закон Ламберта и его следствие. Нарисуйте типовые индикатрисы для ламбертовского источника.

16. Как рассчитать силу излучения ламбертовского источника под некоторым углом к нормали к его поверхности?

17. Какова связь энергетической яркости и энергетической светимости для ламбертовского источника?

18. В каких случаях целесообразно использовать при расчётах формулу спектральной плотности энергетической яркости для абсолютно чёрного тела (ламбертовского излучателя)?

19. Насколько полно модель излучения ламбертовского источника соответствует индикатрисам излучения реальных источников? В каких пределах ее можно использовать в практических расчётах?

20. В единицах каких величин задаются параметры и характеристики светодиодов?

21. Чем характеризуется пространственное распределение излучения светодиодов?

22. Количественная оценка какого параметра излучения является основой для определения величины угла излучения светодиода по его индикатрисе? Покажите на рисунке.

23. Приведите формулу для расчёта яркости светодиода, если известна его мощность.

24. Какому излучателю соответствует спектральное распределение солнечного излучения в первом приближении?

25. Какой формулой описывается коэффициент отражения для излучения заданного спектрального состава? Как в ней соотносятся диффузная и зеркальная составляющие?

26. Что такое совершенный рассеиватель? Какое аналитическое соотношение для него справедливо?

27. Что представляют собой стандартные образцы светорассеивающих поверхностей?

4 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПАДАЮЩЕГО НА ФОТОПРИЁМНИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

4.1 Приёмное устройство оптического электронного прибора

4.1.1 Схема приёмного устройства

На рис. 4.1 представлена структурная схема оптического электронного прибора, в поле которого находится источник излучения ИИ.

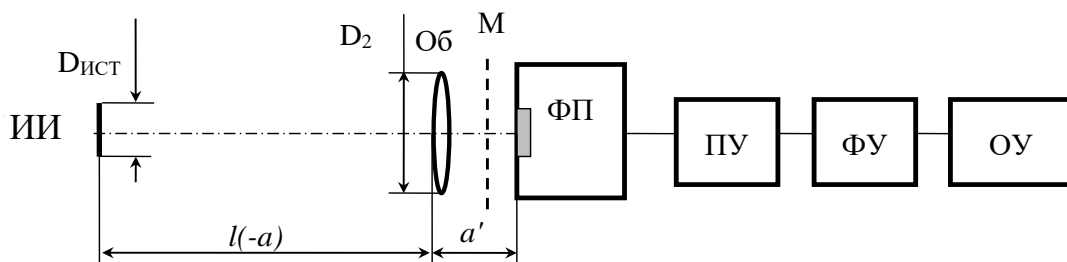


Рисунок 4.1 – Структурная схема оптического электронного прибора:
ИИ - источник излучения (объект, цель); Об – объектив; М – модулятор;
ФП – фотоприёмник; ПУ – предварительный усилитель;
ФУ – фильтр усилитель; ОУ – отсчётное устройство

На рис. 4.2 представлена оптическая схема рассматриваемого оптического электронного прибора, содержащего объектив и фотоприёмник. Объектив формирует изображение объекта или фона в плоскости анализа, которая может представлять собой чувствительную площадку фотоприёмника, его часть (пиксел), полевую диафрагму или анализатор другого вида. Границы чувствительной площадки фотоприёмника или пиксела можно рассматривать как полевую диафрагму.

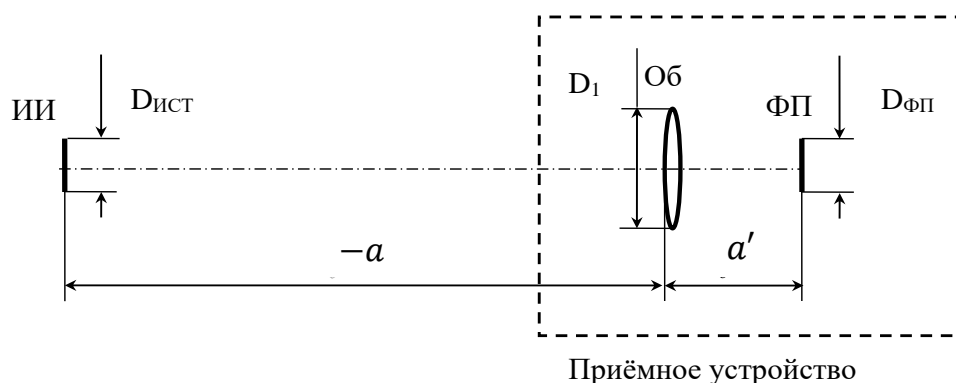


Рисунок 4.2 – Оптическая схема оптического электронного прибора:
ИИ – источник излучения (объект или фон),
Об – объектив; ФП – чувствительная площадка фотоприёмника

На рис. 4.2 показано расстояние $(-a)$ от источника излучения до главной плоскости объектива в пространстве предметов, расстояние a' от главной плоскости объектива в пространстве изображений до изображения источника.

4.1.2 Облучённость и освещённость в плоскости изображения, создаваемые объективом приёмного устройства

На рисунке 4.3 представлен элемент источника излучения площадью dA_1 , который имеет энергетическую яркость L_{e1} в направлении входного зрачка объектива Об.

Если пренебрегать дифракцией и аберрациями, то с некоторой погрешностью можно считать, что объектив создаёт в плоскости анализа изображение dA_2 элементарной площадки dA_1 источника в плоскости предметов (рис. 4.3).

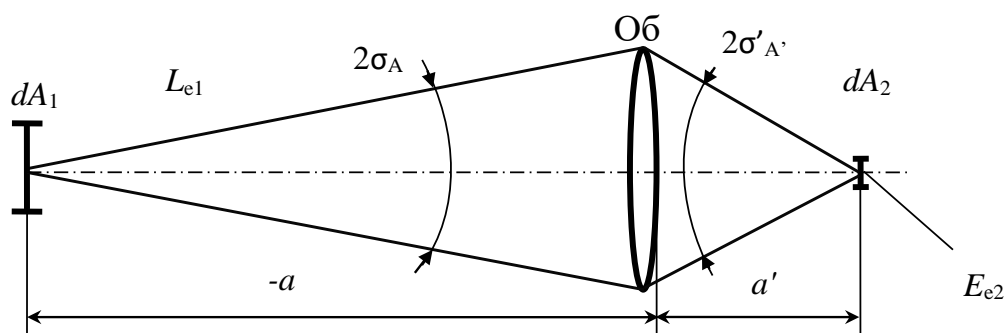


Рисунок 4.3 – Элемент источника излучения площадью dA_1 ,
Об – объектив; dA_2 – изображение элемента dA_1

Если элементарная площадка источника dA_1 , находящаяся на оптической оси объектива, имеет энергетическую яркость L_{e1} в направлении входного зрачка объектива, а распределение её спектральной плотности имеет вид $L_{e\lambda 1}(\lambda)$, то распределение спектральной плотности облучённости в точке изображения на элементарной площадке dA_2 , [1, 35 36]:

$$E_{e,\lambda 2}(\lambda) = \pi \cdot L_{e,\lambda 1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \left(n_2^2 / n_1 \right) \sin^2 \sigma'_A, \quad (4.1)$$

где $L_{e\lambda_1}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности энергетической яркости площадки dA_1 источника; $\tau_1(\lambda)$ и $\tau_{oc}(\lambda)$ – спектральные распределения коэффициентов пропускания среды и оптической системы; n_1 и n_2 – показатели преломления среды до объектива и после него; $\sigma'_{A'}$ – апертурный угол оптической системы в пространстве изображений (задний апертурный угол).

При анализе выражения (4.1) и последующих выражений необходимо учитывать, что величина π имеет размерностьстерадиан.

Если источник излучения имеет равномерную по площади энергетическую яркость, то облучённость в его изображении уменьшается от точки, лежащей на оптической оси к его краю. На рисунке 4.4 показана внеосевая точка G_1 источника и её изображение G_2 . Для внеосевой точки G_2 пространственное распределение спектральной плотности облучённости [35, 36]:

$$E_{e,\lambda,2,\beta'}(\lambda, \beta') = E_{e,\lambda,2,0}(\lambda) \cos^4 \beta', \quad (4.2)$$

где β' – угол между оптической осью и линией от центра выходного зрачка до точки G_2 . При малых углах β' облучённость можно считать постоянной ($E_{e,\lambda,2,\beta'}(\lambda, \beta') \approx E_{e,\lambda,2,0}(\lambda, 0)$).

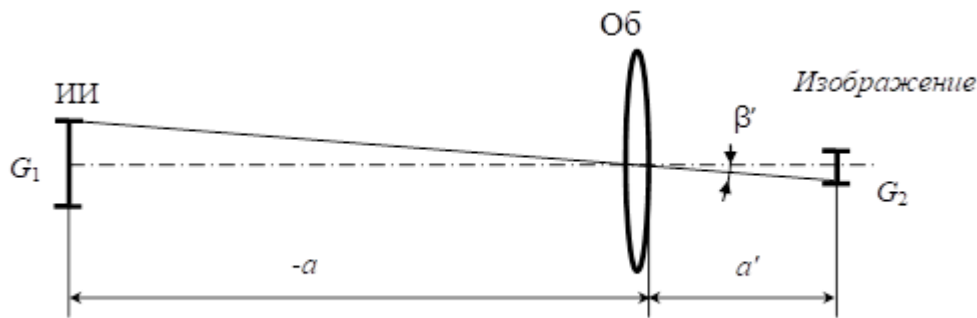


Рисунок 4.4 – Внеосевая точка G_1 источника и её изображение G_2

Если оптико-электронный прибор находится в воздушной среде или в космосе, когда изменением показателя преломления среды распространения излучения можно пренебрегать ($n_1 \approx n_2$), то из выражения (4.1) следует:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) = \pi \cdot L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \sin^2 \sigma'_{A'} \quad (4.3)$$

Для точек, лежащих на оптической оси, при малой толщине линз объектива можно принять следующее приближённое соотношение:

$$\sin \sigma'_{A'} \approx \sigma'_{A'} \approx \operatorname{tg} \sigma'_{A'} = \frac{D'_{об}}{2a'} , \quad (4.4)$$

где $D'_{об}$ - диаметр выходного зрачка объектива; a' – расстояние от задней главной точки объектива до осевой точки изображения источника.

При линейном увеличении в зрачках $\beta_p \approx 1$ диаметры входного $D_{об}$ и выходного $D'_{об}$ зрачков примерно равны: $D'_{об} \approx D_{об}$. В этом случае выражение (4.4) принимает вид:

$$\sin \sigma'_{A'} \approx \sigma'_{A'} \approx \operatorname{tg} \sigma'_{A'} = \frac{D'_{об}}{2a'} \approx \frac{D_{об}}{2a'} . \quad (4.5)$$

Если расстояние от источника до объектива $l \gg f'$, где f' – фокусное расстояние объектива, то $a' \approx f'$. В этом случае выражение (4.5) принимает вид:

$$\sin \sigma'_{A'} \approx \frac{D_{об}}{2f'} . \quad (4.6)$$

Из выражений (4.3) и (4.6) следует, что распределение спектральной плотности облучённости в изображении:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) = \frac{\pi}{4} L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \left(\frac{D_{об}}{f'} \right)^2 . \quad (4.7)$$

Полученное выражение (4.7) можно считать основой для большинства последующих энергетических расчётов.

Для излучения видимого диапазона излучения (света) выражение (4.7) может быть также записано и для световых величин:

$$E_{v,\lambda,2}(\lambda) = \frac{\pi}{4} L_{v,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \left(\frac{D_{об}}{f'} \right)^2 , \quad (4.8)$$

где $E_{v,\lambda,2}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности освещённости в изображении; $L_{v,\lambda,1}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности яркости источника излучения.

Если излучатель ламбертовский, то из выражений (4.7) и (3.27) ($L_{e,\lambda,1}(\lambda) = (M_{e,\lambda,1}(\lambda)/\pi)$), следует:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) = \frac{1}{4} M_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \left(\frac{D_{об}}{f'} \right)^2 , \quad (4.9)$$

где $M_{e,\lambda,1}(\lambda)$ – спектральное распределение энергетической светимости источника излучения (объекта).

Из выражения (4.7) следует, что для объектива с круглой формой входного зрачка:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) = L_{e,\lambda,1}(\lambda)\tau_1(\lambda)\tau_{oc}(\lambda)\frac{A_{об}}{\pi(f')^2}, \quad (4.10)$$

где $A_{об}$ – площадь входного зрачка объектива, $A_{об} = \pi(D_{об}^2/4)$.

Можно показать, что выражение (4.10) справедливо и для объективов с другой формой входного зрачка, например кольцевой или квадратной.

Если излучатель ламбертовский, то из выражений (4.10) и (3.27) ($L_{e,\lambda,1}(\lambda) = (M_{e,\lambda,1}(\lambda)/\pi)$), следует:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) = M_{e,\lambda,1}(\lambda)\tau_1(\lambda)\tau_{oc}(\lambda)\frac{A_{об}}{\pi^2(f')^2}. \quad (4.11)$$

Из выражений (4.7)...(4.11) следует, что облучённость в точке изображения не зависит от расстояния между источником и входным зрачком объектива оптико-электронного прибора.

4.1.3 Облучённость и освещённость в плоскости изображения, создаваемые отражённым от объекта или фона излучением

Энергетическая яркость объекта или фона, создаваемая отражённым от него излучением внешнего источника, например Солнца, лампы, светодиода или лазера, может быть определена с помощью выражения (3.37).

Если свойства отражающей поверхности точно не определены, то в приближённых расчётах полагают, что поверхность является диффузно отражающей и пространственное распределение отражённого излучения соответствует закону Ламберта, выражение (3.38). Спектральные характеристики отражения $\rho_s(\lambda)$ различных поверхностей приводятся в ряде публикаций, например [37].

Из выражений (4.7) и (3.38) следует, что распределение спектральной плотности облучённости, создаваемой в плоскости изображения отражённым от объекта или фона излучением внешнего источника:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) = \frac{1}{4}E_{e,\lambda}(\lambda)\rho_s(\lambda)\tau_1(\lambda)\tau_{oc}(\lambda)\left(\frac{D_{об}}{f'}\right)^2, \quad (4.12)$$

где $E_{e,\lambda}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности облучённости объекта внешним источником; $\rho_s(\lambda)$ – спектральная характеристика коэффициента отражения объекта.

Для отражённого излучения видимого диапазона (света) распределение спектральной плотности освещённости, создаваемой в плоскости изображения отражённым от объекта или фона излучением внешнего источника:

$$E_{v,\lambda,2}(\lambda) = \frac{1}{4} E_{v,\lambda}(\lambda) \rho_s(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \left(\frac{D_{об}}{f'} \right)^2, \quad (4.13)$$

где $E_{v,\lambda}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности освещённости объекта внешним источником; $\rho_s(\lambda)$ – спектральная характеристика коэффициента отражения объекта.

4.1.4 Поток излучения, создаваемый объективом приёмного устройства на чувствительной площадке фотоприёмника

Сигнал, формируемый фотоприёмником оптико-электронного прибора, определяется величиной потока (или энергии) излучения, падающего на чувствительную площадку фотоприёмника, которая фактически является полевой диафрагмой. То же можно сказать и об отдельном пикселе матричного фотоприёмника.

При расчёте потока излучения, проходящего через полевую диафрагму (площадку или пиксел фотоприёмника), следует иметь в виду два возможных варианта соотношений между угловым размером источника из точки наблюдения и угловым полем приёмного устройства.

На рисунке 4.5 представлена геометрическая интерпретация этих вариантов.

- 1) Угловой размер $2\beta_1$ источника излучения ИИ1 из точки наблюдения больше, чем угловое поле 2ω приёмного устройства оптико-электронного прибора, то есть диаметр изображения источника $D_{из}$ больше, чем диаметр полевой диафрагмы $D_{ПД}$ ($D_{из} \geq D_{ПД}$).
- 2) Угловой размер $2\beta_2$ источника излучения ИИ2 из точки наблюдения меньше, чем угловое поле 2ω приёмного устройства оптико-электронного прибора, то есть диаметр изображения источника $D_{из}$ меньше, чем диаметр полевой диафрагмы $D_{ПД}$ ($D_{из} < D_{ПД}$).

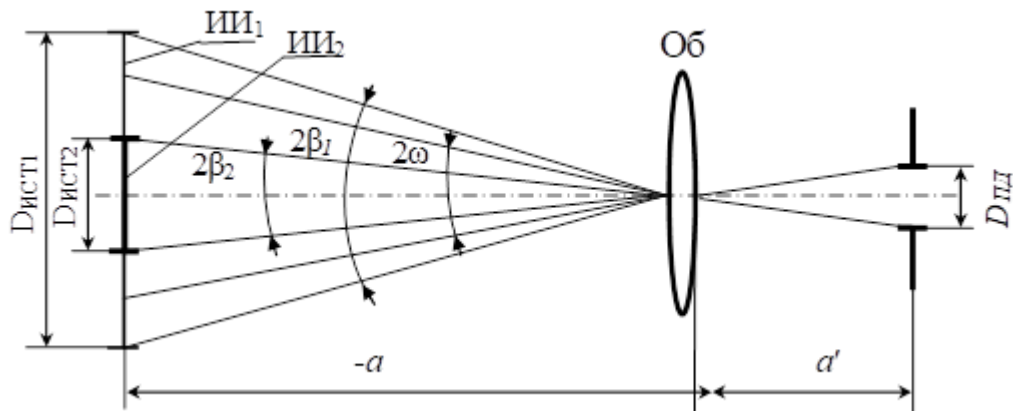


Рисунок 4.5 – О соотношении углового размера источника излучения (объекта) и углового поля приёмного устройства

Первый вариант ($2\beta_1 \geq 2\omega$ и $D_{из} \geq D_{ПД}$) соответствует, например, излучению равномерного фона (большой источник) или малой полевой диафрагме (малая площадка фотоприёмника или отдельный пиксел матричного фотоприёмника).

Второй вариант ($2\beta_2 < 2\omega$ и $D_{из} < D_{ПД}$) соответствует, например, излучению малого объекта (цели), изображение которого меньше полевой диафрагмы (площадки фотоприёмника).

«Большой» источник излучения по мере удаления может превратиться в «малый», что показано на рис. 4.6. Если источник излучения ИИ занимает положение ИИ1 и удалён на расстояние $-a_1$ от главной плоскости объектива Об, то его угловой размер больше углового поля приёмного устройства. При увеличении расстояния в некоторых пределах угловой размер источника остаётся больше, чем угловое поле прибора. Это происходит до тех пор, пока величина углового размера источника не сравняется с угловым полем прибора $2\beta_3 = 2\omega$. При дальнейшем увеличении расстояния угловой размер источника становится меньше, чем угловое поле 2ω .

Примером реализации схемы с «малым» источником является оптико-электронная система контроля износа рабочих лопаток паровых турбин при валоповороте [38]. Объект, измеряемый этой системой, турбинная лопатка, является достаточно большим, но его контролируемая часть полностью помещается в поле видеозонда. С этой точки зрения он является «малым».

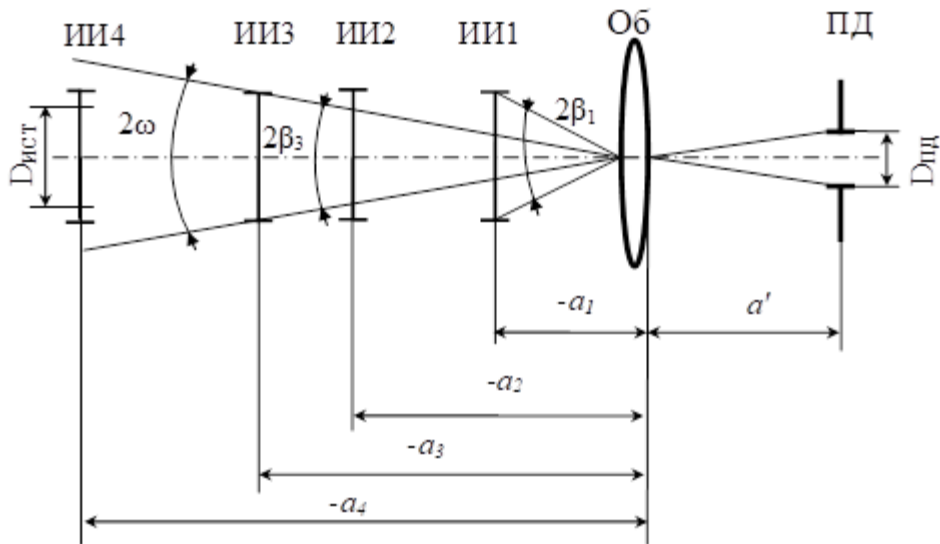


Рисунок 4.6 – Об изменении расстояния между источником и приёмным устройством

Пикселы матричных фотоприёмников имеют малый размер, поэтому сказанное выше в полной мере относится к ним, и, следовательно, облучённость пиксела, создаваемая соответствующим элементом dA_1 объекта или фона, не зависит от расстояния до объекта до тех пор, пока изображение этого фрагмента dA_2 не станет меньше размера пиксела.

4.1.5 Поток излучения «большого» источника, создаваемый объективом приёмного устройства на чувствительной площадке фотоприёмника

Если угловой размер $2\beta_1$ источника излучения ИИ1 из точки наблюдения больше, чем угловое поле 2ω приёмного устройства опико-электронного прибора (рис. 4.5), то есть диаметр изображения источника $D_{из}$ больше, чем диаметр полевой диафрагмы $D_{пд}$ ($D_{из} \geq D_{пд}$), то выполняется соотношение:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{пд}}{a'} \leq \frac{D_{из}}{a'} = \frac{D_{ист}}{a} = \frac{D_{ист}}{l}, \quad (4.14)$$

где ω и ω' угловое поле в пространстве предметов и в пространстве изображений (для оптических систем без иммерсии $2\omega = 2\omega'$); $D_{ист}$ – диаметр источника; a – расстояние от объекта до передней главной точки объектива; a' – расстояние от задней главной точки объектива до

плоскости изображения (для удалённых источников ($l \gg f'$) справедливо соотношение: $a = l$, $a' = f'$).

Если изображение источника с равномерной по площади яркостью, например фона, больше размера полевой диафрагмы ($D_{\text{ПД}} \leq D_{\text{из}}$), то поток излучения источника, проходящего через полевую диафрагму, равен произведению облучённости на площадь полевой диафрагмы $A_{\text{ПД}}$.

Источник излучения, изображение которого удовлетворяет неравенству (4.14), будем называть «большим».

Из выражения (4.7) следует, что распределение спектральной плотности потока излучения от равномерного источника излучения:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = E_{e,\lambda,2}(\lambda) A_{\text{ПД}} = \frac{\pi}{4} L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{ос}}(\lambda) \left(\frac{D_{\text{об}}}{f'}\right)^2 A_{\text{ПД}}, \quad (4.15)$$

где $A_{\text{ПД}}$ – площадь чувствительной площадки фотоприёмника или пиксела матричного фотоприёмника.

Если излучатель является ламбертовским, то из выражений (4.7), (4.10) и (3.27) ($L_{e,\lambda,1}(\lambda) = (M_{e,\lambda,1}(\lambda)/\pi)$) следует:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = \frac{1}{4} M_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{ос}}(\lambda) \left(\frac{D_{\text{об}}}{f'}\right)^2 A_{\text{ПД}}. \quad (4.16)$$

Для тепловых источников излучения из (3.14) ($M_{e,\lambda,T}(\lambda, T) = M_{e,\lambda,T}^0(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda, T)$) следует:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \frac{1}{4} M_{e,\lambda,T,1}^0(\lambda, T) \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{ос}}(\lambda) \left(\frac{D_{\text{об}}}{f'}\right)^2 A_{\text{ПД}}, \quad (4.17)$$

где $M_{e,\lambda,T,1}^0(\lambda, T)$ – распределение спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела при температуре объекта; $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ – спектральное распределение коэффициента теплового излучения объекта; $A_{\text{ПД}}$ – площадь полевой диафрагмы (или фоточувствительного элемента фотоприёмника).

Из выражения (4.17) следует, что поток излучения $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$, падающего на фотоприёмник с «малой» площадкой от «большого» источника, не зависит от расстояния до объекта. В частном случае это могут быть следующие варианты.

1. Собственное излучение фона на фотоприёмнике ОЭП.
2. Излучение объекта в пределах малого поля пиксела матричного фотоприёмника.

3. Излучение объекта на фотоприёмнике пирометра, то есть прибора для измерения условной температуры объекта в пределах углового поля пирометра.

4.1.6 Поток излучения «малого» источника, создаваемый объективом приёмного устройства на чувствительной площадке фотоприёмника

Пусть угловой размер $2\beta_2$ источника излучения ИИ2 из точки наблюдения меньше, чем угловое поле 2ω приёмного устройства опико-электронного прибора (рис. 4.5), то есть диаметр изображения источника $D_{из}$ меньше, чем диаметр полевой диафрагмы $D_{ПД}$ ($D_{из} < D_{ПД}$).

Источник излучения, изображение которого удовлетворяет неравенству ($D_{из} < D_{ПД}$), будем называть «малым».

В этом случае выполняется соотношение:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{ПД}}{a'} > \frac{D_{из}}{a'} = \frac{D_{ист}}{a} = \frac{D_{ист}}{l} \quad (4.18)$$

где l – расстояние между источником и главной точкой объектива в пространстве предметов.

Если источник излучения представляет собой площадку диаметром $D_{ист}$, то изображение источника в плоскости полевой диафрагмы имеет диаметр:

$$D_{из} = D_{ист} \frac{a'}{a} \quad (4.19)$$

Иначе:

$$\frac{D_{из}}{a'} = \frac{D_{ист}}{a} \quad (4.20)$$

Если источник круглый, то его площадь $A_{ист} = \pi(D_{ист}^2/4)$.

Площадь изображения источника $A_{из} = \pi(D_{из}^2/4)$.

Соотношение площадей источника излучения и его изображения:

$$A_{из} = A_{ист} \left(\frac{a'}{a}\right)^2 \quad (4.21)$$

Для удалённого объекта ($l \gg f'$) и ($a' \approx f'$) справедливо соотношение:

$$\frac{A_{из}}{(f')^2} = \frac{A_{ист}}{(a)^2} = \frac{A_{ист}}{(l)^2} \quad (4.22)$$

В рассматриваемом случае ($D_{\text{ПД}} > D_{\text{из}}$) спектральная плотность потока излучения от равномерного источника, проходящего через полевую диафрагму, равна произведению спектральной плотности облучённости на площадь изображения источника $A_{\text{из}}$.

Из выражения (4.10) следует, что распределение спектральной плотности потока излучения от равномерного источника:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = E_{e,\lambda,2}(\lambda) A_{\text{из}} = \frac{\pi}{4} L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{ос}}(\lambda) \left(\frac{D_{\text{об}}}{f'} \right)^2 A_{\text{из}} . \quad (4.23)$$

Из выражения (4.23) с учётом соотношения (4.22):

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = \frac{\pi}{4} L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{ос}}(\lambda) \frac{(D_{\text{об}})^2 A_{\text{ист}}}{l^2} . \quad (4.24)$$

Если входной зрачок имеет форму круга, то выражение (4.24) можно представить в виде:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{ос}}(\lambda) \frac{A_{\text{ист}} A_{\text{об}}}{l^2} . \quad (4.25)$$

Последнее выражение справедливо как для оптических систем, имеющих форму входного зрачка, отличную от круглой (квадратную, кольцевую), так и для источников излучения, имеющих произвольную форму.

Если излучатель является ламбертовским, то из выражений (4.24) и (3.27) ($L_{e,\lambda,1}(\lambda) = (M_{e,\lambda,1}(\lambda)/\pi)$), следует:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = M_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{ос}}(\lambda) \frac{(D_{\text{об}})^2 A_{\text{ист}}}{l^2} . \quad (4.26)$$

Для тепловых ИИ, из (4.26) и (3.14) ($M_{e,\lambda,T}(\lambda, T) = M_{e,\lambda,T}^0(\lambda, T) \varepsilon(\lambda, T)$), следует:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = M_{e,\lambda,T,1}^0(\lambda, T) \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{ос}}(\lambda) \frac{(D_{\text{об}})^2 A_{\text{ист}}}{l^2} , \quad (4.27)$$

где $M_{e,\lambda,T,1}^0(\lambda, T)$ – распределение спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела при температуре объекта; $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ – спектральное распределение коэффициента теплового излучения объекта; $A_{\text{ист}}$ – площадь источника (объекта).

Если наблюдаемый объект рассматривать как источник отражённого излучения, то из выражений (4.26) и (3.38) следует, что распределение

спектральной плотности облучённости, создаваемой в плоскости изображения отражённым от объекта или фона излучением внешнего источника:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = E_{e,\lambda,0}(\lambda) \rho_s(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \frac{(D_{об})^2 A_{ист}}{4 l^2}, \quad (4.28)$$

где $E_{e,\lambda}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности облучённости объекта внешним источником; $\rho_s(\lambda)$ – спектральная характеристика коэффициента отражения объекта.

Рассматриваемые малоразмерные ИИ часто описываются величиной спектральной плотности силы излучения $I_{e,\lambda,1}(\lambda)$.

Для малых источников сила излучения может быть рассчитана из соотношения [11, 18]:

$$L_{e,\lambda,1}(\lambda) = \frac{I_{e,\lambda,1}(\lambda)}{A_{ист}}. \quad (4.29)$$

Из выражений (4.24) и (4.29) следует, что поток излучения на фотоприёмнике:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = \frac{\pi}{4} I_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \frac{(D_{об})^2}{l^2}. \quad (4.30)$$

Выражение (4.30) можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = I_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{oc}(\lambda) \frac{A_{об}}{l^2}. \quad (4.31)$$

4.2 Встречная коллиматорная (прожекторная) схема оптико-электронного прибора

Встречная коллиматорная (прожекторная) схема построения ОЭП (рис. 4.7) используется при создании приборов различного назначения, в том числе для приборов измерения взаимного положения разнесённых в пространстве объектов [39, 40, 41].

Коллиматор (прожектор) содержит источник излучения ИИ и объектив $Об_1$. Объектив $Об_1$ формирует пучок лучей источника и направляет его на приёмное устройство, которое содержит объектив $Об_2$ и матричный фотоприёмник ФП.

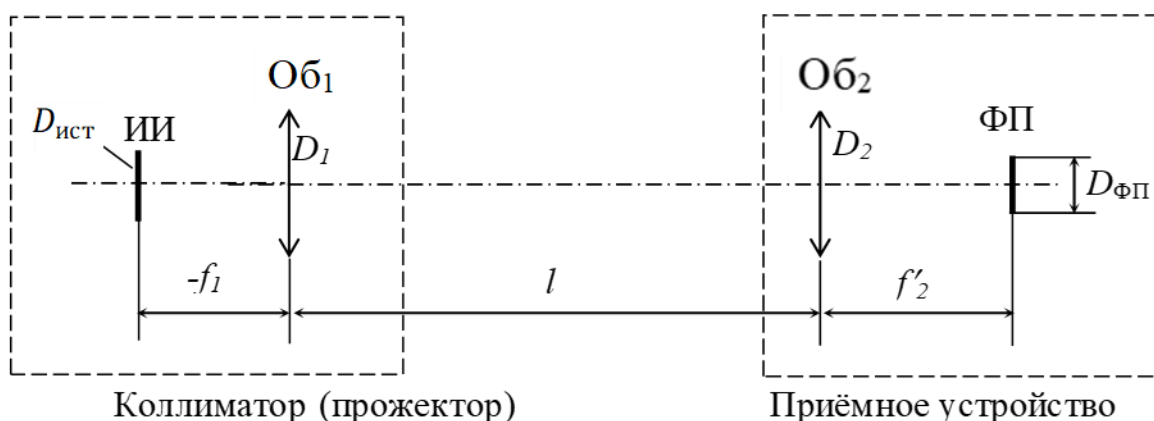


Рисунок 4.7 – Схема опико-электронного прибора, содержащего коллиматор (прожектор) и приёмное устройство:

- ИИ - источник излучения; Об₁ – объектив коллиматора, Об₂ – объектив приёмного устройства; ФП – фотоприёмник;
 $D_{ист}$ – диаметр излучающей поверхности источника;
 D_1 – диаметр выходного зрачка объектива коллиматора (прожектора);
 D_2 – диаметр входного зрачка объектива приёмного устройства;
 $D_{ФП}$ – диаметр чувствительной поверхности фотоприёмника
 $(-f_1)$ – переднее фокусное расстояние объектива коллиматора;
 (f'_2) – заднее фокусное расстояние объектива приёмного устройства;
 l – расстояние между коллиматором и приёмным устройством

В зависимости от параметров оптической системы и расстояния l между коллиматором и приёмным устройством возможны два основных варианта построения оптической системы.

1. Объектив Об₂ строит на фотоприёмнике изображение источника излучения ИИ.
2. Объектив Об₂ строит на фотоприёмнике изображение выходного зрачка объектива Об₁.

Первый вариант реализуется при относительно малом размере источника $D_{ист}$ (иногда называемом «точечным»), малом отношении $D_{ист}/(-f_1)$ и относительно небольших величинах расстояния l . Объектив Об₁ формирует пучок лучей с малой расходимостью. Прибор (устройство), содержащий объектив и расположенный в его фокальной плоскости источник малого размера, называется **коллиматором**.

При рассматриваемой реализации схемы опико-электронного прибора объективы Об₁ и Об₂ формируют на фотоприёмнике ФП изображение источника ИИ. При взаимных поворотах коллиматора и

óприёмного устройства относительно осей, перпендикулярных общей оптической оси прибора, изображение источника перемещается по чувствительной площадке фотоприёмника ФП. Такая схема построения используется для создания оптико-электронных приборов, измеряющих взаимное угловое положение объектов, на которых размещены коллиматор и приёмное устройство.

Второй вариант реализуется при относительно бóльших размерах источника $D_{\text{ист}}$, величинах отношения $D_{\text{ист}}/(-f_1)$ и расстояниях l . Объектив Об₁ формирует пучок лучей с большей расходимостью. Прибор, содержащий объектив и расположенный в его фокальной плоскости источник конечного размера, называется **прожектором**.

При рассматриваемой реализации схемы оптико-электронного прибора объектив Об₂ формируют на фотоприёмнике ФП изображение выходного зрачка объектива Об₁. При смещении выходного зрачка прожектора относительно оси визирования приёмного устройства изображение источника ИИ перемещается по чувствительной площадке фотоприёмника ФП. Такая схема построения используется для создания оптико-электронных приборов, измеряющих линейное перемещение объекта, на котором размещён прожектор относительно линии визирования приёмного устройства.

Соотношения параметров, реализующие эти два варианта, рассмотрены ниже.

4.2.1 Структура пучка лучей коллиматора (прожектора)

На рисунке 4.8 показана структура пучка лучей коллиматора (прожектора), выполненного в виде объектива Об₁ и расположенного в его фокальной плоскости источника излучения ИИ [35, 36, 24, 25].

Пусть источник излучения ИИ представляет собой равнояркий по всей площади круг диаметром $D_{\text{ист}}$.

Поскольку источник расположен в фокальной плоскости объектива, лучи, исходящие из любой точки источника, после объектива образуют параллельные пучки.

Лучи, исходящие из крайних точек источника, после объектива образуют соответствующие параллельные пучки, которые являются границами пространства, в пределах которого распространяются лучи, исходящие от других точек источника.

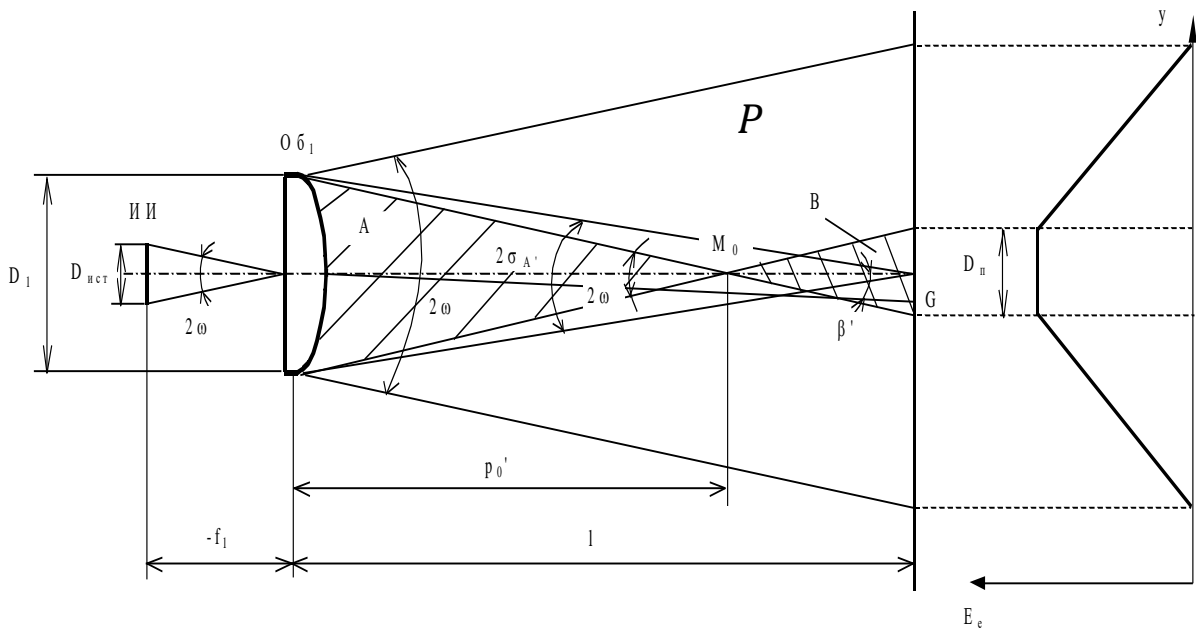


Рисунок 4.8 – Структура пучка лучей коллиматора (прожектора):
 ИИ - источник излучения; $D_{ист}$ - диаметр излучающей поверхности ИИ;
 Об₁ - объектив коллиматора (прожектора); D_1 - диаметр выходного зрачка объектива; $(-f_1)$ – фокусное расстояние объектива; 2ω - угловое поле объектива; $\sigma'_{A'}$ – апертурный угол оптической системы в пространстве изображений (задний апертурный угол); l – расстояние от выходного зрачка объектива до рассматриваемого сечения пучка; p'_0 – дистанция оформления пучка лучей коллиматора; $D_{п}$ - диаметр области с постоянной облучённостью [24]

На рисунке 4.8 показано, что все лучи источника излучения, исходящие из объектива Об₁, образуют усечённый конус P с углом расходимости 2ω .

Из рисунка 4.8 следует, что лучи крайних точек источника ИИ, исходящие из объектива Об₁, образуют конусы A и B с вершиной в точке M_0 .

В пределах конуса A виньетирование лучей отсутствует, то есть в каждую точку конуса A приходят лучи от каждой точки источника излучения.

Для понимания хода лучей и энергетических соотношений в рассматриваемом пространстве можно воспользоваться физическим или мысленным экспериментом, при котором мы попытаемся посмотреть в выходной зрачок объектива коллиматора.

Будем полагать, что зрачок глаза наблюдателя существенно меньше выходного зрачка объектива коллиматора.

Наблюдатель, чей зрачок размещается в пределах конуса A , будет видеть весь источник полностью, так как имеются лучи от любой точки источника, которые выйдут из объектива и попадут в зрачок глаза наблюдателя.

Наблюдатель будет видеть источник в пределах выходного зрачка объектива.

При смещении наблюдателя в плоскости, перпендикулярной оптической оси, за пределы конуса A возникнет виньетирование на выходном зрачке объектива. Вследствие виньетирования виден будет не весь источник, а только его часть.

При большем смещении зрачка, после его выхода за пределы усечённого конуса P , наблюдатель не сможет видеть даже часть источника, так как в этой области нет лучей от источника, которые выходят из объектива коллиматора.

При смещении глаза наблюдателя вдоль оптической оси угловой размер источника будет оставаться неизменным, а видимый размер выходного зрачка объектива будет изменяться.

При увеличении расстояния от объектива коллиматора до наблюдателя видимый размер источника будет заполнять всё большую часть выходного зрачка, и при приближении глаза к точке M_0 видимый диск источника займёт всю площадь выходного зрачка.

При дальнейшем смещении глаза наблюдателя за точку M_0 наблюдатель перестаёт видеть края источника вследствие виньетирования его на выходном зрачке объектива. Глаз переходит в область конуса B .

Что же будет видеть наблюдатель, зрачок глаза которого находится в пределах конуса B ?

Наблюдатель будет видеть часть источника, которая заполняет весь выходной зрачок объектива.

При увеличении расстояния видимая часть источника будет становиться всё меньше. Виньетирование увеличивается.

При смещении зрачка наблюдателя в направлении, перпендикулярном оптической оси, наблюдатель будет видеть другую часть источника, и так будет происходить до тех пор, пока глаз не сместится к границе конуса B .

Если источник представляет собой равномерно светящийся круг, то наблюдатель и не заметит смещения в пределах конуса B .

При смещении зрачка наблюдателя за пределы конуса B только часть выходного зрачка объектива будет заполняться видимой частью источника, причём по мере смещения от оптической оси эта часть будет уменьшаться.

При смещении за пределы усечённого конуса P наблюдатель перестаёт видеть источник, так как в этой области нет лучей от источника, которые выходят из объектива коллиматора.

Из приведённого анализа следует, что структура пучка лучей от выходного зрачка объектива до точки M_0 и от точки M_0 и далее имеет существенное различие.

Расстояние p'_0 от задней главной плоскости объектива до точки M_0 называется **дистанцией оформления пучка лучей коллиматора** [35].

Угол расходимости пучка лучей коллиматора 2ω равен угловому размеру источника в пространстве предметов и может быть найден из соотношения [35, 36]:

$$2\omega = 2\arctg\left(\frac{D_{\text{ист}}}{-2f_1}\right), \quad (4.32)$$

где $(-f_1)$ – фокусное расстояние объектива.

В коллиматорах, как правило, используются малые, практически «точечные» источники, для которых справедливо соотношение $D_{\text{ист}} \ll (-f_1)$.

В этом случае:

$$\omega \approx \frac{D_{\text{ист}}}{-f_1}. \quad (4.33)$$

Дистанция оформления пучка лучей коллиматора может быть рассчитана из соотношений представленных на рис. 4.8 величин [35]:

$$p'_0 = \frac{D_1}{2 \cdot \text{tg}\omega} \approx \frac{D_1}{D_{\text{ист}}} \cdot (-f_1), \quad (4.34)$$

где D_1 – диаметр выходного зрачка объектива.

Различие структуры пучка в пределах дистанции оформления пучка лучей коллиматора и на бóльших дистанциях существенно влияет на выбор выражений при расчёте энергетических параметров излучения, падающего на фотоприёмник.

4.2.2 Распределение облучённости в пучке лучей коллиматора (прожектора)

Рассмотрим распределение облучённости $E_e(y)$ в сечении пучка лучей, перпендикулярном оптической оси и находящемся на расстоянии l от выходного зрачка объектива (рис. 4.8).

Пусть яркость источника по его излучающей поверхности постоянна, aberrации оптической системы отсутствуют, дисперсия объектива не влияет на световой пучок.

Спектральная плотность облучённости, создаваемая коллиматором (прожектором) в точках, лежащих на оптической оси, согласно выражению (4.2) [35, 36]:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) = \pi \cdot L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_k(\lambda) \tau_a(\lambda) \sin^2 \sigma'_{A'}, \quad (4.35)$$

где $L_{e,\lambda,1}(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости площадки источника; $\tau_k(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания объектива коллиматора; $\tau_a(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания среды (например атмосферы) на дистанции l ; $\sigma'_{A'}$ – апертурный угол оптической системы в пространстве изображений (задний апертурный угол).

Апертурный угол в пространстве изображений [35, 36] – это угол между оптической осью и лучом, проходящим через осевую точку изображения и край апертурной диафрагмы.

Однако из ранее приведённого анализа структуры пучка лучей коллиматора следует, что в пределах конуса A фактически не вся площадь выходного зрачка участвует в формировании облучённости в сечении пучка лучей. В этом случае апертурный угол $\sigma'_{A'}$ равен половине угла расходимости ω .

Следовательно, для точек в пределах конуса A , то есть при $l < p'_0$:

$$\sigma'_{A'} = \omega = \operatorname{arctg} \frac{D_{\text{ист}}}{-2f_1} \approx \frac{D_{\text{ист}}}{-2f_1}. \quad (4.36)$$

Для точек в пределах конуса B ($l > p'_0$) в формировании облучённости участвует вся площадь выходного зрачка, следовательно:

$$\sigma'_{A'} = \operatorname{arctg} \frac{D_1}{2l}. \quad (4.37)$$

Из выражений (4.35) и (4.36) следует, что в зоне A спектральная плотность облучённости:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) \approx \pi L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_k(\lambda) \tau_a(\lambda) \left(\frac{D_{\text{ист}}}{-2f_1} \right)^2. \quad (4.38)$$

Следовательно, в пределах конуса A облучённость на оптической оси, **не зависит** от расстояния l от выходного зрачка до данного сечения.

Из выражений (4.35) и (4.37) следует, что в зоне B спектральная плотность облучённости:

$$E_{e,\lambda,2}(\lambda) \approx \pi L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_k(\lambda) \tau_a(\lambda) \left(\frac{D_1}{2l} \right)^2. \quad (4.39)$$

Следовательно, в пределах конуса B облучённость на оптической оси, **зависит** от расстояния l от выходного зрачка до данного сечения.

Как же изменяется облучённость в сечениях, перпендикулярных оптической оси?

Из рисунка 4.8 следует, что если источник имеет равномерную по площади энергетическую яркость, то облучённость в сечениях, перпендикулярных оптической оси, уменьшается от точки, лежащей на оптической оси к его краю. При этом наиболее сильно влияющим фактором является виньетирование пучков.

В пределах конуса A виньетирование отсутствует.

Из рисунка 4.8 следует, что для сечений, удалённых от выходного зрачка на расстояние l , диаметр круга, в пределах которого виньетирование отсутствует, можно найти из соотношения:

$$D_{\text{ПА}} = D_1 - \frac{D_{\text{ист}}}{-f_1} l. \quad (4.40)$$

Изменение облучённости в пределах круга диаметром $D_{\text{ПА}}$ описывается выражением (4.2) и для малых углов β' может считаться несущественным.

За пределами зоны A (круга диаметром $D_{\text{ПА}}$) величина виньетирования изменяется, и облучённость монотонно уменьшается до нуля. Распределение облучённости $E_e(y)$ в сечении показано на рисунке 4.8.

В пределах конуса B величина виньетирования не равна нулю, но в пределах круга диаметром $D_{\text{ПВ}}$, перпендикулярного оптической оси, она постоянна, поэтому и облучённость в пределах этого круга тоже постоянна.

Из рисунка 4.8 следует, что для сечений, удалённых от выходного зрачка на расстояние l , диаметр круга $D_{ПВ}$, в пределах которого виньетирование отсутствует, можно найти из соотношения:

$$D_{ПВ} = \frac{D_{ист}}{-f_1} \cdot l - D_1 \quad (4.41)$$

Изменение облучённости в пределах круга диаметром $D_{ПВ}$ описывается выражением (4.2) и для малых углов β' может считаться несущественным.

За пределами зоны B (круга диаметром $D_{ПВ}$) величина виньетирования изменяется, и облучённость монотонно уменьшается до нуля. Распределение облучённости $E_e(y)$ в сечении показано на рисунке 4.8.

4.2.3 Энергетический расчёт оптико-электронного прибора, построенного по встречной коллиматорной схеме

Рассчитаем поток излучения, падающего на фотоприёмник, в оптической системе, изображённой на рисунке 4.7.

Рассмотрим случай, когда входной зрачок объектива приёмного устройства находится в заштрихованной зоне A в пределах пятна равномерной облучённости (рис. 4.8).

Спектральная плотность потока излучения, приходящего на входной зрачок приёмного устройства, может быть рассчитана как произведение спектральной плотности облучённости $E_{e,\lambda,2}(\lambda)$ (выражение (4.38)) на площадь входного зрачка объектива приёмного устройства A_2 , ($A_2 = \pi(D_2^2/4)$).

Для того чтобы рассматриваемый ОЭП выполнял функцию измерения взаимного положения объектов, площадь фотоприёмника должна быть больше размера изображения источника на его чувствительной площадке. Более того, при всех возможных линейных и угловых перемещениях объектов изображение источника не должно выходить за пределы чувствительной площадки. В этом случае спектральная плотность потока излучения $\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda)$, падающего на фотоприёмник:

$$\begin{aligned} \Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) &= E_{e,\lambda,2}(\lambda) \cdot A_2 \cdot \tau_{п}(\lambda) \approx \\ &\approx \pi \cdot L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_{к}(\lambda) \tau_{а}(\lambda) \tau_{п}(\lambda) \left(\frac{D_{ист}}{-2f_1} \right)^2 \pi \left(\frac{D_2^2}{4} \right), \end{aligned} \quad (4.42)$$

где $\tau_{\text{п}}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания объектива приёмного устройства.

Выражение (4.42) можно представить в виде:

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = L_{e,\lambda,1}(\lambda)\tau_{\text{к}}(\lambda)\tau_{\text{а}}(\lambda)\tau_{\text{п}}(\lambda) \frac{A_{\text{ист}}A_2}{f_1^2}. \quad (4.43)$$

Поток излучения на фотоприёмнике:

$$\begin{aligned} \Phi_{e,2} &= \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) d\lambda = \\ &= \frac{A_{\text{ист}}A_2}{f_1^2} \int_0^{\infty} L_{e,\lambda,1}(\lambda)\tau_{\text{к}}(\lambda)\tau_{\text{а}}(\lambda)\tau_{\text{п}}(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (4.44)$$

Если используется матричный фотоприёмник, то необходимо рассчитать облучённость в пятне засветки. Для этого необходимо величину потока $\Phi_{e,2}$ разделить на площадь изображения источника.

Соотношение диаметров источника излучения $D_{\text{ист}}$ и его изображения на фоточувствительной площадке $D_{\text{из}}$ (рис.4.7) можно найти из пропорции:

$$\frac{D_{\text{из}}}{f'_2} = \frac{D_{\text{ист}}}{-f_1}. \quad (4.45)$$

Соотношение площадей источника излучения и его изображения:

$$A_{\text{из}} = A_{\text{ист}} \left(\frac{f'_2}{-f_1} \right)^2. \quad (4.46)$$

где $A_{\text{ист}}$ – площадь источника, $A_{\text{ист}} = \pi(D_{\text{ист}}^2/4)$, $A_{\text{из}}$ – площадь его изображения, $A_{\text{из}} = \pi(D_{\text{из}}^2/4)$.

Из выражений (4.43) и (4.46) следует, что спектральная плотность облучённости в изображении источника на чувствительной площадке фотоприёмника:

$$E_{e,\lambda,\text{п}}(\lambda) = \frac{\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda)}{A_{\text{из}}} = L_{e,\lambda,1}(\lambda)\tau_{\text{к}}(\lambda)\tau_{\text{а}}(\lambda)\tau_{\text{п}}(\lambda) \frac{A_2}{f'^2_2}. \quad (4.47)$$

Выражение (4.43) можно также представить в виде:

$$E_{e,\lambda,\text{п}}(\lambda) = \frac{\pi}{4} L_{e,\lambda,1}(\lambda)\tau_{\text{к}}(\lambda)\tau_{\text{а}}(\lambda)\tau_{\text{п}}(\lambda) \left(\frac{D_2}{f'_2} \right)^2. \quad (4.48)$$

Из выражений (4.44) и (4.46) следует, что облучённость в изображении источника на чувствительной площадке фотоприёмника:

$$E_{e,\pi} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_2}{f'_2} \right)^2 \int_0^\infty L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_k(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_\pi(\lambda) d\lambda . \quad (4.49)$$

Рассмотрим случай, когда входной зрачок объектива приёмного устройства находится в заштрихованной зоне B ($l > p'_0$) в пределах пятна равномерной облучённости (рис. 4.8).

В этом случае расстояние между передающим и приёмным устройствами относительно велико ($l > f'_2$), и для передающего устройства более подходящим является термин "прожектор" по сравнению с термином "коллиматор".

Из анализа, выполненного в п. 4.2.2, и хода лучей, представленного на рисунке 4.8, следует, что источник излучения ИИ виньетируется оправой объектива Об1 передающего устройства (прожектора), поэтому, с учётом соотношения ($l > f'_2$), на чувствительной площадке формируется изображение выходного зрачка объектива Об1, а не изображение источника, как в ранее рассмотренном случае.

Соотношение диаметров выходного зрачка объектива D_1 и его изображения на фоточувствительной площадке $D_{из}$ (рис.4.7) можно найти из пропорции:

$$\frac{D_{из}}{f'_2} = \frac{D_1}{l} . \quad (4.50)$$

Соотношение площадей выходного зрачка объектива и его изображения:

$$A_{из} = A_1 \left(\frac{f'_2}{l} \right)^2 . \quad (4.51)$$

где A_1 – площадь выходного зрачка объектива, $A_1 = \pi(D_1^2/4)$, $A_{из}$ – площадь его изображения, $A_{из} = \pi(D_{из}^2/4)$.

Спектральная плотность потока излучения, приходящего на входной зрачок приёмного устройства, может быть рассчитана как произведение спектральной плотности облучённости $E_{e,\lambda,2}(\lambda)$ (выражение (4.39)) на площадь входного зрачка объектива приёмного устройства A_2 , ($A_2 = \pi(D_2^2/4)$).

В этом случае спектральная плотность потока излучения $\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda)$, падающего на фотоприёмник:

$$\begin{aligned}\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) &= E_{e,\lambda,2}(\lambda) \cdot A_2 \cdot \tau_{\text{п}}(\lambda) \approx \\ &\approx \pi \cdot L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_{\text{к}}(\lambda) \tau_{\text{а}}(\lambda) \tau_{\text{п}}(\lambda) \left(\frac{D_1}{2l}\right)^2 \pi \left(\frac{D_2^2}{4}\right),\end{aligned}\quad (4.52)$$

Выражение (4.52) можно представить в виде

$$\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) = L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_{\text{к}}(\lambda) \tau_{\text{а}}(\lambda) \tau_{\text{п}}(\lambda) \frac{A_1 A_2}{l^2}. \quad (4.53)$$

Поток излучения на фотоприёмнике:

$$\begin{aligned}\Phi_{e,2} &= \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda,2}(\lambda) d\lambda = \\ &= \frac{A_1 A_2}{l^2} \int_0^{\infty} L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_{\text{к}}(\lambda) \tau_{\text{а}}(\lambda) \tau_{\text{п}}(\lambda) d\lambda.\end{aligned}\quad (4.54)$$

Из выражений (4.52) и (4.53) следует, что спектральная плотность облучённости в изображении источника на чувствительной площадке фотоприёмника:

$$E_{e,\lambda,\text{п}}(\lambda) = \frac{\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda)}{A_{\text{из}}} = L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_{\text{к}}(\lambda) \tau_{\text{а}}(\lambda) \tau_{\text{п}}(\lambda) \frac{A_2}{f'_{2^2}}. \quad (4.55)$$

Или

$$E_{e,\lambda,\text{п}}(\lambda) = \frac{\Phi_{e,\lambda,2}(\lambda)}{A_{\text{из}}} = \frac{\pi}{4} L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_{\text{к}}(\lambda) \tau_{\text{а}}(\lambda) \tau_{\text{п}}(\lambda) \left(\frac{D_2}{f'_{2}}\right)^2. \quad (4.56)$$

Из выражения (4.56) следует, что облучённость в изображении источника на чувствительной площадке фотоприёмника:

$$E_{e,\text{п}} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_2}{f'_{2}}\right)^2 \int_0^{\infty} L_{e,\lambda,1}(\lambda) \tau_{\text{к}}(\lambda) \tau_{\text{а}}(\lambda) \tau_{\text{п}}(\lambda) d\lambda. \quad (4.57)$$

Выражения для расчёта спектральной плотности энергетической яркости ряда источников излучения приведены в разделе 3.

Анализ выражений для потока излучения (4.54) на фотоприёмнике и облучённости (4.57) в пятне показывает, что облучённость $E_{e,\lambda,\text{п}}(\lambda)$ не зависит от расстояния l между объективом коллиматора (прожектора), а величина потока обратно пропорциональна l^2 .

Вопросы по 4 разделу

1. Объясните по рисунку 4.1 принцип работы оптико-электронного прибора для непосредственной регистрации оптического излучения. В каких приборах обычно реализуется такая схема?
2. Что можно рассматривать в качестве полевой диафрагмы при анализе схемы приёмного устройства оптико-электронного прибора?
3. Какие параметры оптической схемы и среды распространения излучения учитываются при расчёте облучённости в плоскости анализа прибора?
4. В чем отличия формул для расчёта формируемой объективом облучённости для реального и ламбертовского источников излучения?
5. Влияет ли расстояние между источником излучения и входным зрачком объектива оптико-электронного прибора на величину облучённости в изображении?
6. Как учитывается действие вторичного источника излучения, отражённого от объекта или фона, при расчётах облучённости или освещённости в плоскости изображения?
7. Какой параметр источника оптического излучения непосредственно регистрируется фотоприёмником и участвует в формировании электрического сигнала на его выходе?
8. Какие геометрические соотношения в оптической схеме прибора будут определять методику расчёта потока излучения на чувствительной площадке фотоприёмника?
9. Что понимается под «большим» и «малым» источниками? Приведите примеры.
10. Какова методика расчёта потока излучения на фотоприёмнике для «большого» источника?
11. Какова методика расчёта потока излучения на фотоприёмнике для «малого» источника?
12. Сравните влияние расстояния от объекта до входного зрачка объектива на величину потока в изображении в случаях «большого» и «малого» источников.
13. Объясните по рисунку 4.7 принцип работы оптико-электронного прибора, построенного по встречной коллиматорной схеме. В каких приборах реализуется такая схема?

14. Какие варианты построения схемы прибора возможны в зависимости от параметров коллиматорной системы и расстояния между коллиматором и приёмным устройством?
15. Какие геометрические соотношения встречной коллиматорной схемы прибора характерны для передающей части в виде коллиматора?
16. Приведите примеры приборов, передающая часть которых представляет собой коллиматор.
17. Какие геометрические соотношения встречной коллиматорной схемы прибора характерны для передающей части в виде прожектора?
18. Приведите примеры приборов, передающая часть которых представляет собой прожектор.
19. Объясните по рисунку 4.8 методику учёта расположения плоскости изображения относительно плоскости оформления пучка лучей при расчётах прибора, построенного по встречной коллиматорной схеме.
20. Каковы требования к выбору размера фотоприёмника при энергетическом расчёте прибора, построенного по встречной коллиматорной схеме?
21. На вычислении каких энергетических величин основан энергетический расчёт при использовании в схеме одноэлементных приёмников, матричных приёмников?
22. Сравните влияние расстояния от выходного зрачка передающего объектива схемы до плоскости изображения на величину потока в изображении в пределах конусов А и В.
23. Сравните влияние расстояния от выходного зрачка передающего объектива схемы до плоскости изображения на величину облучённости в изображении в пределах конусов А и В.

5 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОПРИЁМНИКА К ИЗЛУЧЕНИЮ ЦЕЛИ, ПОМЕХИ И ФОНА

5.1 Параметры токов, напряжения и чувствительности фотоприёмника

Для расчёта электрических параметров сигналов от цели, помехи и фона, а также параметров шума на выходе фотоприёмника необходимо знать параметры чувствительности фотоприёмника к излучению цели, помехи и фона.

Параметры каждого фотоприёмника приводятся в его паспорте, который предприятие-производитель прилагает к каждому экземпляру фотоприёмника. Эти параметры и характеристики измеряются на специальных стендах измерительных лабораторий.

Предприятия-изготовители частично публикуют параметры и характеристики выпускаемой продукции на своих сайтах и в других видах рекламных материалов [42, 43].

Эти материалы также публикуют фирмы-продавцы. Объём предоставляемой ими информации, обычно меньше, чем информация производителя.

Однако указанные материалы содержат ограниченный объём информации. В них часто содержатся средние значения параметров и их нижние допустимые границы (например: чувствительность не ниже 0,1 А/Вт).

Измерительные лаборатории предприятий-изготовителей измеряют параметры и характеристики выпускаемых фотоприёмников на своих стендах, которые включают различные источники, набор которых весьма ограничен. Для конкретного вида фотоприёмников, как правило, используется конкретный вид источника. В большинстве случаев это один стенд с одним источником, параметры которого регламентируются нормативной документацией предприятия-изготовителя.

К сожалению, предприятия-изготовители не всегда сообщают параметры источников, по которым они осуществляют аттестацию выпускаемых фотоприёмников.

В связи с этим предприятия-потребители, которые разрабатывают и изготавливают оптико-электронные приборы, вынуждены создавать собственные лаборатории для входного контроля параметров и характеристик поступающих фотоприёмников. При этом их стенды

адаптированы к определению именно тех параметров, которые необходимы при разработке и изготовлении выпускаемых оптико-электронных приборов.

При предварительной оценке параметров сигнала и шума разработчик вынужден опираться на те параметры, которые приводят предприятия-изготовители фотоприёмников.

Разрабатываемая аппаратура ориентирована на применение различных источников излучения в соответствии с её назначением.

Соответственно, разработчик аппаратуры должен знать параметры чувствительности фотоприёмника к излучению объекта (цели), фона и помех в реальных условиях эксплуатации. При этом параметры излучения этих источников могут изменяться в процессе эксплуатации.

Спектральная характеристика чувствительности конкретного фотоприёмника зависит от ряда факторов, в том числе от температуры, от излучения фона, но в некоторых пределах этих параметров она может приниматься за относительно неизменную.

Параметры токов, напряжения и чувствительности фотоприёмников определены ГОСТ Р 59605—2021 [44].

Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик фотоприёмников определены ГОСТ Р 59607—2021 [45].

Анализ весьма ограниченной информации, содержащейся на сайтах зарубежных производителей, показывает, что система параметров и характеристик, а также методы их измерения аналогичны.

Схема преобразования параметров оптического излучения в параметры напряжений и токов в фотоприёмнике показана на рисунке 5.1.

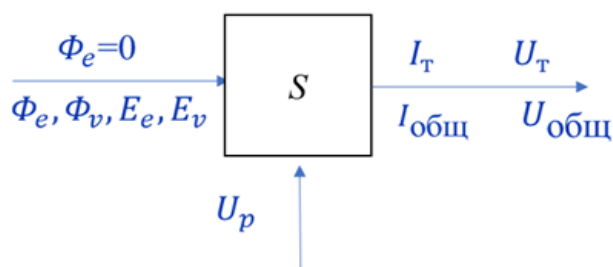


Рисунок 5.1 – Схема преобразования параметров оптического излучения в параметры напряжений и токов в фотоприёмнике

При подключении рабочего напряжения U_p к цепи питания фотоприёмника, но при отсутствии потока излучения на входе

фотоприёмника, на выходе фотоприёмника возникают темновой ток I_T и соответствующие темновое напряжение U_T .

При воздействии на вход фотоприёмника постоянного оптического излучения, характеризуемого одним из параметров $(\Phi_e, \Phi_v, E_e, E_v)$, общий ток $I_{\text{общ}}$ и общее напряжение $U_{\text{общ}}$ складываются из темновых величин (I_T, U_T) , а также фототока I_ϕ и соответствующего напряжения U_ϕ :

$$I_{\text{общ}} = I_T + I_\phi, \quad U_{\text{общ}} = U_T + U_\phi. \quad (5.1)$$

Фототок I_ϕ и напряжение U_ϕ не существуют в отрыве от темновых величин (I_T, U_T) . Их невозможно измерить отдельно. Сначала, при отсутствии оптического излучения $(\Phi_e = 0)$, измеряют величины I_T и U_T , а потом на фотоприёмник направляют оптическое излучение, характеризуемое одним из параметров $(\Phi_e, \Phi_v, E_e, E_v)$, и измеряют величины $I_{\text{общ}}$ и $U_{\text{общ}}$.

Фототок I_ϕ и напряжение U_ϕ рассчитывают в соответствии с выражениями:

$$I_\phi = I_{\text{общ}} - I_T, \quad U_\phi = U_{\text{общ}} - U_T. \quad (5.2)$$

Чувствительностью фотоприёмника называется отношение изменения электрической величины (y) на выходе фотоприёмника, вызванного падающим на него излучением, к количественной характеристике этого излучения (x):

$$S_{p,q} = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (5.3)$$

где p определяет электрическую величину Δy – реакцию фотоприёмника (напряжение фотосигнала U_c или ток фотосигнала I_c); q определяет характеристику падающего излучения x (Φ_e, Φ_v, E_e или E_v). Набор этих параметров определяется возможностями и методами измерений, а также метрологическим обеспечением, установленным ГОСТ Р 59607—2021 [45].

Из выражения (5.3) следуют выражения для конкретных параметров, установленных ГОСТ Р 59605—2021 [44]:

- токовая чувствительность к потоку излучения

$$S_{I,\Phi_e} = \frac{I}{\Phi_e}, \quad [\text{A/Вт}]; \quad (5.4)$$

- вольтовая чувствительность к потоку излучения

$$S_{U,\Phi_e} = \frac{U}{\Phi_e} , [B/Вт]; \quad (5.5)$$

- токовая чувствительность к световому потоку

$$S_{I,\Phi_v} = \frac{I}{\Phi_v} , [A/лм]; \quad (5.6)$$

- вольтовая чувствительность к световому потоку

$$S_{U,\Phi_v} = \frac{U}{\Phi_v} , [B/лм]; \quad (5.7)$$

- токовая чувствительность к облучённости

$$S_{I,E_e} = \frac{I}{E_e} , [A/(Вт/м^2)]; \quad (5.8)$$

- токовая чувствительность к освещённости

$$S_{I,E_v} = \frac{I}{E_v} , [A/лк]. \quad (5.9)$$

Индексы I , U , Φ_e , Φ_v , E_e , E_v допускается не указывать, если исключается возможность различного толкования величин.

Связь между вольтовой S_U и токовой S_I чувствительностью фотоприёмника зависит от принципа его действия, но, как правило, имеет вид:

$$S_U = R_n \cdot S_I , \quad (5.10)$$

где R_n – сопротивление нагрузки фотоприёмника.

Чувствительность фотоприёмника к немонахроматическому излучению сложного спектрального состава называется **интегральной** (например $S_{I,\Phi_e, \text{инт}}$, A/Вт), а к монохроматическому потоку излучения – **монохроматической чувствительностью** (например, S_{λ,I,Φ_e} , A/Вт).

Зависимость $S_\lambda(\lambda)$ монохроматической чувствительности фотоприёмника от длины волны регистрируемого излучения называется **спектральной характеристикой чувствительности** фотоприёмника.

Монохроматическая и интегральная чувствительности фотоприёмника связаны следующим образом [12]:

$$S_{\text{инт},\Phi} = \frac{\int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda} . \quad (5.11)$$

где $S_{\text{инт,Ф}}$ – чувствительность фотоприёмника к излучению сложного спектрального состава; $S_{\lambda}(\lambda)$ – спектральная характеристика чувствительности фотоприёмника; $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности потока излучения по длинам волн. Выражение (5.11) справедливо как для токовой, так и для вольтовой чувствительности [12].

Из выражения (5.11) следует, что интегральная чувствительность фотоприёмников $S_{\text{инт,Ф}}$ существенно зависит от спектрального состава излучения $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ и спектральной характеристики чувствительности $S_{\lambda}(\lambda)$.

Отношение распределения потока излучения $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ в числителе и знаменателе выражения (5.11) может быть заменено на отношение относительных распределений потока $\varphi_{\lambda}(\lambda)$

$$S_{\text{инт,Ф}} = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_{\lambda}(\lambda) S_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{\lambda}(\lambda) d\lambda} . \quad (5.12)$$

где $\varphi_{\lambda}(\lambda)$ – относительное распределение спектральной плотности потока излучения по длинам волн (2.43).

Из выражений (5.11) и (5.12) следует, что чувствительность фотоприёмника к излучению $\Phi_{\lambda}^I(\lambda)$, по которому производилась его аттестация на предприятии-изготовителе, и его чувствительность к излучению $\Phi_{\lambda}^{II}(\lambda)$ в разрабатываемом оптико-электронном приборе различны, причём часто – существенно различны.

В технической документации на фотоприёмники, как правило, приводится абсолютная спектральная характеристика его чувствительности $S_{\lambda}(\lambda)$ (рис. 5.2) или относительная спектральная характеристика чувствительности $s(\lambda)$:

$$s(\lambda) = \frac{S_{\lambda}(\lambda)}{S_{\lambda_{\text{max}}}} , \quad (5.13)$$

где $S_{\lambda_{\text{max}}}$ – максимальное значение спектральной характеристики чувствительности фотоприёмника на длине волны излучения λ_{max} .

Пример относительной спектральной характеристики чувствительности $s(\lambda)$ приведён на рис. 5.3а.

Сравнение спектральных характеристик фотоприёмников (рис 5.2 и рис. 5.3а) на основе InGaAs позволяет оценить элементы сходства и отличия продукции различных производителей и разных технологий.

На рис. 5.3 приведены характеристики матрицы SWIR-диапазона IMX990/IMX991 [47].

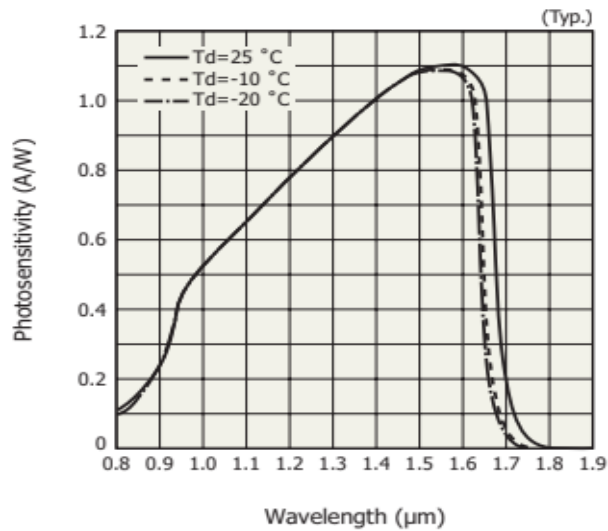


Рисунок 5.2 – Спектральная характеристика чувствительности $S_{\lambda}(\lambda)$ InGaAs PIN-фотодиода HAMAMATSU серии g12180 [46]

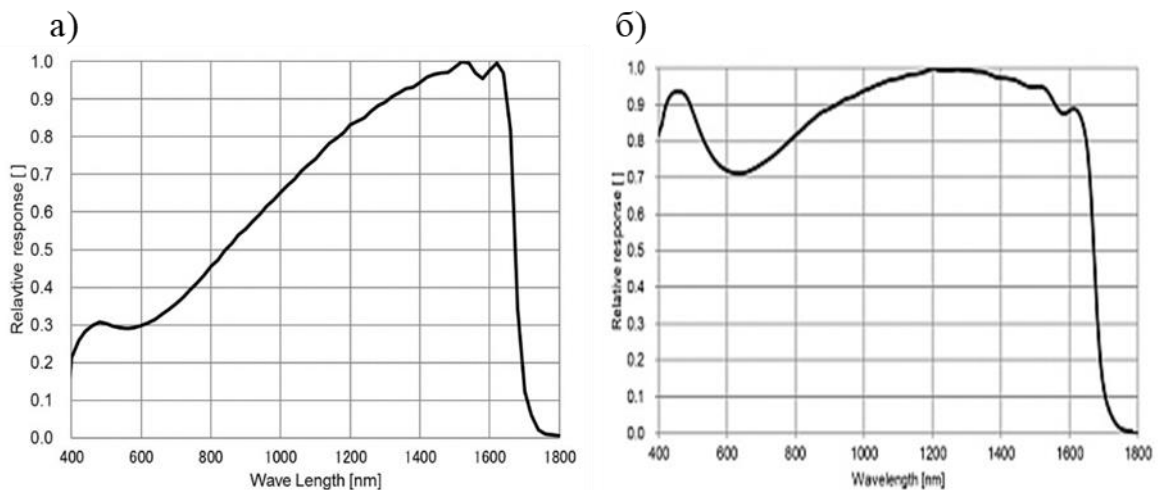


Рисунок 5.3 – Относительная спектральная характеристика чувствительности $s(\lambda)$ и относительная спектральная характеристика квантовой эффективности $\eta_{\lambda}(\lambda)$ матричного фотоприёмника SWIR-диапазона IMX990/IMX991 Sony на основе InGaAs [47]

5.2 Квантовая эффективность и чувствительность фотоприёмников

Чувствительность фотоприёмника определяется его квантовой эффективностью η . **Квантовая эффективность** - физическая величина, равная отношению среднего числа фотонов, поглощение которых вызвало образование квазичастиц, к общему числу поглощённых фотонов:

$$\eta = \frac{\bar{n}_3}{n_{\text{фот}}} , \quad (5.14)$$

где \bar{n}_3 – число фотонов, поглощение которых вызвало образование квазичастиц (среднее число зарядов); $\overline{n_{\text{фот}}}$ – общее число поглощённых фотонов (среднее число фотонов).

Квантовая эффективность η зависит от длины волны оптического излучения. Она всегда меньше единицы.

Как и другие зависящие от длины волны величины, она характеризуется **спектральной характеристикой квантовой эффективности $\eta_\lambda(\lambda)$** ,

Пример спектральной характеристики квантовой эффективности $\eta_\lambda(\lambda)$ фотоприёмников приведён на рис. 5.3б.

Из выражений (2.18), (5.4), (5.13) и (5.14) следует, что связь спектральной характеристики чувствительности фотоприёмника и спектральной характеристики его квантовой эффективности [12,] имеет вид:

$$S_{I,e,\lambda}(\lambda) = \eta_\lambda(\lambda) \frac{e \lambda}{h c} , \quad \left[\frac{\text{А}}{\text{Вт}} \right] , \quad (5.15)$$

где $S_{I,e,\lambda}(\lambda)$ – спектральная характеристика токовой чувствительности фотоприёмника к потоку излучения; $\eta_\lambda(\lambda)$ – спектральная характеристика квантовой эффективности фотоприёмника; e – заряд электрона, $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл ; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме, $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

Параметры и характеристики квантовой эффективности часто используются применительно к матричным фотоприёмникам [6, 12, 48].

Среднее число носителей заряда, образующихся в одном элементе (пикселе) матричного фотоприёмника за время накопления t_n под воздействием энергии излучения $Q_{e,\lambda} \Delta\lambda$, приходящейся на узкий спектральный интервал $\Delta\lambda$, будет определяться выражением [48]:

$$\begin{aligned} \bar{n}_{3\Delta\lambda} &= \frac{\eta_\lambda}{Q_p} Q_{e,\lambda} \Delta\lambda = \frac{\eta_\lambda \lambda}{h c} t_n \Phi_{e,\lambda} \Delta\lambda = \\ &= \frac{\eta_\lambda \lambda}{h c} t_n A_{\text{пикс}} E_{e,\lambda} \Delta\lambda = \frac{\eta_\lambda \lambda}{h c} A_{\text{пикс}} H_{e,\lambda} \Delta\lambda , \end{aligned} \quad (5.16)$$

где $Q_{e,\lambda}$ – спектральная плотность энергии излучения, падающего на фотоприёмник (пиксел фотоприёмника) за время накопления t_n ,

$Q_{e,\lambda} = \Phi_{e,\lambda} \cdot t_n$; Q_p – энергия кванта; $\Phi_{e,\lambda}$ – спектральная плотность потока излучения, падающего на фотоприёмник (пиксел фотоприёмника) за время накопления t_n ; $E_{e,\lambda}$ – спектральная плотность облучённости на фотоприёмнике (пикселе фотоприёмника), $\Phi_{e,\lambda} = E_{e,\lambda} \cdot A_{\text{пикс}}$; η_λ – спектральная плотность квантовой эффективности фотоприёмника; $A_{\text{пикс}}$ – площадь пиксела фотоприёмника; $H_{e,\lambda}$ – спектральная плотность энергетической экспозиции на фотоприёмнике (пикселе фотоприёмника) за время накопления $H_{e,\lambda} = E_{e,\lambda} t_n$.

Если источник излучения – монохроматический (лазер) с длиной волны λ , то выражение (5.16) принимает вид:

$$\begin{aligned} \bar{n}_{z\lambda} &= \frac{\lambda}{h c} \eta_\lambda Q_e = \frac{\lambda}{h c} \eta_\lambda \Phi_e t_n = \\ &= \frac{\lambda}{h c} \eta_\lambda t_n A_{\text{пикс}} E_e = \frac{\lambda}{h c} \eta_\lambda A_{\text{пикс}} H_e, \end{aligned} \quad (5.17)$$

где Q_e – энергия монохроматического излучения с длиной волны λ , падающего на пиксел за время накопления Δt_n ; Φ_e – поток указанного излучения на пикселе; E_e – облучённость пиксела; H_e – энергетическая экспозиция пиксела за время накопления t_n .

Из выражения (5.16) следует, что число зарядов, образовавшихся под действием немонохроматического излучения за время накопления t_n :

$$\bar{n}_z = \frac{A_{\text{пикс}} t_n}{h c} \int_0^\infty \eta_\lambda(\lambda) \lambda E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (5.18)$$

где $\eta_\lambda(\lambda)$ – спектральная характеристика квантовой эффективности фотоприёмника; $E_{e,\lambda}(\lambda)$ – спектральная характеристика облучённости фотоприёмника (пиксела фотоприёмника).

Из выражения (5.16) следует, что заряд, образующийся в одном элементе матричного фотоприёмника за время накопления t_n под воздействием падающего потока $\Phi_{e,\lambda}(\lambda) \Delta\lambda$, приходящегося на узкий спектральный интервал $\Delta\lambda$, будет определяться выражением

$$\bar{q}_{z\Delta\lambda} = \bar{n}_{z\Delta\lambda} e = \frac{e \lambda}{h c} \eta_\lambda t_n A_{\text{пикс}} E_{e,\lambda} \Delta\lambda. \quad (5.19)$$

Из выражения (5.17) следует, что для монохроматического потока заряд, образующийся за время накопления t_n в одном элементе матричного фотоприёмника

$$\bar{q}_{z\lambda} = \bar{n}_{z\lambda} e = \frac{e \lambda}{h c} \eta_\lambda t_n A_{\text{пикс}} E_e. \quad (5.20)$$

Из выражения (5.18) следует, что для некогерентного потока накопленный за время накопления t_H заряд:

$$\bar{q}_z = \bar{n}_z e = \frac{e A_{\text{пикс}} t_H}{h c} \int_0^{\infty} \eta_{\lambda}(\lambda) \lambda E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda . \quad (5.21)$$

Энергию некогерентного излучения за время накопления t_H можно описать соотношением:

$$Q_e = \int_0^{\infty} E_{e,\lambda}(\lambda) A_{\text{пикс}} t_H d\lambda , \quad [\text{Дж}] \quad (5.22)$$

Из выражений (5.17) (5.15) и (2.18) можно получить зависимость отношения числа зарядов, генерированных фотоприёмником $\bar{n}_{z\lambda}$, к энергии поглощённых фотонов Q_e монохроматического излучения, от длины волны λ :

$$S_{n,Q}(\lambda) = \frac{\bar{n}_{z\lambda}(\lambda)}{Q_e} = \frac{\eta_{\lambda}(\lambda) \lambda}{h c} = \frac{\eta_{\lambda}(\lambda)}{Q_p} = \frac{S_{\lambda,I,e}(\lambda)}{e} , \quad \left[\frac{1}{\text{Дж}} \right], \quad (5.23)$$

Физический смысл характеристики $S_{n,Q}(\lambda)$ – это зависимость количества электронов (зарядов), возникающих в потенциальной яме фотоприёмника за время накопления t_H при поглощении 1 Дж энергии монохроматического излучения в зависимости от длины волны λ .

Характеристика $S_{n,Q}(\lambda)$ и соответствующая величина $S_{n,Q}$ не определены (не предусмотрены) ГОСТ Р 59605—2021 [44].

Максимальное значение спектральной характеристики чувствительности $S_{n,Q}(\lambda)$ можно записать следующим образом [49]:

$$S_{n,Q,\text{макс}} = \frac{S_{\lambda,I,e,\text{макс}}}{e} , \quad \left[\frac{1}{\text{Дж}} \right], \quad (5.24)$$

Из выражений (5.23) и (5.24) следует, что относительное спектральное распределение чувствительности фотоприёмника

$$s_{n,Q}(\lambda) = \frac{S_{n,Q}(\lambda)}{S_{n,Q,\text{макс}}} = \frac{\frac{S_{i,e}(\lambda)}{e}}{\frac{S_{i,e,\text{макс}}}{e}} = s_{i,e}(\lambda) . \quad (5.25)$$

Из выражения (5.25) следует, что относительные спектральные распределения $s_{n,Q}(\lambda)$ и $s_{i,e}(\lambda)$ совпадают.

Из выражений (5.21) (5.15) и (2.18) следует, что для некогерентного излучения отношение количества электронов (зарядов), возникающих в потенциальной яме фотоприёмника, к энергии излучения:

$$S_{n,Q} = \frac{\bar{n}_z}{Q_e} = \frac{S_{i,e}}{e} , \quad \left[\frac{1}{\text{Дж}} \right]. \quad (5.26)$$

Физический смысл величины $S_{n,Q}$ – это количество электронов (зарядов), возникающих при поглощении 1 Дж энергии монохроматического излучения.

5.3 Коэффициент использования фотоприёмником потока излучения

Из определения токовой чувствительности (5.4) следует, что, зная спектральное распределение потока излучения, падающего на фотоприёмник $\Phi_{\lambda,e}(\lambda)$, и спектральную характеристику токовой чувствительности $S_{\lambda,e}(\lambda)$, можно рассчитать фототок на выходе фотоприёмника [12]:

$$\begin{aligned} I_e &= \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,e}(\lambda) S_{\lambda,e}(\lambda) d\lambda = S_{\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,e}(\lambda) s_{\lambda,e}(\lambda) d\lambda \\ &= S_{\lambda_{\max}} \Phi_{\text{эфф}} , \end{aligned} \quad (5.27)$$

где $\Phi_{\text{эфф}}$ – эффективный поток излучения, определяемый соотношением [1, 12]:

$$\Phi_{\text{эфф}} = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,e}(\lambda) s_{\lambda,I,e}(\lambda) d\lambda . \quad (5.28)$$

Выражения (5.27) и (5.28) могут быть записаны также применительно к вольтовой чувствительности $S_{\lambda,U,e}(\lambda)$ и напряжению фотосигнала U_e .

Коэффициентом использования потока излучения со спектральным распределением $\Phi_{\lambda,e}(\lambda)$ фотоприёмником (спектральным КПД фотоприёмника) называется отношение эффективного потока излучения $\Phi_{e,\text{эфф}}$ к падающему на фотоприёмник потоку излучения Φ_e , то есть величина [1, 12]:

$$K = \frac{\Phi_{e,\text{эфф}}}{\Phi_e} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,e}(\lambda) s_{\lambda,e}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,e}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_{\lambda,e}(\lambda) s_{\lambda,e}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{\lambda,e}(\lambda) d\lambda} , \quad (5.29)$$

где $\varphi_{e,\lambda}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения на фотоприёмнике, $s_{\lambda,e}(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприёмника.

Из соотношения монохроматической и интегральной чувствительности фотоприёмника (5.11), соотношения интегральных величин и их спектральных плотностей (2.2), а также выражений (5.27) и (5.29) следует [12]:

$$S_e = \frac{S_{\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,e}(\lambda) s_{\lambda,e}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda,e}(\lambda) d\lambda} = S_{\lambda_{\max}} K \quad (5.30)$$

В качестве примера на рис. 5.4 показаны графики, иллюстрирующие оценку коэффициента использования потоков излучения абсолютно чёрного тела с температурой $T = 2856$ К (источник I) и арсенид-галлиевого светодиода (источник II) фотоприёмником на основе кремния.

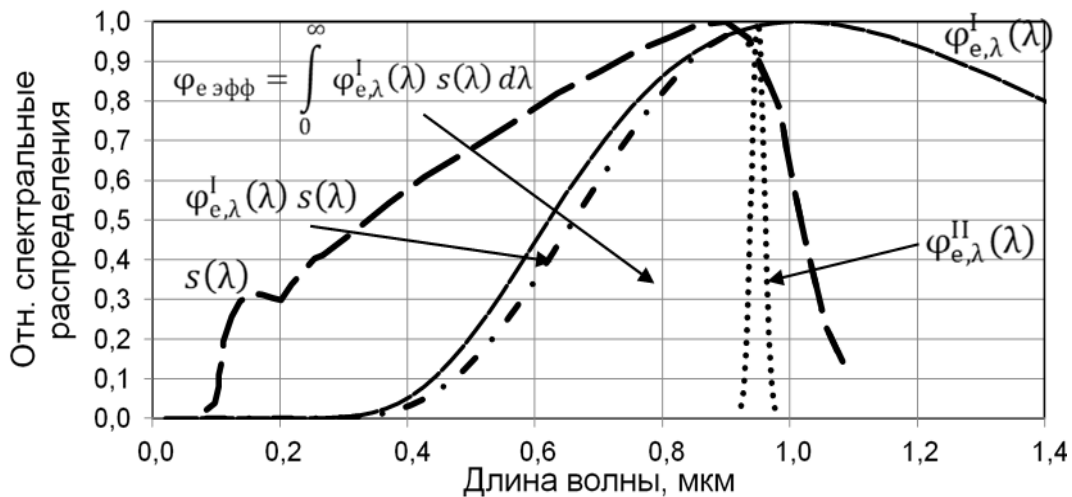


Рисунок 5.4 – К расчёту коэффициента использования кремниевым фотоприёмником излучения абсолютно чёрного тела с температурой ($T = 2856$ К) (источник I) и арсенид-галлиевого светодиода (источник II)

На рис. 5.4 показаны графики относительных спектральных характеристик:

$s(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприёмника на основе Si, которая является типичной для кремниевых фотодиодов;

$\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения абсолютно чёрного тела с температурой $T = 2856$ К, которое может являться моделью излучения электрической лампы накаливания.

Площадь фигуры под произведением $\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) s(\lambda)$ есть относительный эффективный поток $\varphi_{e\text{эфф}} = \int_0^\infty \varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) s(\lambda) d\lambda$, то есть числитель в выражении (5.29).

Площадь фигуры под графиком $\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda)$ есть знаменатель $\int_0^\infty \varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) d\lambda$ в том же выражении (5.29).

Отношение этих интегралов, согласно выражению (5.29), есть коэффициент использования кремниевым фотоприёмником излучения абсолютно чёрного тела с температурой ($T = 2856$ К), который для приведённых на рисунке характеристик составляет $\kappa^I = 0,2$.

На рис. 5.4 также показан график $\varphi_{e,\lambda}^{II}(\lambda)$ относительного спектрального распределения потока излучения арсенид-галлиевого светодиода, длина волны максимального излучения которого $\lambda_{\text{max}} = 0,95$ мкм, а ширина спектра излучения $\Delta\lambda = 0,02$ мкм.

С учётом того, что ширина спектра излучения $\Delta\lambda$ арсенид-галлиевого светодиода существенно уже спектральной характеристики кремниевого фотоприёмника, из выражения (5.29) следует, что $\kappa^{II} \approx 0,9$ (рис.5.4 и 5.5).

Этот пример сочетания источника с узким спектральным интервалом и фотоприёмника с существенно более широкой спектральной характеристикой чувствительности показывает физический смысл величины КПД фотоприёмника (рис. 5.5).

Полученное значение $\kappa^{II} \approx 0,9$ показывает, что сочетание ИК-диода на основе GaAs и фотодиода на основе Si является близким к оптимальному.

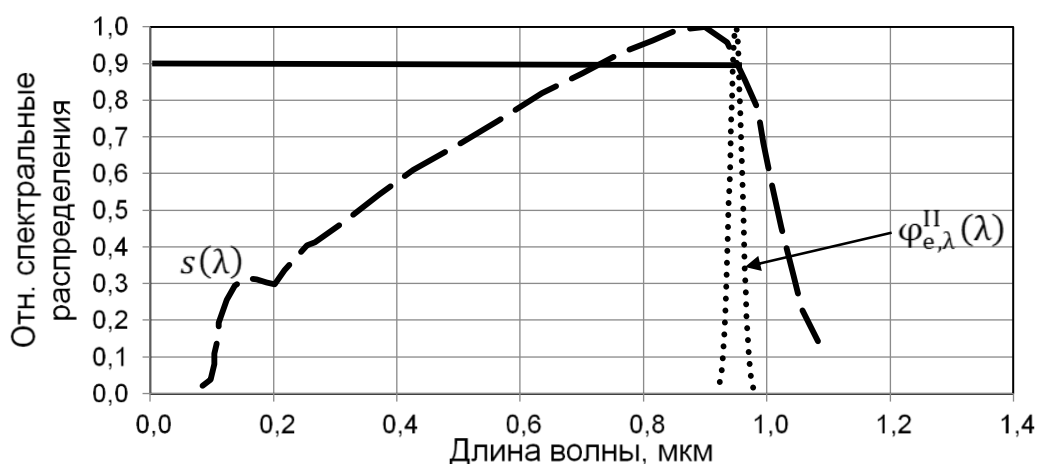


Рисунок 5.5 – К расчёту коэффициента использования кремниевым фотоприёмником излучения источника с узким спектральным интервалом (арсенид-галлиевого светодиода)

Если максимум излучения источника с узким спектральным интервалом совпадает с максимумом спектральной характеристики чувствительности, то $k = 1$.

При выборе сочетания «источник излучения–фотоприёмник» сравнительная оценка коэффициентов использования различных сочетаний является одним из критериев их оптимального выбора.

Вопросы по 5 разделу

1. Какие параметры и характеристики источников и приёмников оптического излучения необходимо знать при выполнении энергетического расчёта оптико-электронного прибора? Где такая информация может быть доступна для проектировщика?
2. При каких внешних воздействиях излучения на вход фотоприёмника (рис.5.1) можно измерить темновой ток, фототок и соответствующие им напряжения?
3. Что такое чувствительность фотоприёмника?
4. От каких факторов зависит спектральная характеристика чувствительности конкретного типа фотоприёмника?
5. Продемонстрируйте с помощью формул и графически различия чувствительности фотоприёмника к эталонному и реальному источнику излучения.
6. Что такое квантовая эффективность фотоприёмника? От чего она зависит?
7. Как связаны квантовая эффективность и чувствительность фотоприёмника?
8. Покажите связь квантовой эффективности матричного приёмника с величиной энергетической экспозиции.
9. Что такое эффективный поток излучения на площадке фотоприёмника? Как он связан с величиной фототока/напряжения?
10. С какой целью выполняется расчёт коэффициента использования фотоприёмником потока излучения?
11. Каков физический смысл величины КПД фотоприёмника? Продемонстрируйте его определение с помощью рис.5.5.
12. Что является критерием оптимального выбора источника и фотоприёмника при энергетическом расчёте оптико-электронного прибора?

6 ШУМ ФОТОПРИЁМНИКА

6.1 Ток и напряжение шума фотоприёмника

Помимо полезного сигнала, в выходной цепи фотоприёмника всегда присутствуют флуктуации общего тока со случайной амплитудой и частотой, называемые шумами фотоприёмника.

Шумы существуют как при наличии, так и при отсутствии фотосигнала, так как они обусловлены физическими процессами, происходящими в фотоприёмнике [1, 12].

Наличие шумов затрудняет обнаружение слабых сигналов, а также приводит к погрешности измерения параметров сигнала: амплитуды, частоты, фазы, момента времени появления импульсов излучения, искажается передаваемая информация [1, 3, 4, 5].

Шумы – процессы случайные, их описывают такими характеристиками, как математическое ожидание (средний уровень шума), среднее квадратическое значение или дисперсия.

Ток шума фотоприёмника $I_{ш.фп.} = \sqrt{\overline{I_{ш.фп.}^2(f)}}$ – среднее квадратическое значение флуктуаций общего тока фотоприёмника в заданной полосе частот Δf [44].

Напряжение шума $U_{ш.фп.} = \sqrt{\overline{U_{ш.фп.}^2(f)}}$ – среднее квадратическое значение флуктуаций напряжения на заданной нагрузке R_n в цепи фотоприёмника в заданной полосе частот Δf [44].

Распределение тока шума и напряжения шума по спектру частот f электрического сигнала на выходе фотоприёмника характеризуют дисперсией тока шума $\overline{I_{ш.фп.}^2(f)}$ или напряжения шума $\overline{U_{ш.фп.}^2(f)}$, приходящейся на единицу полосы частот Δf :

Спектральная плотность дисперсии (мощности) тока шума фотоприёмника на его выходе описывается выражением [12]:

$$D_{fI_{ш.фп.}}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\overline{I_{ш.фп.}^2(f)}}{\Delta f} . \quad (6.1)$$

Спектральная плотность дисперсии (мощности) напряжения шума фотоприёмника на его выходе описывается выражением [12]:

$$D_{fU_{ш.фп}}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\overline{U_{ш.фп.}^2(f)}}{\Delta f} . \quad (6.2)$$

Если спектральная плотность дисперсии (мощности) шума не зависит от частоты, то такой шум называется «белым» [1, 5, 12]. Если шум белый, то выражения (6.1) и (6.2) принимают вид:

$$D_{fI_{ш.фп}} = \frac{\overline{I_{ш.фп.}^2}}{\Delta f} , \quad (6.3)$$

$$D_{fU_{ш.фп}} = \frac{\overline{U_{ш.фп.}^2}}{\Delta f} . \quad (6.4)$$

На рисунке 6.1 показан пример частотного распределения спектральной плотности дисперсии (мощности) шума фотоприёмника.

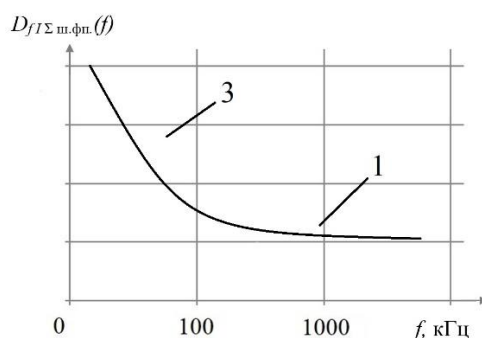


Рисунок 6.1 – Частотное распределение спектральной плотности дисперсии (мощности) шума фотоприёмника [12]

График на рис. 6.1 показывает, что можно выделить области частот, в которых шум можно считать «белым».

6.2 Шумовые и пороговые параметры фотоприёмников

Шумовые и пороговые параметры и характеристики фотоприёмников определены ГОСТ Р 59605—2021 [44]. Предприятия-изготовители приводят их в нормативно-технической документации и публикуют их на своих сайтах. Методы измерений шумовых и пороговых параметров и характеристик фотоприёмников определены ГОСТ Р 59607—2021 [45].

Шумовые и пороговые параметры фотоприёмников приводятся в паспортах и справочниках, как правило, по отношению к излучению того же

источника излучения, что и чувствительность, так как они измеряются на одних и тех же установках в процессе одного эксперимента.

Зарубежные предприятия-изготовители приводят аналогичные параметры и характеристики [42, 43].

Шумовые и пороговые параметры и характеристики фотоприёмников измеряются на тех же установках, что и параметры чувствительности.

Наиболее часто приводятся следующие шумовые и пороговые параметры и характеристики.

Порог чувствительности фотоприёмника Φ_{Π} - значение потока излучения, вызывающего приращение сигнала, равное значению шума [44, 45]:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_I} \quad \text{или} \quad \Phi_{\Pi} = \frac{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_U}, \quad [\text{Вт или лм}] . \quad (6.5)$$

Размерность величины Φ_{Π} зависит от размерности чувствительности, например: S_{Ie} [А/Вт], или S_{Iv} [А/лм].

Из выражения (6.5) следует, что порог чувствительности Φ_{Π} обратно пропорционален чувствительности фотоприёмника S_I или S_U .

Порог чувствительности фотоприёмника в единичной полосе частот $\Phi_{\Pi 1}$ - среднее квадратическое значение первой гармоники, действующего на фотоприёмник модулированного потока излучения источника фотосигнала с заданным спектральным распределением, при котором среднее квадратическое значение первой гармоники напряжения (тока) фотосигнала равно среднему квадратическому значению напряжения (тока) шума, приведённому к единичной полосе на частоте модуляции потока излучения [44].

Англоязычным эквивалентом термина является *noise equivalent power*, общепринятым сокращением которого в литературе на английском языке является *NEP*. Именно так эта величина обозначается на сайтах зарубежных производителей [42, 43].

Из этого определения следует, что порог чувствительности фотоприёмника в единичной полосе частот может быть рассчитан с помощью следующего выражения [12, 44, 45]:

$$\Phi_{\Pi 1} = \frac{\Phi_{\Pi}}{\sqrt{\Delta f_{\text{экв}}}} , \quad \left[\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-\frac{1}{2}} \right] \quad \text{или} \quad \left[\text{лм} \cdot \text{Гц}^{-\frac{1}{2}} \right] , \quad (6.6)$$

где $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$ – эффективная шумовая полоса пропускания измерительного тракта, которая определена следующим выражением [12, 45]:

$$\Delta f_{\text{ЭКВ}} = \int_0^{\infty} [K^2(f)/K_{\text{max}}^2] df, \quad (6.7)$$

здесь $K(f)$ – функция, определяющая зависимость коэффициента усиления селективного усилителя измерительной установки по напряжению от частоты; K_{max} – коэффициент усиления на резонансной частоте.

Размерность величины $\Phi_{\text{П1}}$ зависит от размерности чувствительности, например: А/Вт, или А/лм.

ГОСТ Р 59607—2021 [45] рекомендует производить аттестацию фотоэлектрических полупроводниковых приёмников излучения (ФЭПП) и фотоприёмных устройств (ФПУ) на их основе при частоте модуляции сигнала $f_{\text{мод}} = (800 \pm 12)$ Гц. Эта рекомендация действует в тех случаях, когда ТУ на конкретный тип ФЭПП не предусматривает иных значений $f_{\text{мод}}$.

Удельным порогом чувствительности $\Phi_{\text{П}}^*$ называется порог чувствительности ПОИ, приведённый к единичной полосе частот и единичному по площади фоточувствительному элементу [44, 45]:

$$\Phi_{\text{П}}^* = \frac{\Phi_{\text{П}}}{\sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}, \quad \left[\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{см}^{-1} \right] \text{ или } \left[\text{лм} \cdot \text{Гц}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{см}^{-1} \right], \quad (6.8)$$

где $A_{\text{эфф}}$ – эффективная фоточувствительная площадь фотоприёмника.

Величина, обратная порогу чувствительности фотоприёмника, называется обнаружительной способностью

$$D = \frac{1}{\Phi_{\text{П}}} \quad , \quad \left[\text{Вт}^{-1} \right] \text{ или } \left[\text{лм}^{-1} \right] \quad , \quad (6.9)$$

$$D_1 = \frac{1}{\Phi_{\text{П1}}} \quad , \quad \left[\text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{\frac{1}{2}} \right] \text{ или } \left[\text{лм}^{-1} \cdot \text{Гц}^{\frac{1}{2}} \right] \quad . \quad (6.10)$$

К сожалению, эти величины иногда не разграничивают, и это вносит неопределённость в тексты статей и в техническую документацию, поэтому читателю приходится ориентироваться на различие размерности величин.

Величина, обратная удельному порогу чувствительности фотоприёмника называется удельной обнаружительной способностью:

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{\text{П}}^*} = \frac{\sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\Phi_{\text{П}}}, \quad \left[\text{Вт}^{-1} \text{Гц}^{\frac{1}{2}} \text{см} \right] \text{ или } \left[\text{лм}^{-1} \text{Гц}^{\frac{1}{2}} \text{см} \right]. \quad (6.11)$$

Из выражений (6.5), (6.9), (6.10) и (6.11) следует, что параметры обнаружительной способности прямо пропорциональны чувствительности фотоприёмника S_I или S_U :

$$D = \frac{S_I}{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad \text{или} \quad D = \frac{S_U}{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}, \quad [\text{Вт}^{-1}] \quad \text{или} \quad [\text{лм}^{-1}] \quad (6.12)$$

$$D_1 = \frac{S_I \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}}}{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad \text{или} \quad D_1 = \frac{S_U \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}}}{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} & \left[\text{Вт}^{-1} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}} \right] \quad \text{или} \quad \left[\text{лм}^{-1} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}} \right], \\ D^* &= \frac{S_I \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad \text{или} \quad D^* = \frac{S_U \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}, \quad (6.14) \\ & \left[\text{Вт}^{-1} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{см} \right] \quad \text{или} \quad \left[\text{лм}^{-1} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{см} \right]. \end{aligned}$$

Чувствительность фотоприёмника в выражениях (6.12), (6.13), (6.14) может быть как по отношению к некогерентному излучению, то есть интегральная (S_I или S_U), так и к когерентному излучению ($S_{\lambda I}$ или $S_{\lambda U}$). В этом случае можно говорить, например, о когерентной удельной обнаружительной способности:

$$D_{\lambda} = \frac{S_{\lambda I}}{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad \text{или} \quad D_{\lambda} = \frac{S_{\lambda U}}{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}, \quad (6.15)$$

$$D_{\lambda 1} = \frac{S_{\lambda I} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}}}{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad \text{или} \quad D_{\lambda 1} = \frac{S_{\lambda U} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}}}{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}, \quad (6.16)$$

$$D_{\lambda}^* = \frac{S_{\lambda I} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad \text{или} \quad D_{\lambda}^* = \frac{S_{\lambda U} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}. \quad (6.17)$$

где D_{λ}^* – когерентная удельная обнаружительная способность фотоприёмника, $\text{Вт}^{-1} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{см}$ или $\text{лм}^{-1} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{см}$.

Размерность параметров когерентной удельной обнаружительной способности D_{λ} , $D_{\lambda 1}$, D_{λ}^* в выражениях (6.15), (6.16), (6.17) аналогична размерностям в выражениях (6.9), (6.10), (6.11)

Производители фотоприёмников [42, 43] приводят значения монохроматической удельной обнаружительной способности D_{λ}^* на своих сайтах [50, 51] для различных длин волн, но чаще приводят значения удельной обнаружительной способности для длины волны максимальной чувствительности λ_{\max} :

$$D_{\lambda_{\max}}^* = \frac{S_{\lambda_{\max I}} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad \text{или} \quad D_{\lambda_{\max}}^* = \frac{S_{\lambda_{\max U}} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}. \quad (6.18)$$

Из выражения (6.17) и определения спектральной характеристики чувствительности фотоприёмника [44, 45, 12] следует выражение для спектральной характеристики обнаружительной способности:

$$D_{\lambda}^*(\lambda) = \frac{S_{\lambda I}(\lambda) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}} \quad \text{или} \quad D_{\lambda}^*(\lambda) = \frac{S_{\lambda U}(\lambda) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}. \quad (6.19)$$

Пороговые параметры $\Phi_{\text{п}}$, $\Phi_{\text{п1}}$, $\Phi_{\text{п}}^*$ также могут быть выражены по отношению к монохроматическому излучению ($S_{\lambda I}$ или $S_{\lambda U}$).

Из выражений (6.5), (6.6), (6.8) следует, что параметры монохроматического порога чувствительности:

$$\Phi_{\lambda \text{п}} = \frac{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda I}} \quad \text{или} \quad \Phi_{\lambda \text{п}} = \frac{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda U}}, \quad (6.20)$$

$$\Phi_{\lambda \text{п1}} = \frac{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda I} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}}} \quad \text{или} \quad \Phi_{\lambda \text{п1}} = \frac{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda U} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}}}, \quad (6.21)$$

$$\Phi_{\lambda}^* = \frac{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda I} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}} \quad \text{или} \quad \Phi_{\lambda}^* = \frac{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda U} \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}} \cdot A_{\text{эфф}}}}. \quad (6.22)$$

Из выражений (6.20), (6.21) и (6.22) следуют соотношения для спектральных характеристик порога чувствительности:

$$\Phi_{\lambda \text{п}}(\lambda) = \frac{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda I}(\lambda)} \quad \text{или} \quad \Phi_{\lambda \text{п}}(\lambda) = \frac{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda U}(\lambda)}, \quad (6.23)$$

$$\Phi_{\lambda \text{п1}}(\lambda) = \frac{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda I}(\lambda) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}}} \quad \text{или} \quad \Phi_{\lambda \text{п1}}(\lambda) = \frac{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda U}(\lambda) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}}}, \quad (6.24)$$

$$\Phi_{\lambda}^*(\lambda) = \frac{\sqrt{I_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda I}(\lambda)\sqrt{\Delta f_{\text{экв}} \cdot A_{\text{эфф}}}} \quad \text{или} \quad \Phi_{\lambda}^*(\lambda) = \frac{\sqrt{U_{\text{ш.фп.}}^2}}{S_{\lambda U}(\lambda)\sqrt{\Delta f_{\text{экв}} \cdot A_{\text{эфф}}}}. \quad (6.25)$$

Из выражения (6.19) следует, что спектральная характеристика обнаружительной способности $D_{\lambda}^*(\lambda)$ пропорциональна спектральной характеристике чувствительности $S_{\lambda}(\lambda)$ (рис. 6.2). Из выражения (6.11) следует, что спектральная характеристика порога чувствительности $\Phi_{\lambda}^*(\lambda)$ является обратной по отношению к функциям $S_{\lambda}(\lambda)$ и $D_{\lambda}^*(\lambda)$ (рис. 6.2). Максимуму чувствительности $S_{\lambda_{\text{max}}}$ и обнаружительной способности $D_{\lambda_{\text{max}}}^*$ соответствует минимальное значение порога чувствительности $\Phi_{\lambda_{\text{п min}}}^*$.

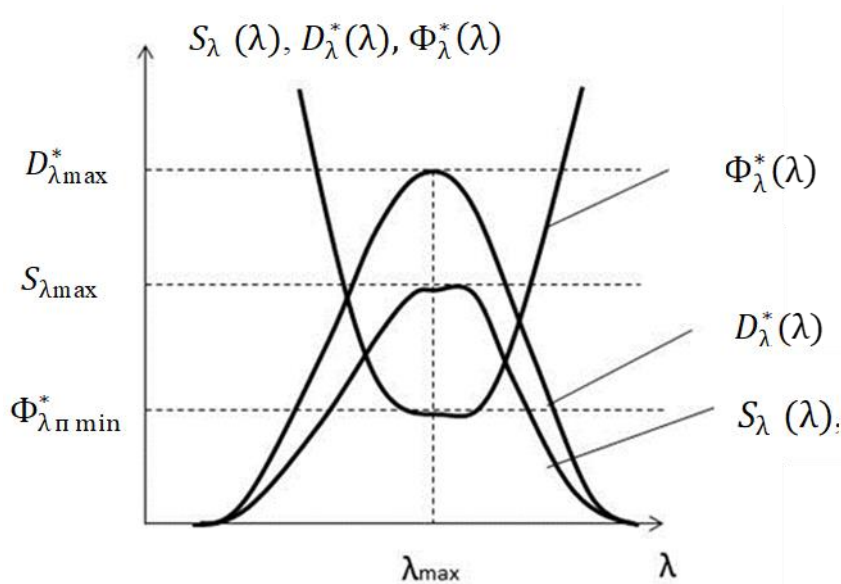


Рисунок 6.2 – Соотношение спектральных характеристик чувствительности фотоприёмника $S_{\lambda}(\lambda)$, удельной обнаружительной способности $D_{\lambda}^*(\lambda)$ и порога чувствительности $\Phi_{\lambda}^*(\lambda)$ [12]

Спектральные характеристики обнаружительной способности $D_{\lambda}^*(\lambda)$ для ряда фотоприёмников приводит, например, на своём сайте Hamamatsu Photonics [51] (рис. 6.3).

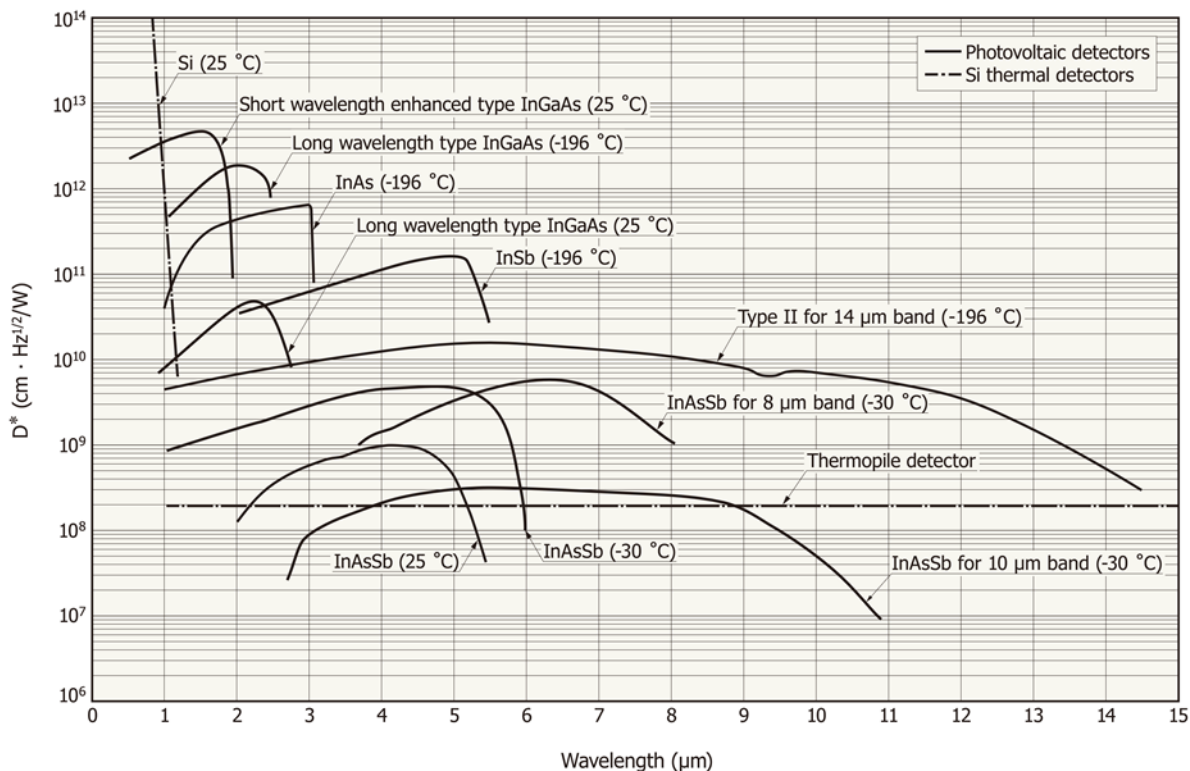


Рисунок 6.3 – Спектральные характеристики обнаружительной способности $D_{\lambda}^*(\lambda)$ ряда фотоприёмников Hamamatsu Photonics [51]

6.3 Квантовый порог чувствительности

В литературе [12] встречается также термин **квантовый порог чувствительности** $\Phi_{p\lambda\Pi}$, который выражается числом квантов (фотонов) монохроматического излучения, падающих в единицу времени на фотоприёмник и вызывающих сигнал, равный шуму.

Из выражений (6.20) и (2.18) следует, что отношение порога чувствительности $\Phi_{e\lambda\Pi}$ к энергии кванта Q_p можно обозначить:

$$\Phi_{p\lambda\Pi} = \frac{\Phi_{e\lambda\Pi}}{Q_p} = \frac{\lambda}{hc} \Phi_{e\lambda\Pi} = \frac{\lambda}{hc} \frac{\sqrt{I_{ш.фп.}^2}}{S_{\lambda I}}. \quad (6.26)$$

Среднее квадратическое значение тока шума фотоприёмника $\sqrt{I_{ш.фп.}^2}$ можно представить как произведение среднего квадратического числа

флуктуаций числа электронов в единицу времени на выходе фотоприёмника $\sqrt{(n_{ш.з.фп.})^2}$, умноженное на заряд электрона e , отнесённое ко времени t :

$$\sqrt{I_{ш.фп.}^2} = \frac{\sqrt{(e n_{ш.з.фп.})^2}}{t} = e \frac{\sqrt{(n_{ш.з.фп.})^2}}{t}. \quad (6.27)$$

Из выражений (6.26), (5.15) и (6.27) следует:

$$\Phi_{р\lambdaп} = \frac{\Phi_{e\lambdaп}}{Q_p} = \frac{\lambda e}{h c S_{\lambda l}} \frac{\sqrt{(n_{ш.з.фп.})^2}}{t} = \frac{\sqrt{(n_{ш.з.фп.})^2}}{\eta_{\lambda} t}, \left[\frac{\text{ФОТОН}}{c} \right]. \quad (6.28)$$

Выражение (6.28) подтверждает, что величина $\Phi_{р\lambdaп}$ отражает число квантов (фотонов) монохроматического излучения, падающих в единицу времени на фотоприёмник и вызывающих сигнал, равный шуму, то есть **квантовый (фотонный) порог чувствительности**.

Из выражения (6.28) следует соотношение между средним квадратическим значением флуктуаций числа электронов в единицу времени и **квантовой пороговой чувствительностью** $\Phi_{р\lambdaп}$:

$$\Phi_{р\lambdaп} \eta_{\lambda} = \frac{\sqrt{(n_{ш.з.фп.})^2}}{t}, \left[\frac{\text{ЭЛЕКТРОН}}{c} \right], \quad (6.29)$$

где $\Phi_{р\lambdaп}$ – квантовый (фотонный) порог чувствительности, число фотонов в секунду; η_{λ} – спектральная плотность квантовой эффективности фотоприёмника на длине волны λ ;

$\left(\sqrt{(n_{ш.з.фп.})^2} / t \right)$ – среднее квадратическое значение флуктуаций числа электронов в единицу времени, (электрон/с),

Из выражения (6.28) следует, что порог чувствительности:

$$\Phi_{e\lambdaп} = \Phi_{р\lambdaп} Q_p = \Phi_{р\lambdaп} \frac{h c}{\lambda}. \quad (6.30)$$

Для фотоприёмников с накоплением заряда:

$$\Phi_{р\lambdaп} = \frac{\Phi_{e\lambdaп}}{Q_p} = \frac{\sqrt{(n_{ш.з.фп.})^2}}{\eta_{\lambda} t_H}, \left[\frac{\text{ФОТОН}}{c} \right]. \quad (6.31)$$

где t_H – время накопления.

6.4 Расчёт параметров тока и напряжения шума на выходе фотоприёмника на основании паспортных данных

В справочной литературе и в паспортах фотоприёмников приводят один из следующих параметров, характеризующих шумы фотоприёмника [44, 45, 12]: порог чувствительности Φ_{Π} (6.5) в заданной полосе частот; порог чувствительности в единичной полосе частот $\Phi_{\Pi 1}$ (6.6); удельный порог чувствительности Φ_{Π}^* (6.8); обнаружительную способность D (6.9); обнаружительную способность в единичной полосе D_1 (6.10); удельную обнаружительную способность D^* (6.11).

Из выражений (6.3), (6.6), (6.8), (6.10) и (6.11) следует, что величина спектральной плотности дисперсии (мощности) тока белого шума фотоприёмника на его выходе может быть рассчитана на основе его паспортных параметров ($S_I, D_1, D^*, \Phi_{\Pi 1}, \Phi_{\Pi}^*$):

$$\begin{aligned} D_{fI_{\text{ш.фп}}} &= \frac{\overline{I_{\text{ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{экв}}} = \left(\frac{S_I}{D_1}\right)^2 = \left(\frac{S_I}{D^*}\right)^2 A_{\text{эфф}} = \\ &= (S_I \Phi_{\Pi 1})^2 = (S_I \Phi_{\Pi}^*)^2 A_{\text{эфф}}. \end{aligned} \quad (6.32)$$

Из выражений (6.4), (6.6), (6.8), (6.10) и (6.11) следует, что величина спектральной плотности дисперсии (мощности) напряжения белого шума фотоприёмника на его выходе может быть рассчитана на основе его паспортных параметров ($S_U, D_1, D^*, \Phi_{\Pi 1}, \Phi_{\Pi}^*$):

$$\begin{aligned} D_{fU_{\text{ш.фп}}} &= \frac{\overline{U_{\text{ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{экв}}} = \left(\frac{S_U}{D_1}\right)^2 = \left(\frac{S_U}{D^*}\right)^2 A_{\text{эфф}} = \\ &= (S_U \Phi_{\Pi 1})^2 = (S_U \Phi_{\Pi}^*)^2 A_{\text{эфф}}. \end{aligned} \quad (6.33)$$

При использовании выражений (6.32) и (6.33) следует подставлять значения интегральной вольтовой S_U и токовой S_I чувствительности, а также шумовых параметров фотоприёмников по отношению к излучению одного источника излучения, например, паспортного.

Из выражений (6.32) и (6.33) следует, что среднее квадратическое значение (СКЗ) тока $I_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{экв}}}$ или напряжения $U_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{экв}}}$ шума фотоприёмника в заданной полосе частот $\Delta f_{\text{экв}}$ электронного тракта на частоте f , может быть найдено с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned}
I_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{ЭКВ}}} &= \left(\frac{S_I}{D_1}\right) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \left(\frac{S_I}{D^*}\right) \sqrt{A_{\text{эфф}} \Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \\
&= (S_I \Phi_{\text{п1}}) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = (S_I \Phi_{\text{п}}^*) \sqrt{A_{\text{эфф}} \Delta f_{\text{ЭКВ}}} ,
\end{aligned}
\tag{6.34}$$

$$\begin{aligned}
U_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{ЭКВ}}} &= \left(\frac{S_U}{D_1}\right) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \left(\frac{S_U}{D^*}\right) \sqrt{A_{\text{эфф}} \Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \\
&= (S_U \Phi_{\text{п1}})^2 \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = (S_U \Phi_{\text{п}}^*) \sqrt{A_{\text{эфф}} \Delta f_{\text{ЭКВ}}} .
\end{aligned}
\tag{6.35}$$

При аттестации фотоприёмников на предприятиях-изготовителях согласно методикам, установленным ГОСТ Р 59607—2021 [45], измеряются именно величины СКЗ тока $I_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{ЭКВ}}}$ или напряжения $U_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{ЭКВ}}}$ шума фотоприёмника в полосе частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$, после чего рассчитываются параметры чувствительности, порога чувствительности и обнаружительной способности.

Вопросы по 6 разделу

1. Какие функции теории случайных процессов, как правило, используются для аналитического описания шумов?
2. Какие электрические величины и функции используются для описания шумов фотоприёмника и электронного тракта прибора?
3. Представьте на рисунке частотное распределение спектральной плотности мощности шумов фотоприёмника. Какие шумы можно считать «белыми»?
4. Какие шумовые и пороговые параметры фотоприёмников определены ГОСТом и их можно найти в справочниках или на сайтах производителей?
5. Что такое порог чувствительности фотоприёмника и как он связан с шумовыми параметрами?
6. На какой частоте рекомендуется проводить аттестацию фотоприёмников на основе внутреннего фотоэффекта?
7. Что такое обнаружительная способность и как она связана с пороговым потоком и чувствительностью фотоприёмника?

8. Прокомментируйте по рис. 6.2 соотношения между спектральными характеристиками обнаружительной способности, порогового потока и чувствительности фотоприёмника.
9. Что такое квантовый порог чувствительности и как он связан с энергией кванта излучения?
10. В каком случае целесообразно использовать понятия квантового порога чувствительности и его производных при анализе шумовых и пороговых характеристик фотоприёмника?
11. Сформулируйте физический смысл квантового (фотонного) порога чувствительности на основе анализа его связи с сигналом и шумом на выходе фотоприёмника.
12. В чем отличие квантового порога чувствительности и квантовой пороговой чувствительностью?
13. Значения какой чувствительности следует использовать при расчёте мощностей белого шума на основе паспортных данных фотоприёмника?
14. Значения шумовых параметров по отношению к какому источнику излучения следует использовать при расчёте мощностей белого шума на основе паспортных данных фотоприёмника?
15. Какие параметры шумов подлежат непосредственному измерению по методикам ГОСТа?

7 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ШУМ ФОТОПРИЁМНИКА ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РАСЧЁТЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

7.1 Паспортные параметры фотоприёмников и их пересчёт при энергетическом расчёте оптико-электронных приборов

Предприятия-изготовители фотоприёмников проводят измерение параметров их чувствительности, порога чувствительности и обнаружительной способности на специальных установках. Состав этих установок, методики измерения параметров для российских предприятий установлен ГОСТ Р 59607—2021 [45]. Некоторые зарубежные фирмы изготовители также сообщают информацию о составе стендов, их параметрах и методиках измерений [50]. В число сообщаемой информации входит информация об источниках излучения, входящих в состав стендов.

ГОСТ Р 59607—2021 рекомендует выбирать «тип источника излучения с учётом параметров испытуемого фотоприёмника, установленных в стандартах или ТУ на фотоприёмники конкретных типов» [45].

ГОСТ Р 59607—2021 рекомендует «применять следующие источники излучения: лампу накаливания с цветовой температурой $T_c = (2856 \pm 100)$ К по ГОСТ 8.023-2014; полный излучатель — излучатели в виде модели АЧТ с температурами полости $T = (500 \pm 2)$ К, $T = (800 \pm 2)$ К, $T = (1000 \pm 5)$ К или $T = (1273 \pm 10)$ К; светодиоды с заданным распределением спектральной яркости» [45].

Практически также используется излучатель с температурой полости $T = 373$ К (температура кипения воды) и другие источники.

На рисунке 7.1 представлены относительные спектральные распределения излучения абсолютно чёрных тел с различными значениями температуры, которые могут быть использованы как модели излучения эталонных излучателей с температурами полости: $T = 500$ К; $T = 800$ К; $T = 1000$ К; $T = 1273$ К.

Кроме того, приведены распределения абсолютно чёрных тел со следующими значениями температуры: $T = 300$ К, температура окружающей среды (27°C); $T = 373$ К, температура кипения воды (100°C); $T = 2856$ К, модель излучения эталонной лампы накаливания; $T = 5800$ К, модель излучения Солнца.

Также приведён график относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$.

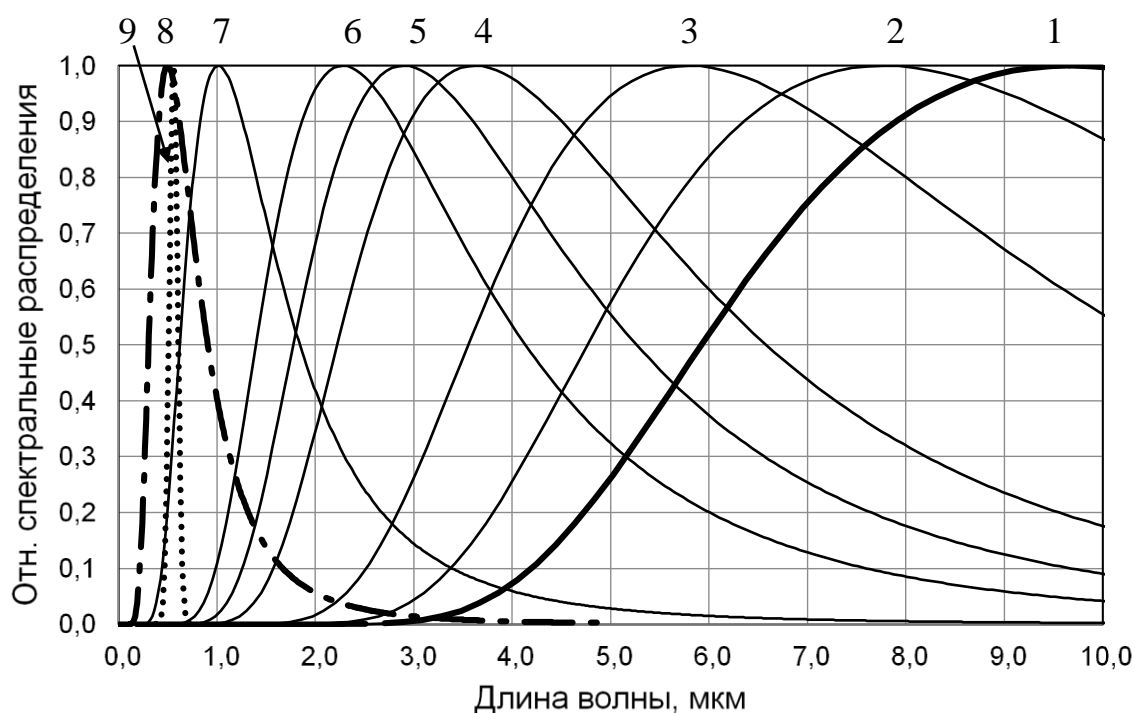


Рисунок 7.1 – Относительные спектральные распределения излучения абсолютно чёрных тел с различными значениями температуры:
 1 – $T = 300$ К, температура окружающей среды (27°C);
 2 – $T = 373$ К, температура кипения воды (100°C);
 3 – $T = 500$ К; 4 – $T = 800$ К; 5 – $T = 1000$ К; 6 – $T = 1273$ К;
 7 – $T = 2856$ К, модель излучения эталонной лампы накаливания;
 8 – $T = 5800$ К, модель излучения Солнца;
 9 – $V(\lambda)$, относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения

Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик фотоэлектрических полупроводниковых приёмников излучения (ФЭПП) и фотоприёмных устройств (ФПУ) на их основе, чувствительных к излучению в диапазоне длин волн от 0,2 до 100 мкм регламентированы ГОСТ Р 59607—2021 [45]. Схема установки для измерения напряжения (тока) фотосигнала и напряжения (тока) шума фотоприёмника согласно ГОСТ Р 59607—2021 [45] приведена на рис. 7.2.

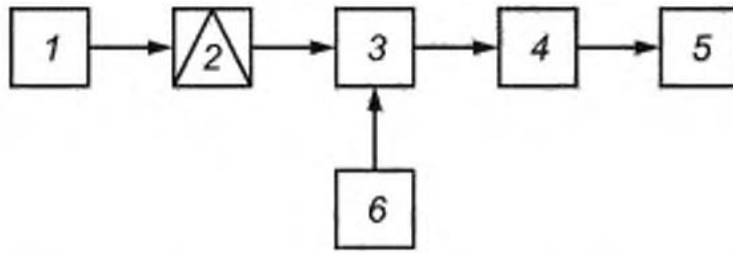


Рисунок 7.2 – Структурная схема установки для измерения напряжения (тока) фотосигнала и напряжения (тока) шума фотоприёмника
 1 — источник излучения; 2 — модулятор; 3 — испытуемый образец;
 4 усилительное устройство; 5 — регистрирующий прибор;
 6 — источник питания испытуемого образца [45]

Производители иногда в числе сведений о фотоприёмнике приводят параметры стендов, на которых выполнялись измерения их параметров и характеристик [52] (рис. 7.3).

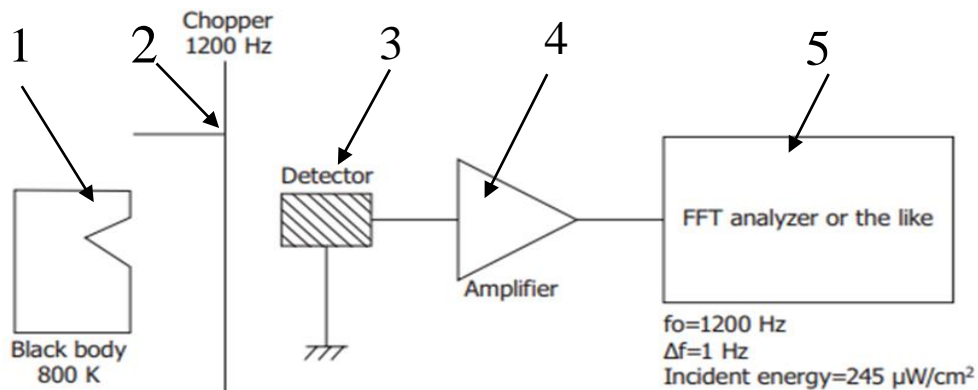


Рисунок 7.3 – Структурная схема установки для измерения напряжения (тока) фотосигнала и напряжения (тока) шума фотоприёмника [52]:
 1 — источник излучения; 2 — модулятор; 3 — испытуемый образец;
 4 усилительное устройство; 5 — устройство быстрого преобразования Фурье или другое устройство обработки сигнала

Чувствительность фотоприёмников, их шумовые и пороговые параметры, измеренные для каждого конкретного изделия, вносятся в его паспорт. Эти значения параметров называются паспортными. Например, в паспорте конкретного фотоприёмника может быть указано: чувствительность к излучению с цветовой температурой $T_{цв} = 500 \text{ K}$, $S = 0,21 \text{ A/Вт}$. Судя по размерности величины, речь идёт об интегральной токовой чувствительности.

В технической документации на конкретный тип выпускаемых фотоприёмников, а также в рекламной информации на сайтах производителей указываются средние значения параметров, а также их предельные (нижние и верхние) значения. Например, указывается: чувствительность к излучению с цветовой температурой $T_{\text{цв}} = 500 \text{ К}$ не ниже $0,1 \text{ А/Вт}$.

Такая запись также означает, что экземпляры с меньшим значением чувствительности подлежат выбраковке.

7.2 Расчёт чувствительности, порога чувствительности и обнаружительной способности фотоприёмника по отношению к излучению заданного источника

При использовании фотоприёмников в составе оптико-электронных приборов спектральный состав излучения, как правило, существенно отличается от спектрального состава указанных «паспортных» источников. Чувствительность к этому излучению также будет отличаться от паспортных значений.

Из выражения (5.11) следует, что при использовании значений параметров фотоприёмников, приводимых в технической документации, в паспортах, в литературе, в информационных ресурсах, следует обратить внимание на вид источников, по которому производилась их аттестация.

При расчёте преобразования сигнала в оптико-электронном приборе необходимо рассчитать чувствительность фотоприёмника к падающему на него излучению.

7.2.1 Пересчёт параметров фотоприёмников, заданных в энергетических величинах по паспортному источнику, к параметрам, заданным в энергетических величинах по произвольному (заданному) источнику

Параметры и характеристики многих фотоприёмников измеряются по отношению к моделям чёрного тела. Из паспорта фотоприёмника известны параметры и характеристики его чувствительности в энергетических величинах S_e^I , например $[\text{А/Вт}]$, порога чувствительности $\Phi_{\text{п,е}}^I$, например $[\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-\frac{1}{2}}]$, и обнаружительной способности D_e^I , например $[\text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{\frac{1}{2}}]$, по отношению к излучению паспортного источника со спектральным распределением излучения $\Phi_\lambda^I(\lambda)$.

По условиям решаемой задачи проектирования оптико-электронного прибора необходимо рассчитать его чувствительность S_e^{II} , например [А/Вт], порог чувствительности $\Phi_{\text{п,е}}^{\text{II}}$, например $[\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-\frac{1}{2}}]$, и обнаружительную способность D_e^{II} , например $[\text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{\frac{1}{2}}]$. в энергетических величинах, по отношению к излучению применяемого в приборе источника со спектральным распределением излучения $\Phi_\lambda^{\text{II}}(\lambda)$.

Рассмотрим соотношения чувствительности к излучению паспортного источника и чувствительности к излучению источника иного спектрального состава.

Из выражения (5.30) следует, что для двух различных источников со спектральными распределениями потоков (от паспортного $\Phi_\lambda^{\text{I}}(\lambda)$ и от заданного $\Phi_\lambda^{\text{II}}(\lambda)$ источников) и одного фотоприёмника со спектральным распределением чувствительности $S(\lambda)$ можно записать выражения [12]:

$$S_{\lambda\text{max}} = \frac{S_e^{\text{I}}}{K^{\text{I}}} \quad S_{\lambda\text{max}} = \frac{S_e^{\text{II}}}{K^{\text{II}}} \quad , \quad (7.1)$$

где $S_{\lambda\text{max}}$ – максимальная спектральная чувствительность фотоприёмника в энергетических величинах (например А/Вт или В/Вт); S_e^{I} – чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника в энергетических величинах (например А/Вт или В/Вт); S_e^{II} – чувствительность фотоприёмника к излучению заданного источника в энергетических величинах (например А/Вт или В/Вт); K^{I} – коэффициент использования фотоприёмником излучения первого (паспортного) источника; K^{II} – коэффициент использования фотоприёмником излучения заданного источника.

Из выражений (7.1) следует, что соотношение чувствительности фотоприёмников к излучению двух различных источников, например паспортного со спектральным распределением потока $\Phi_\lambda^{\text{I}}(\lambda)$ и иного (заданного) $\Phi_\lambda^{\text{II}}(\lambda)$, имеет вид [12]:

$$S_e^{\text{II}} = S_e^{\text{I}} \frac{K^{\text{II}}}{K^{\text{I}}} \quad , \quad [\text{А/Вт}] \text{ или } [\text{В/Вт}] \quad , \quad (7.2)$$

где S_e^{II} – чувствительность фотоприёмника к излучению заданного источника в энергетических величинах (например А/Вт или В/Вт); S_e^{I} – чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника в энергетических величинах (например А/Вт или В/Вт), то есть того

источника, который использовался при его аттестации на предприятии-изготовителе; κ^I – коэффициент использования фотоприёмником излучения паспортного источника; κ^{II} – коэффициент использования фотоприёмником излучения заданного источника.

Из выражения (5.29) следует, что коэффициент использования фотоприёмником излучения паспортного источника:

$$\kappa^I = \frac{\int_0^\infty \varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) d\lambda}, \quad (7.3)$$

где $\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения паспортного источника;

Коэффициент использования фотоприёмником излучения заданного источника

$$\kappa^{II} = \frac{\int_0^\infty \varphi_{e,\lambda}^{II}(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi_{e,\lambda}^{II}(\lambda) d\lambda}, \quad (7.4)$$

где $\varphi_{e,\lambda}^{II}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения заданного источника

Можно показать, что выражение (7.2) применимо как к чувствительности к потоку излучения $S_{\Phi_e}^I$ и $S_{\Phi_e}^{II}$, так и к чувствительности к облучённости $S_{E_e}^I$ и $S_{E_e}^{II}$, причём как к токовой, так и к вольтовой.

Пороговый поток и обнаружительная способность.

Шумовые параметры фотоприёмников приводятся в паспортах и справочниках, как правило, по отношению к излучению того же источника, что и чувствительность.

При оценке соотношения сигнала и шума необходимо рассчитать соответствующий шумовой или пороговый параметр фотоприёмника к падающему на него излучению, которое имеет другой спектральный состав.

Пусть известны порог чувствительности $\Phi_{пе}^I$ и обнаружительная способность D_e^I фотоприёмника к излучению паспортного источника в энергетических величинах, а по условиям решаемой задачи требуется рассчитать указанные параметры $\Phi_{пе}^{II}$ и D_e^{II} по отношению к другому источнику.

Из выражений (6.34) и (5.30) следует, что величины СКЗ тока $I_{ш.фп.\Delta f_{ЭКВ}}$ шума фотоприёмника для этих двух источников в заданной полосе частот $\Delta f_{ЭКВ}$ можно представить в следующих видах:

$$I_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = (S_e^I \Phi_{\text{пе}}^I) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = (S_{\lambda_{\text{max}}} K^I \Phi_{\text{пе}}^I) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} , \quad (7.5)$$

$$I_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = (S_e^{\text{II}} \Phi_{\text{пе}}^{\text{II}}) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = (S_{\lambda_{\text{max}}} K^{\text{II}} \Phi_{\text{пе}}^{\text{II}}) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} ,$$

$$I_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \left(\frac{S_e^I}{D_e^I} \right) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \left(\frac{S_{\lambda_{\text{max}}} K^I}{D_e^I} \right) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} , \quad (7.6)$$

$$I_{\text{ш.фп.}\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \left(\frac{S_e^{\text{II}}}{D_e^{\text{II}}} \right) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \left(\frac{S_{\lambda_{\text{max}}} K^{\text{II}}}{D_e^{\text{II}}} \right) \sqrt{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} .$$

Из выражений (7.5) следует, что порог чувствительности фотоприёмника к излучению заданного источника имеет вид [12]:

$$\Phi_{\text{пе}}^{\text{II}} = \Phi_{\text{пе}}^I \frac{K^I}{K^{\text{II}}} , \quad [\text{Вт}] \quad (7.7)$$

где $\Phi_{\text{пе}}^I$ – порог чувствительности фотоприёмника к излучению паспортного источника.

Из выражений (7.6) следует, что обнаружительная способность фотоприёмника к излучению заданного источника имеет вид [12]:

$$D_e^{\text{II}} = D_e^I \frac{K^{\text{II}}}{K^I} , \quad [\text{Вт}^{-1}] , \quad (7.8)$$

где D_e^I – обнаружительная способность по отношению к излучению паспортного источника.

Пример пересчёта параметров фотоприёмников.

В качестве примера на рис. 7.4 показаны графики, иллюстрирующие пересчёт параметров чувствительности фотоприёмника на основе InAsSb.

Такие фотоприёмники могут аттестоваться, например, по модели абсолютно чёрного тела с температурой $T = 800$ К. Вместе с тем, фотоприёмники на основе InAsSb используются в пирометрии и в тепловидении для измерения параметров излучения объектов с температурой, близкой к температуре окружающей среды, например $T = 300$ К.

На рис. 7.4 показаны графики относительных спектральных характеристик:

$s(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприёмника на основе InAsSb;

$\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения паспортного источника с температурой $T = 800$ К;
 $\varphi_{e,\lambda}^{II}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения заданного источника $T=300$ К.

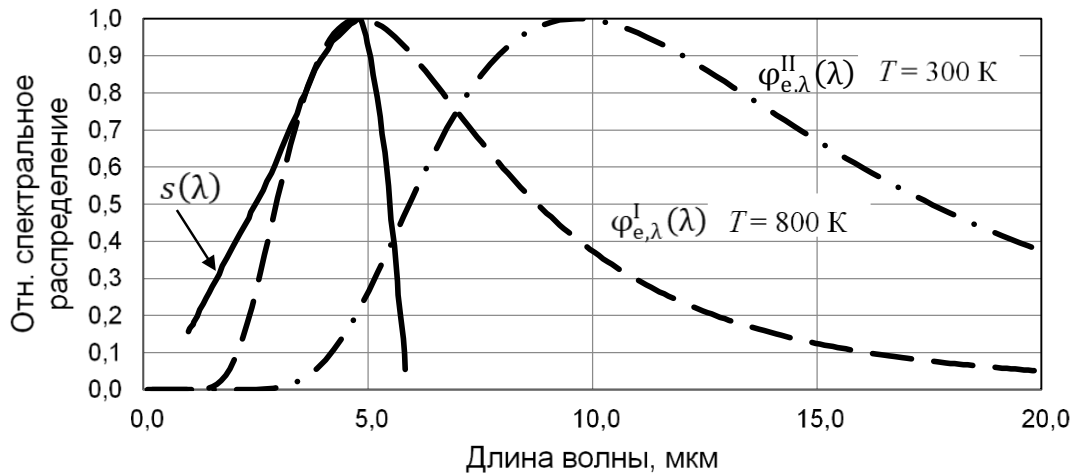


Рисунок 7.4 – К пересчёту параметров чувствительности, порога чувствительности и обнаружительной способности фотоприёмника от паспортного источника ($T = 800$ К) излучения к заданному ($T = 300$ К)

На рис. 7.5 показаны графики относительных спектральных характеристик:

$s(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприёмника на основе InAsSb;

$\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения паспортного источника с температурой $T = 800$ К;

Площадь фигуры под произведением $\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) s(\lambda)$ есть относительный эффективный поток $\varphi_{e\text{эфф}} = \int_0^\infty \varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) s(\lambda) d\lambda$.

На рис. 7.6 показаны графики относительных спектральных характеристик:

$s(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприёмника на основе InAsSb;

$\varphi_{e,\lambda}^{II}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения заданного источника с температурой $T = 300$ К.

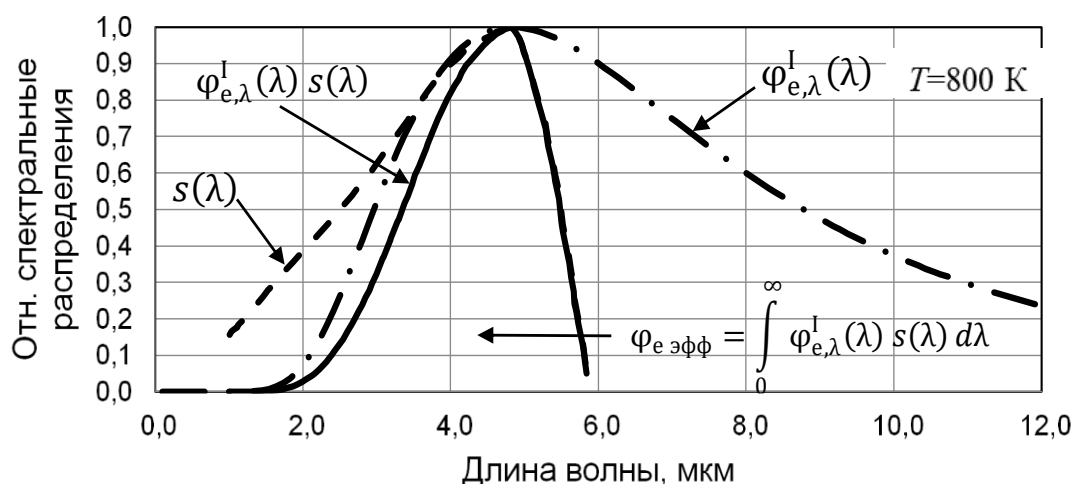


Рисунок 7.5 – К расчёту коэффициента использования фотоприёмником излучения паспортного источника с температурой ($T = 800 \text{ K}$)

Площадь фигуры под произведением $\varphi_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda) s(\lambda)$ есть относительный эффективный поток $\varphi_{e \text{ эфф}} = \int_0^{\infty} \varphi_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda) s(\lambda) d\lambda$.

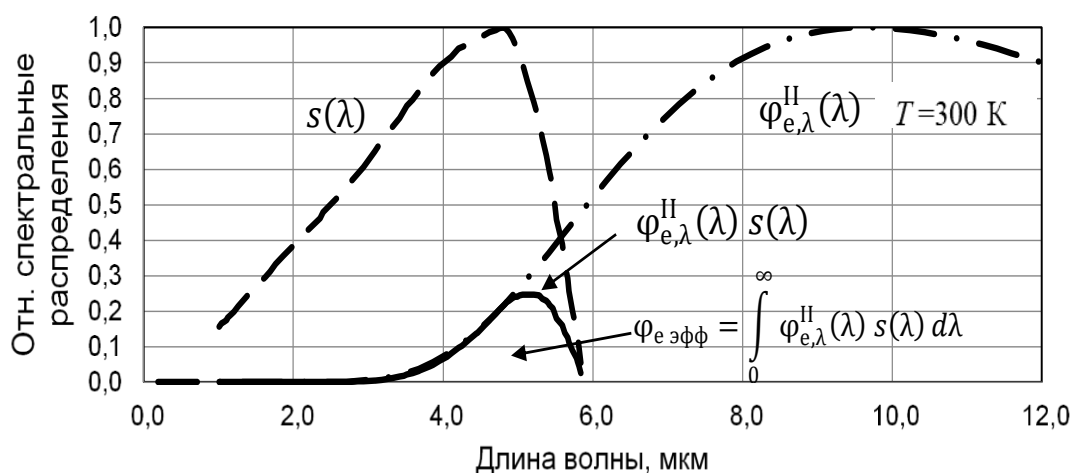


Рисунок 7.6 – К расчёту коэффициента использования фотоприёмником излучения заданного источника с температурой ($T = 300 \text{ K}$)

Из рисунков 7.5 и 7.6 следует, что эффективность фотопреобразования излучения паспортного источника с температурой $T = 800 \text{ K}$ существенно выше, чем излучения источника с температурой $T = 300 \text{ K}$. Тем не менее, фотоприёмники на основе InAsSb используются при создании тепловизоров.

7.2.2 Пересчёт параметров фотоприёмников, заданных в световых величинах по паспортному источнику, к параметрам, заданным в энергетических единицах по тому же источнику

ГОСТ Р 59607—2021 [45] предусматривает использование в качестве паспортного источника светоизмерительных ламп накаливания с цветовой температурой $T_c = (2856 \pm 100)$ К по ГОСТ 8.023-2014 [53]. Параметры излучения этих ламп приводятся в световых единицах. Зарубежные производители для аттестации фотоприёмников применяют также галогенные лампы накаливания с цветовой температурой $T_c = 3200$ К [43].

Практика энергетических расчётов вызывает в некоторых случаях необходимость расчёта параметров чувствительности в энергетических величинах и единицах по известным из паспорта параметрам в световых величинах и единицах.

При освещении фотоприёмника паспортным источником его фототок, согласно выражению (5.6), имеет вид:

$$I = \Phi_v^I S_v^I, \quad (7.9)$$

где Φ_v^I – световой поток паспортного источника, падающий на чувствительную площадку фотоприёмника, лм; S_v^I – токовая чувствительность фотоприёмника к световому потоку паспортного источника, А/лм.

Выражение для фототока I (7.9), согласно выражению (5.4), можно записать также для энергетических величин:

$$I = \Phi_e^I S_e^I, \quad (7.10)$$

где Φ_e^I – поток излучения паспортного источника, падающий на чувствительную площадку фотоприёмника, Вт; S_e^I – токовая чувствительность фотоприёмника к потоку излучению паспортного источника в энергетических величинах, А/Вт.

Из выражений (7.9) и (7.10), а также выражения (2.50) следует:

$$I = \Phi_e^I S_e^I = \Phi_v^I S_v^I = 683 \kappa_r \Phi_e S_v^I. \quad (7.11)$$

Из выражения (7.11) следует соотношение чувствительностей в энергетических и световых единицах:

$$S_e^I = 683 \kappa_r^I S_v^I, \quad [\text{А/Вт или В/Вт}] \quad (7.12)$$

где S_e^I – чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника в энергетических величинах (например А/Вт или В/Вт); S_v^I – чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах (например А/лм или В/лм), то есть того источника, который использовался при его аттестации на предприятии-изготовителе; κ_Γ^I – коэффициент использования глазом излучения паспортного источника.

Коэффициент использования глазом излучения паспортного источника κ_Γ^I рассчитывается согласно выражению (2.49):

$$\kappa_\Gamma^I = \frac{\int_{0.38}^{0.78} \varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi_{e,\lambda}^I(\lambda) d\lambda}, \quad (7.13)$$

где $\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения паспортного источника (рис. 2.7).

Пороговый поток и обнаружительная способность.

Из выражений (6.34) и (7.12) следует, что величину СКЗ тока $I_{ш.фп.\Delta f_{ЭКВ}}$ шума фотоприёмника в световых и энергетических величинах в заданной полосе частот $\Delta f_{ЭКВ}$ можно представить в следующих видах:

$$I_{ш.фп.\Delta f_{ЭКВ}} = (S_v^I \Phi_{пв}^I) \sqrt{\Delta f_{ЭКВ}} = \left(\frac{S_e^I}{683 \kappa_\Gamma} \Phi_{пв}^I \right) \sqrt{\Delta f_{ЭКВ}}, \quad (7.14)$$

$$I_{ш.фп.\Delta f_{ЭКВ}} = (S_e^I \Phi_{пе}^I) \sqrt{\Delta f_{ЭКВ}},$$

$$I_{ш.фп.\Delta f_{ЭКВ}} = \left(\frac{S_v^I}{D_v^I} \right) \sqrt{\Delta f_{ЭКВ}} = \left(\frac{S_e^I}{683 \kappa_\Gamma D_v^I} \right) \sqrt{\Delta f_{ЭКВ}}, \quad (7.15)$$

$$I_{ш.фп.\Delta f_{ЭКВ}} = \left(\frac{S_e^I}{D_e^I} \right) \sqrt{\Delta f_{ЭКВ}}.$$

Из выражений (7.14) следует, что порог чувствительности фотоприёмника к излучению паспортного источника в энергетических величинах имеет вид [12]:

$$\Phi_{пе}^I = \frac{\Phi_{пв}^I}{683 \kappa_\Gamma}, \quad [\text{Вт}] \quad (7.16)$$

где $\Phi_{пе}^I$ – порог чувствительности фотоприёмника к излучению паспортного источника в энергетических величинах, Вт;

$\Phi_{\text{пв}}^{\text{I}}$ – порог чувствительности фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах, лм.

Из выражений (7.15) следует, что обнаружительная способность фотоприёмника к излучению паспортного источника в энергетических величинах имеет вид [12]:

$$D_e^{\text{I}} = D_v^{\text{I}} 683 \kappa_{\text{r}} , \quad [\text{Вт}^{-1}] \quad (7.17)$$

где D_e^{I} – обнаружительная способность по отношению к излучению паспортного источника в энергетических величинах, Вт^{-1} ;
 D_v^{I} – обнаружительная способность по отношению к излучению паспортного источника в световых величинах, лм^{-1} .

Рассмотрим пересчёт чувствительности фотодиода на основе кремния, для которого известно значение его чувствительности в световых величинах ($S_v^{\text{I}} = 5 \text{ мА/лм}$) по отношению к излучению паспортного источника, эталонной лампы накаливания с цветовой температурой $T_c = 2856 \text{ К}$. Требуется рассчитать чувствительность этого фотодиода по отношению к излучению того же источника в энергетических величинах.

В п. 2.9 (рис. 2.7), был приведён расчёт коэффициента использования глазом $\kappa_{\text{r}}^{\text{I}}$ излучения паспортного источника с цветовой температурой $T_c = 2856 \text{ К}$ и показано, что $\kappa_{\text{r}}^{\text{I}} = 0,025$.

Для рассматриваемых значений параметров: ($S_v^{\text{I}} = 5 \text{ мА/лм}$) , $\kappa_{\text{r}}^{\text{I}} = 0,025$, с помощью выражения (7.18) получаем: $S_e^{\text{I}} = 0,085, \text{ А/Вт}$.

Аналогично с помощью выражений (5.20) и (5.21) можно осуществить пересчёт порога чувствительности и обнаружительной способности этого фотодиода.

7.2.3 Пересчёт параметров фотоприёмников, заданных в световых величинах по паспортному источнику, к параметрам, заданным в энергетических величинах по произвольному (заданному) источнику

Фотоприёмники, чувствительные в видимой области спектра, например фотоприёмники на основе кремния, включая матрицы ПЗС и КМОП, а также фотоприёмники на основе внешнего фотоэффекта, как правило, аттестуются на установках [45], в которых используются светоизмерительные лампы накаливания с цветовой температурой $T_c = (2856 \pm 100) \text{ К}$ по ГОСТ 8.023-2014 [5345].

Практически же создаваемые оптико-электронные приборы и системы, как правило, используют излучение с другим спектральным составом излучения.

Поэтому практика энергетических расчётов вызывает необходимость пересчёта паспортных параметров чувствительности S_v^I , порога чувствительности $\Phi_{п,v}^I$ и обнаружительной способности D_v^I , измеренных в световых величинах и единицах, в соответствующие параметры в энергетических величинах и единицах для источников с другим спектральным составом.

Из выражений (7.2) и (7.12) следует, что чувствительность фотоприёмника в энергетических величинах по произвольному (заданному) источнику:

$$S_e^{II} = S_v^I \frac{683 \kappa_r^I \kappa^{II}}{\kappa^I} \quad [A/Вт] \text{ или } [B/Вт] \quad (7.18)$$

где S_e^{II} – чувствительность фотоприёмника к излучению заданного (произвольного) источника в энергетических величинах (например А/Вт или В/Вт); S_v^I – чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах (например А/лм или В/лм), то есть того источника, который использовался при его аттестации на предприятии-изготовителе; κ_r^I – коэффициент использования глазом излучения паспортного источника; κ^I – коэффициент использования фотоприёмником излучения паспортного источника κ^{II} – коэффициент использования фотоприёмником излучения заданного источника.

Из выражений (7.7) и (7.16) следует, что выражение для расчёта порога чувствительности фотоприёмника в энергетических величинах к излучению произвольного (заданного) источника имеет вид:

$$\Phi_{п,e}^{II} = \Phi_{п,v}^I \frac{\kappa^I}{683 \kappa_r^I \kappa^{II}}, \quad [Вт] \quad (7.19)$$

где $\Phi_{п,e}^{II}$ – порог чувствительность фотоприёмника к излучению заданного источника в энергетических величинах (например, в Вт); $\Phi_{п,v}^I$ – порог чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах (например, в лм).

Из выражений (7.8) и (7.17) следует, что выражение для расчёта обнаружительной способности фотоприёмника в энергетических величинах к излучению произвольного (заданного) источника имеет вид:

$$D_e^{II} = D_v^I \frac{683 \kappa_r^I \kappa^{II}}{\kappa^I}, \quad [\text{Вт}^{-1}] \quad (7.20)$$

где D_e^{II} – обнаружительная способность фотоприёмника к излучению произвольного (заданного) источника в энергетических величинах (например в лм^{-1}); D_v^I – обнаружительная способность фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах (например, в лм^{-1}).

Рассмотрим пересчёт чувствительности фотодиода на основе кремния, для которого известно значение чувствительности в световых величинах ($S_v^I = 5 \text{ мА/лм}$) по отношению к излучению паспортного источника, эталонной лампы накаливания с цветовой температурой $T_c = 2856 \text{ К}$. Требуется рассчитать чувствительность этого фотодиода по отношению к излучению ИК-диода на основе арсенид-галлия (GaAs) в энергетических величинах

В п. 2.9 (рис. 2.7) был приведён расчёт коэффициента использования глазом κ_r^I излучения паспортного источника с цветовой температурой $T_c = 2856 \text{ К}$ и показано, что $\kappa_r^I = 0,025$.

В подразделе 5.3 (рис. 5.4) было показано, что коэффициент использования кремниевым фотоприёмником излучения паспортного источника с цветовой с температурой ($T = 2856 \text{ К}$), составляет $\kappa^I = 0,2$.

В подразделе 5.3 (рис. 5.4 и 5.5) было показано, что коэффициент использования кремниевым фотоприёмником излучения арсенид-галлиевого светодиода, $\kappa^{II} \approx 0,9$.

Для рассматриваемых значений параметров: ($S_v^I = 5 \text{ мА/лм}$), $\kappa_r^I = 0,025$, $\kappa^I = 0,2$, $\kappa^{II} \approx 0,9$ с помощью выражения (7.18) получаем $S_e^{II} = 0,38 \text{ А/Вт}$.

Аналогично с помощью выражений (7.19) и (7.20) можно осуществить пересчёт порога чувствительности и обнаружительной способности этого фотодиода.

7.2.4 Пересчёт параметров фотоприёмников, заданных в световых величинах по паспортному источнику, к параметрам в световых величинах по произвольному (заданному) источнику

В практике расчётов возможен вариант, когда паспортные параметры фотоприёмника известны в световых величинах, например по источнику с цветовой температурой $T_c = (2856 \pm 100)$ К, а необходимо рассчитать параметры по отношению к светодиоду, параметры которого также заданы в световых величинах.

Из выражений (7.2) и (7.12) следует, что чувствительность фотоприёмника в световых величинах по произвольному (заданному) источнику [12]:

$$S_v^{\text{II}} = S_v^{\text{I}} \frac{\kappa^{\text{II}} \kappa_{\Gamma}^{\text{I}}}{\kappa^{\text{I}} \kappa_{\Gamma}^{\text{II}}}, \quad [\text{А/лм или В/лм}] \quad (7.21)$$

где S_v^{II} – чувствительность фотоприёмника к излучению заданного (произвольного) источника (например светодиода) в световых величинах (например А/лм или В/лм); S_v^{I} – чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах (например А/лм или В/лм), то есть того, источника который использовался при его аттестации на предприятии-изготовителе; κ^{I} – коэффициент использования фотоприёмником излучения паспортного источника; κ^{II} – коэффициент использования фотоприёмником излучения заданного источника; $\kappa_{\Gamma}^{\text{I}}$ – коэффициент использования глазом излучения паспортного источника; $\kappa_{\Gamma}^{\text{II}}$ – коэффициент использования глазом излучения заданного источника.

Из выражений (7.7) и (7.12) следует, что порог чувствительности в световых величинах по произвольному (заданному) источнику:

$$\Phi_{\text{п,в}}^{\text{II}} = \Phi_{\text{п,в}}^{\text{I}} \frac{\kappa^{\text{I}} \kappa_{\Gamma}^{\text{II}}}{\kappa^{\text{II}} \kappa_{\Gamma}^{\text{I}}}, \quad [\text{лм}] \quad (7.22)$$

где $\Phi_{\text{п,в}}^{\text{II}}$ – порог чувствительность фотоприёмника к излучению заданного источника в световых величинах (например, в лм); $\Phi_{\text{п,в}}^{\text{I}}$ – порог чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах (например, в лм).

Из выражения (7.8) и (7.12) следует, что обнаружительная способность в световых величинах по произвольному (заданному) источнику:

$$D_v^{\text{II}} = D_v^{\text{I}} \frac{\kappa_{\Gamma}^{\text{II}} \kappa_{\Gamma}^{\text{I}}}{\kappa_{\Gamma}^{\text{I}} \kappa_{\Gamma}^{\text{II}}}, \quad [\text{лм}^{-1}] \quad (7.23)$$

где D_v^{I} – обнаружительная способность фотоприёмника к излучению заданного источника в световых величинах (например, в лм^{-1}); D_v^{II} – обнаружительная способность фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах (например, в лм^{-1}).

Коэффициент использования глазом излучения паспортного источника (КПД глаза) определяется выражением [12]:

$$\kappa_{\Gamma}^{\text{I}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} \varphi_{e,\lambda}^{\text{I}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e,\lambda}^{\text{I}}(\lambda) d\lambda}, \quad (7.24)$$

где $\varphi_{e,\lambda}^{\text{I}}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения паспортного источника.

Коэффициент использования глазом излучения заданного источника (КПД глаза) определяется выражением [12]:

$$\kappa_{\Gamma}^{\text{II}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} \varphi_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda) d\lambda}, \quad (7.25)$$

где $\varphi_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения заданного источника.

7.3 Расчёт составляющих тока и напряжения шума фотоприёмника

Если сведения о шумовых параметрах фотоприёмника отсутствуют, то приблизительную их оценку можно получить, воспользовавшись известными теоретическими формулами для расчёта составляющих шумов соответствующих типов фотоприёмников [12].

В оптико-электронных приборах присутствуют четыре группы шумов по их происхождению:

- фотонный (радиационный) шум;
- собственные шумы фотоприёмников
 - ✓ дробовый шум,
 - ✓ тепловой шум,
 - ✓ генерационно-рекомбинационный шум,

- ✓ токовый шум (избыточный, 1/f-шум),
- ✓ шум мерцания (фликкер-эффект));
- шум цепи нагрузки фотоприёмника и электронного тракта оптико-электронного прибора.

Различным типам фотоприёмников свойственен различный набор составляющих собственных шумов, зависящий от принципа их действия.

Фотонный (радиационный) шум возникает вследствие флуктуации потока фотонов, падающих на фотоприёмную площадку, и флуктуаций потока квантов, излучаемых самим фотоприёмником в пространство. Фотонный шум складывается из двух составляющих: флуктуации числа фотонов фона и флуктуации числа фотонов излучения самого фотоприёмника. Флуктуации излучения объекта (цели) практически всегда можно считать несущественными. Спектр фотонного шума – белый.

Спектральная плотность дисперсии тока фотонного шума в выходной цепи фотоприёмника [12]:

$$D_{fI_{\text{фот.ш.фп.}}} = \frac{\overline{I_{\text{фот.ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = D_{f\text{фона}} S_{\text{фона}}^2 + D_{f\text{фп}} S_{\text{фп}}^2, \quad (7.26)$$

где $\overline{I_{\text{фот.ш.фп.}}^2}$ – дисперсия тока фотонного шума в выходной цепи фотоприёмника в полосе частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$; $D_{f\text{фона}}$ – спектральная плотность дисперсии излучения фона; $S_{I\text{фона}}$ – токовая чувствительность фотоприёмника к излучению фона; $D_{f\text{фп}}$ – спектральная плотность дисперсии излучения фотоприёмника; $S_{I\text{фп}}^2$ – токовая чувствительность фотоприёмника к собственному излучению.

Если в выражении (7.26) вместо токовой чувствительности подставить вольттовую, то получим выражение для спектральной плотности дисперсии напряжения фотонного шума в выходной цепи фотоприёмника.

Если излучение фона тепловое, то спектральная плотность дисперсии потока его излучения на фоточувствительном элементе фотоприёмника (пикселе) [12]:

$$D_{f\text{фона}} = 8 k \sigma \varepsilon_{\text{фона}} T_{\text{фона}}^5 A_{\text{эфф}}, \quad (7.27)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹); σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К⁴); $\varepsilon_{\text{фона}}$ – коэффициент теплового излучения фона; $T_{\text{фона}}$ – температура фона; $A_{\text{эфф}}$ – эффективная фоточувствительная площадь фотоприёмника (пикселя).

Спектральная плотность дисперсии потока излучения фоточувствительного элемента фотоприёмника (пикселя) [12]:

$$D_{f_{\text{фп}}} = 8 k \sigma \varepsilon_{\text{фп}} T_{\text{фп}}^5 A_{\text{эфф}} , \quad (7.28)$$

где $\varepsilon_{\text{фп}}$ – коэффициент теплового излучения фотоприёмника; $T_{\text{фп}}$ – температура фотоприёмника.

Дробовый шум возникает вследствие флуктуаций во времени числа электронов, образующих электрический ток. Спектр дробового шума – белый. Спектральная плотность дисперсии тока дробового шума фотоприёмника [12]:

$$D_{fI_{\text{др.ш.фп.}}} = \frac{\overline{I_{\text{др.ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = 2 e \bar{I} , \quad (7.29)$$

где $\overline{I_{\text{др.ш.фп.}}^2}$ – дисперсия тока дробового шума в выходной цепи фотоприёмника в полосе частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$; e – заряд электрона, $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; \bar{I} – среднее значение тока в цепи фотоприёмника.

Спектральная плотность дисперсии напряжения дробового шума фотоприёмника на его нагрузке [12]:

$$D_{fU_{\text{др.ш.фп}}} = \frac{\overline{U_{\text{др.ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = 2 e \bar{I} R_{\text{н}}^2 , \quad (7.30)$$

где $\overline{U_{\text{др.ш.фп.}}^2}$ – дисперсия напряжения дробового шума в выходной цепи фотоприёмника в полосе частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки фотоприёмника.

Выражения (7.29) и (7.30) справедливы для фотоприёмников без внутреннего усиления фототока. Величина дробового шума для фотоприёмников с внутренним усилением фототока зависит от типа фотоприёмника.

Спектральная плотность дисперсии тока дробового шума лавинного фотодиода на основе собственных полупроводников [12]:

$$D_{fI_{\text{др.ш.фп.}}} = \frac{\overline{I_{\text{др.ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = 2 e M^3 \bar{I} . \quad (7.31)$$

где M — коэффициент умножения тока лавинного фотодиода.

Основной составляющей шума вакуумных фотоэлементов и фотоумножителей является дробовый шум, который для электровакуумных

фотоэлементов рассчитывается по формулам (7.29) и (7.30). Для фотоумножителей, с учётом влияния динодов, спектральная плотность дисперсии тока дробового шума фотоприёмника [12]:

$$D_{fI_{др.ш.фп.}} = \frac{\overline{I_{др.ш.фп.}^2}}{\Delta f_{эқв}} = 2 e \bar{I}_{фк} M_{фу}^2 (1 + B) , \quad (7.32)$$

где $\bar{I}_{фк}$ – среднее значение суммарного тока фотокатода; $M_{фу}$ – коэффициент усиления фотоумножителя по току; $(1 + B)$ – коэффициент, учитывающий увеличение дробового шума за счёт динодного умножения, $(1 + B) = 1,3 \dots 5$ (для фотоумножителей с электростатической фокусировкой $(1 + B) = 2,5$).

Тепловой шум возникает вследствие хаотического движения свободных электронов в фотоприёмнике. Спектр теплового шума – белый. Спектральная плотность дисперсии тока теплового шума фотоприёмника [12]:

$$D_{fI_{т.ш.фп.}} = \frac{\overline{I_{т.ш.фп.}^2}}{\Delta f_{эқв}} = \frac{4 k T_{фп}}{R_{фп}} , \quad (7.33)$$

где $\overline{I_{т.ш.фп.}^2}$ – дисперсия тока теплового шума в выходной цепи фотоприёмника в полосе частот $\Delta f_{эқв}$; k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹); $T_{фп}$ – температура фотоприёмника; $R_{фп}$ – сопротивление фотоприёмника, для фотодиода это сопротивление базы $R_{б}$.

Спектральная плотность дисперсии напряжения теплового шума фотоприёмника [12]:

$$D_{fU_{т.ш.фп.}} = \frac{\overline{U_{т.ш.фп.}^2}}{\Delta f_{эқв}} = 4 k T_{фп} R_{фп} . \quad (7.34)$$

где $\overline{U_{т.ш.фп.}^2}$ – дисперсия напряжения теплового шума в выходной цепи фотоприёмника в полосе частот $\Delta f_{эқв}$.

Генерационно-рекомбинационный шум наблюдается у полупроводниковых фотоприёмников и вызывается случайным характером генерации носителей тока, а также случайным характером рекомбинации этих носителей, то есть флуктуацией их числа n и времени жизни τ_n . Указанные величины для выпускаемых промышленностью фотоприёмников неизвестны, поэтому формулы для расчёта генерационно-

рекомбинационного шума, приводимые в различных источниках [1, 12], практически не могут быть применены в практике инженерных расчётов.

Генерационно-рекомбинационный шум – не белый. В практике проектирования практически единственным способом получения информации о величине генерационно-рекомбинационного шума является измерение его величины и, в случае необходимости, частотного распределения.

Токовый шум ($1/f$ -шум) обусловлен технологией изготовления фоточувствительного слоя, состоянием поверхности, качеством контактов и токами утечки. Спектральная плотность дисперсии тока токового шума фотоприёмника в узкой области частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$ описывается выражением [12]:

$$D_{fI_{\text{ток.ш.фп.}}} = \frac{\overline{I_{\text{ток.ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \frac{A \bar{I}^2}{f}, \quad (7.35)$$

где $\overline{I_{\text{ток.ш.фп.}}^2}$ – дисперсия тока токового шума в выходной цепи фотоприёмника в узкой полосе частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$.

Спектральная плотность дисперсии напряжения токового шума фотоприёмника на сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$ в узкой области частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$ описывается выражением [12]:

$$D_{fU_{\text{ток.ш.фп.}}} = \frac{\overline{U_{\text{ток.ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = \frac{A \bar{I}^2}{f} R_{\text{н}}^2, \quad (7.36)$$

где $\overline{U_{\text{ток.ш.фп.}}^2}$ – дисперсия напряжения токового шума в выходной цепи фотоприёмника в полосе частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$; A – постоянная, зависящая от материала ПОИ ($A = 3 \cdot 10^{-12} \dots 3 \cdot 10^{-7}$; для сернисто-свинцовых фоторезисторов $A \approx 10^{-11}$); \bar{I} – среднее значение тока фотоприёмника; f – среднее значение частоты в полосе частот.

Как следует из выражений (7.35) и (7.36), токовый шум – не белый, что сказывается в основном на низких частотах ($f < 1$ кГц).

Величины постоянных A для выпускаемых промышленностью фотоприёмников неизвестны, поэтому формулы для расчёта токового шума практически не могут быть применены в практике инженерных расчётов.

В практике проектирования практически единственным способом получения информации о величине токового шума является измерение его величины и, в случае необходимости, частотного распределения.

Шум мерцания (фликкер-эффект) возникает у фотоэлементов и фотоумножителей из-за непостоянства чувствительности фотокатода во

времени, он проявляется на низких частотах ($f < 100$ Гц) и может превышать дробовый шум на порядок. Шум мерцания – не белый.

Спектральная плотность дисперсии тока шума мерцания фотоэлемента в узкой области частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$ описывается выражением [12]:

$$D_{fI_{\text{мерц.ш.фп.}}} = \frac{\overline{I_{\text{мерц.ш.фп.}}^2}}{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} = 2 e \bar{I} \left(1 + \frac{B_{\text{фк}} \cdot \bar{I}}{A_{\text{эфф}} \cdot f} \right). \quad (7.37)$$

где $\overline{I_{\text{мерц.ш.фп.}}^2}$ – дисперсия тока шума мерцания в выходной цепи фотоэлемента в полосе частот $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$; где $B_{\text{фк}}$ — постоянная, зависящая от материала фотокатода; $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь фотокатода.

Величины постоянных $B_{\text{фк}}$ для выпускаемых промышленностью фотоэлементов неизвестны, поэтому формулы для расчёта шума мерцания, приводимые в различных источниках [1, 12], практически не могут быть применены в практике инженерных расчётов.

В практике проектирования практически единственным способом получения информации о величине шума мерцания является измерение его величины и, в случае необходимости, частотного распределения.

Так как каждому из типов фотоприёмников присущи несколько видов шумов, включая небелые, в практике проектирования в некоторых случаях необходимо учитывать частотное распределение суммарного шума в его выходной цепи.

Для исключения влияния небелых шумов (генерационно-рекомбинационный шум, токовый шум, шум мерцания) на отношение сигнал/шум целесообразно использовать ту частотную область, в которой их величина мала по отношению к величине белых составляющих (фотонный шум, дробовый шум, тепловой шум).

Основными составляющими шумов **фоторезисторов** являются дробовый, тепловой, генерационно-рекомбинационный и токовый шумы. С учётом фотонного шума частотное распределение дисперсии (мощности) суммарного шума тока в выходной цепи фоторезистора

$$D_{fI_{\Sigma \text{ш.фп.}}}(f) = D_{fI_{\text{фот.ш.фп.}}}(f) + D_{fI_{\text{др.ш.фп.}}}(f) + D_{fI_{\text{т.ш.фп.}}}(f) + D_{fI_{\text{Г-р.ш.фп.}}}(f) + D_{fI_{\text{ток.ш.фп.}}}(f) . \quad (7.38)$$

Первые три составляющие – белые, а две последние – не белые, но они сказываются на частотах до 1 кГц, что следует учитывать при формировании частотной характеристики опико-электронного прибора.

На рисунке 7.7а показан пример частотного распределения спектральной плотности дисперсии (мощности) шума фоторезистора.

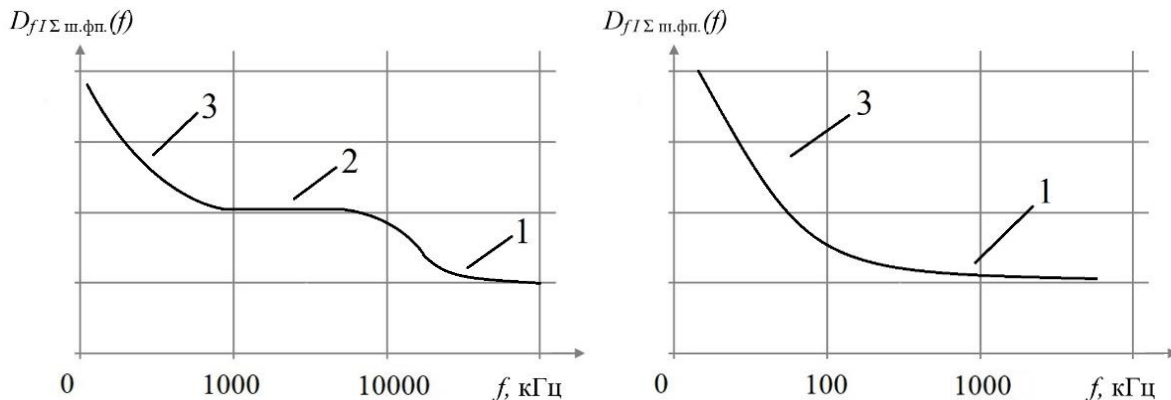


Рисунок 7.7 – Частотное распределение спектральной плотности дисперсии (мощности) шума фоторезистора (а) и фотодиода (б) [12]:

- 1 — уровень фотонного, дробового и теплового шумов
- 2 — область влияния генерационно-рекомбинационного шума;
- 3 — область сильного влияния токового шума

Основными составляющими шума **фотодиодов** являются дробовый, тепловой и токовый шум. Генерационно-рекомбинационный шум у фотодиодов, как правило, существенно меньше. Частотное распределение дисперсии (мощности) суммарного шума тока в выходной цепи фотодиода:

$$D_{fI\Sigma ш.фп.}(f) = D_{fI\text{фот.ш.фп.}}(f) + D_{fI\text{др.ш.фп.}}(f) + D_{fI\text{т.ш.фп.}}(f) + D_{fI\text{ток.ш.фп.}}(f) \quad (7.39)$$

На рисунке 7.7б показан пример частотного распределения спектральной плотности дисперсии (мощности) шума фотодиода.

Основными составляющими шума **фотоэлементов и фотоумножителей** являются дробовый, тепловой и шум мерцания. Частотное распределение дисперсии (мощности) суммарного шума тока в выходной цепи фотодиодов и фотоумножителей:

$$D_{fI\Sigma ш.фп.}(f) = D_{fI\text{фот.ш.фп.}}(f) + D_{fI\text{др.ш.фп.}}(f) + D_{fI\text{мерц.ш.фп.}}(f) \quad (7.40)$$

Аналогичные выражения можно записать и для других видов фотоприёмников в соответствии со структурой составляющих их шумов.

Графики на рис. 7.7 показывают, что можно выделить области частот, в которых шум можно считать «белым». В этих областях величина шума

существенно меньше, что следует учитывать при проектировании опико-электронных приборов.

Вопросы по 7 разделу

1. Какие источники рекомендует выбирать ГОСТ с учётом стандартизованных параметров испытуемого фотоприёмника?
2. Сравните с помощью рис.7.1 спектральные максимумы и ширину спектрального распределения различных источников (в том числе рекомендованных ГОСТом) с графиком относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения.
3. Объясните принцип работы установки по измерению шумовых параметров сигнала на выходе полупроводниковых фотоприёмников (рис. 7.2, 7.3).
4. Какие значения параметров и какие ограничения для них указывают в технической документации на конкретный тип выпускаемых фотоприёмников?
5. Почему при использовании в расчётах паспортных значений фотоприёмников необходимо обратить внимание на вид источников, по которому производилась их аттестация?
6. Как соотносится чувствительность фотоприёмника к излучению паспортного источника с чувствительностью к излучению источника иного спектрального состава? Какова будет размерность такой чувствительности в энергетических величинах?
7. Является ли выражение (7.4) универсальным для расчёта коэффициента использования излучения заданного источника как для одноэлементного, так и для матричного фотоприёмника?
8. Как рассчитать порог чувствительности фотоприёмника к излучению заданного источника, зная порог чувствительности к излучению паспортного источника?
9. Как рассчитать обнаружительную способность фотоприёмника к излучению заданного источника, зная обнаружительную способность к излучению паспортного источника?
10. Прокомментируйте графики на рис. 7.4. – найдите фигуру, площадь под которой представляет собой относительный эффективный поток излучения.

11. На основе сравнительного анализа рис. 7.4 и 7.6 покажите, при каких спектральных соотношениях эффективность использования излучения реального источника выше.
12. Как соотносится чувствительность фотоприёмника к потоку излучения паспортного источника в энергетических величинах с чувствительностью в световых величинах?
13. По какой формуле рассчитывается коэффициент использования излучения паспортного источника?
14. Как связана величина СКЗ тока шума фотоприёмника с чувствительностью или с обнаружительной способностью фотоприёмника в световых и энергетических величинах?
15. Каковы единицы измерения обнаружительной способности по отношению к излучению паспортного источника в энергетических и в световых величинах?
16. Когда в практике энергетических расчётов необходим пересчёт паспортных параметров чувствительности, порога чувствительности и обнаружительной способности, измеренных в световых единицах, в соответствующие параметры в энергетических единицах для источников с другим спектральным составом?
17. Как соотносится чувствительность фотоприёмника к излучению заданного источника в энергетических величинах с чувствительностью фотоприёмника к излучению паспортного источника в световых величинах?
18. Как соотносится порог чувствительности фотоприёмника к излучению заданного источника в световых величинах с порогом чувствительности к излучению паспортного источника в световых величинах?
19. В каком случае для расчёта составляющих шумов фотоприёмников достаточно получить их приблизительную оценку на основании известных теоретических формул?

8 СИГНАЛ И ШУМ В ЭЛЕКТРОННОМ ТРАКТЕ

8.1 Расчёт переменной составляющей сигнала и величины постоянной составляющей тока на выходе фотоприёмника

Составляющие излучения на чувствительной площадке фотоприёмника

На рисунке 8.1 представлена схема опико-электронного прибора, содержащего источник оптического излучения 1, например инфракрасный излучающий диод (ИК-диод), приёмное устройство, включающее объектив 2, одноэлементный фотоприёмник 3 и предварительный усилитель 4, а также блок обработки информации 5. Питание ИК-диода 1 осуществляется от блока питания 6.

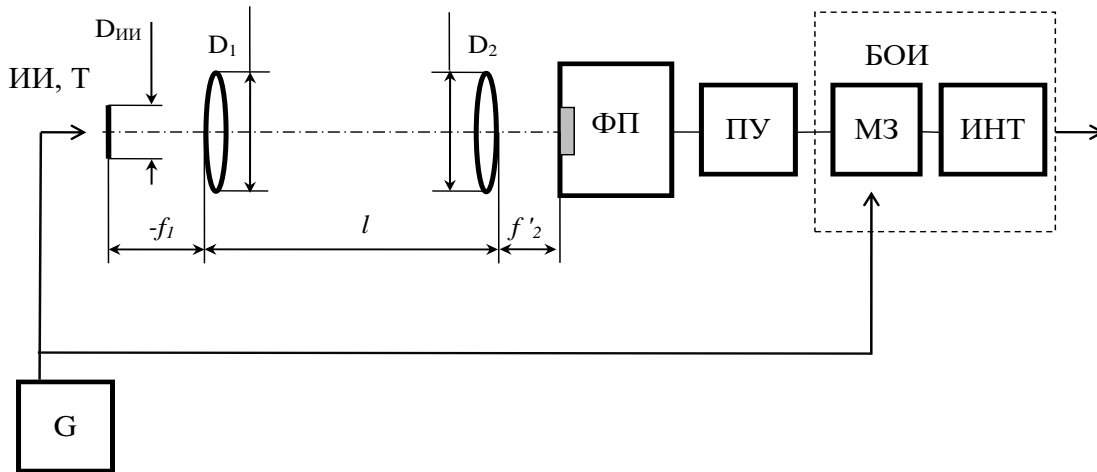


Рисунок 8.1 – Схема опико-электронного прибора:

ИИ - источник излучения (объект, цель); Об1 – объектив коллиматора (прожектора); Об2 – объектив приёмного устройства; ФП – фотоприёмник; ПУ – предварительный усилитель; БОИ – блок обработки информации; МЗ – мультипликатор; ИНТ – интегратор; G – генератор

В реальных условиях эксплуатации во входной зрачок приёмного устройства, кроме излучения источника, попадает излучение фона и возможных помех.

Излучение фона $\Phi_{\text{фона}}$ на фотоприёмнике определяется наличием внешних источников: Солнца, Луны, искусственных источников оптического излучения, например ламп накаливания, светодиодных светильников и других.

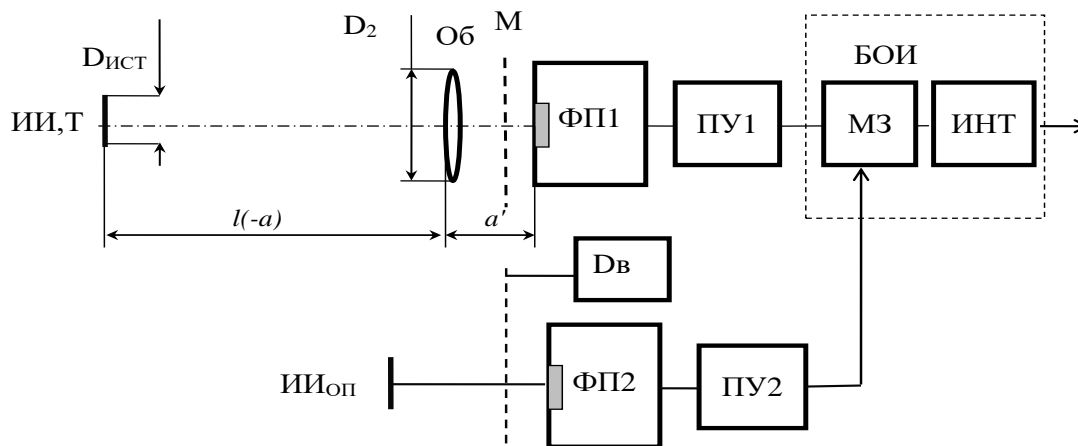


Рисунок 8.2 – Схема опико-электронного прибора:

ИИ - источник излучения (объект, цель); Об – объектив; М – модулятор;
 Дв – двигатель модулятора; ФП1, ФП2 – фотоприёмники;
 ПУ1 – предварительный усилитель измерительного канала;
 ПУ2 – предварительный усилитель опорного канала;
 БОИ – блок обработки информации; МЗ – мультипликатор;
 ИНТ – интегратор;

Излучение источника 1 несёт информацию, содержащуюся, например, в спектральном составе его излучения и временных параметрах излучения [1, 3, 4, 5, 7]. Излучение фона и помех вносит искажение в передаваемый сигнал.

Для того чтобы разделить сигнал источника 1 и фона, применяются методы спектральной фильтрации в оптической системе [1, 3, 5]. Это позволяет уменьшить поток излучения фона и помех на фотоприёмнике. Кроме того, временная модуляция излучения источника позволяет разделить содержащийся в нём переменный сигнал и постоянную составляющую от излучения фона. Методы фильтрации сигналов рассмотрены в ряде учебников [1, 3, 5, 7].

Одним из простейших решений задачи фильтрации сигнала модулируемого источника на равномерном или неравномерном фоне является синусоидальная модуляция его излучения. При применении ИК-диодов это может быть реализовано, например, по цепи питания от блока 6.

Поток излучения (мощность излучения) – величина существенно положительная, он не может принимать отрицательные значения, потому он всегда содержит постоянную составляющую.

Рассмотрим возможную структуру составляющих потока излучения на фотоприёмнике 3 (рис. 8.3).

Пусть источник излучения 1 (ИК-диод) создаёт на чувствительной площадке поток излучения Φ_2 , который может быть рассчитан с помощью выражения (4.15).

На этот поток Φ_2 накладывается синусоидальная модуляция по цепи питания ИК-диода 1.

При синусоидальной модуляции излучения источника поток излучения источника на фотоприёмнике содержит постоянную и переменную составляющие и описывается выражением [24, 25]:

$$\Phi_{\text{И-ФП}}(t) = \Phi_{\text{с=}} + \Phi_{\sim} \sin \omega_{\text{М}} t, \quad (8.1)$$

где $\Phi_{\text{с=}}$ – постоянная составляющая потока излучения; Φ_{\sim} – амплитуда переменной составляющей потока излучения (рис. 8.3); $\omega_{\text{М}}$ – круговая частота модуляции.

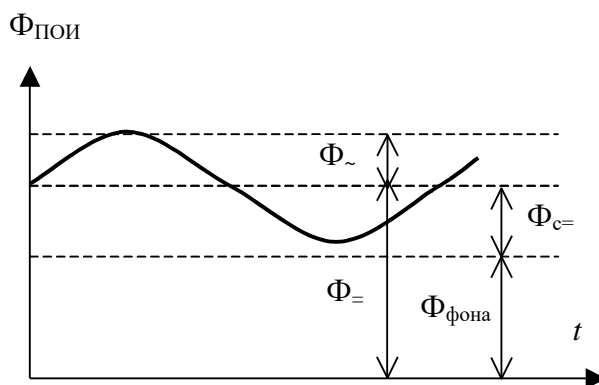


Рисунок 8.3 – Составляющие потока излучения на входе фотоприёмника

Кроме излучения источника 1, на фотоприёмник 3 поступает собственное и отражённое излучение окружающих объектов, которое создаёт на фотоприёмнике 3 постоянный поток излучения фона, равный $\Phi_{\text{фона}}$. Из выражения (8.1) следует, что поток излучения на чувствительной площадке фотоприёмника

$$\Phi_{\text{ФП}}(t) = \Phi_{\text{фона}} + \Phi_{\text{И-ФП}}(t) = \Phi_{\text{фона}} + \Phi_{\text{с=}} + \Phi_{\sim} \sin \omega_{\text{М}} t. \quad (8.2)$$

Постоянная составляющая потока излучения на фотоприёмнике $\Phi_{\text{=}}$ обусловлена излучением фона $\Phi_{\text{фона}}$, а также средним значением потока излучения источника $\Phi_{\text{с=}}$:

$$\Phi_{\text{=}} = \Phi_{\text{фона}} + \Phi_{\text{с=}}. \quad (8.3)$$

Если отсутствуют другие источники модулированного излучения, кроме источника 1, то переменная составляющая потока излучения на чувствительной площадке фотоприёмника Φ_{\sim} определяется параметрами модуляции его излучения.

Если глубина модуляции излучения источника 1 составляет 100%, то амплитуда переменной составляющей потока излучения источника 1 на фотоприёмнике 3 может достигать значения

$$\Phi_{\sim} = \frac{\Phi_2}{2}, \quad (8.4)$$

где Φ_2 – поток излучения источника 1 на чувствительной площадке фотоприёмника при отсутствии модуляции.

Если глубина модуляции излучения источника 1 составляет 100%, то постоянная составляющая потока излучения источника 1 на фотоприёмнике 3 также может достигать значения

$$\Phi_{с=} = \frac{\Phi_2}{2}. \quad (8.5)$$

Поток излучения на чувствительной площадке фотоприёмника вызывает возникновение фототока в цепи фотоприёмника.

Спектральный состав излучения фона $\Phi_{\text{фона}}(\lambda)$ отличен от спектрального состава излучения источника 1 $\Phi_{\text{И-ФП}}(\lambda)$. Поэтому, согласно выражению (5.11), чувствительность фотоприёмника к излучению фона и источника 1 будет различной.

Составляющие электрического сигнала на выходе фотоприёмника

Из выражений (5.4) и (8.2) следует, что фототок в цепи фотоприёмника (рис. 8.4):

$$\begin{aligned} I_{\phi}(t) &= \Phi_{\text{фона}} S_{I_{\text{фона}}} + \Phi_{\text{И-ФП}}(t) S_I \\ &= \Phi_{\text{фона}} S_{I_{\text{фона}}} + \Phi_{с=} S_I + \Phi_{\sim} S_I \sin \omega_M t. \end{aligned} \quad (8.6)$$

где $S_{I_{\text{фона}}}$ – токовая чувствительность фотоприёмника к излучению фона; S_I – токовая чувствительность фотоприёмника к излучению источника 1.

Выражение (8.6) записано для фотоприёмников, которые характеризуются токовой чувствительностью S_I .

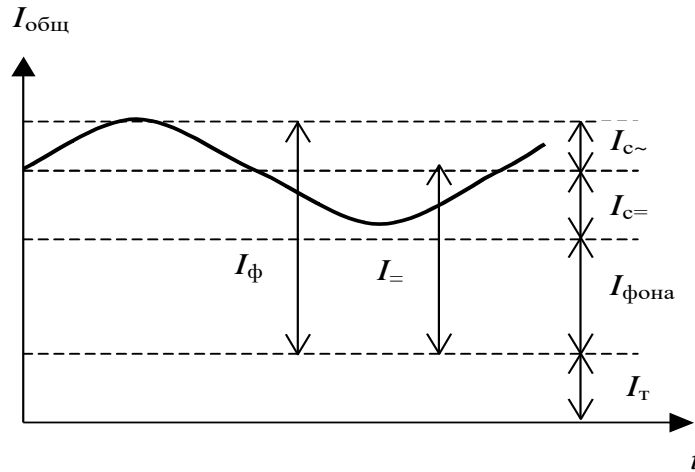


Рисунок 8.4 – К расчёту тока на выходе ПОИ

Фототок $I_{\text{ф}}(t)$ складывается с темновым током I_T [24, 25], обе эти составляющие образуют общий ток фотоприёмника (рис. 8.4):

$$I_{\text{общ}}(t) = I_T + I_{\text{ф}}(t) = I_T + \Phi_{\text{фона}} S_{I_{\text{фона}}} + \Phi_{c=} S_I + \Phi_{\sim} S_I \sin \omega_M t. \quad (8.7)$$

Из выражения (8.7) следует, что темновой ток I_T , фототок $I_{\text{фона}} = \Phi_{\text{фона}} S_{I_{\text{фона}}}$, вызванный излучением фона, и постоянная составляющая фототока $I_{c=} = \Phi_{c=} S_I$ образуют постоянную составляющую общего тока:

$$\overline{I_{\text{общ}}} = I_T + \Phi_{\text{фона}} S_{I_{\text{фона}}} + \Phi_{c=} S_I = I_T + I_{\text{фона}} + I_{c=} . \quad (8.8)$$

Из выражения (8.7) следует, что переменная составляющая общего тока $I_{\sim\text{общ}}$:

$$I_{\sim\text{общ}}(t) = \Phi_{\sim} S_I \sin \omega_M t . \quad (8.9)$$

Амплитуда переменной составляющей фототока:

$$I_{\sim} = \Phi_{\sim} S_I . \quad (8.10)$$

Из выражений (8.8) и (8.9) следует, что информацию от источника 1 к фотоприёмнику 3 можно передать, только заложив её в параметры переменной составляющей сигнала.

В рассмотренной простейшей реализации синусоидальной модуляции излучения источника 1 информация может быть заложена только в величины амплитуды, фазы и частоты модуляции.

Выражения (8.6)–(8.10) записаны для фотоприёмников, которые характеризуются токовой чувствительностью S_I . Аналогичные выражения

можно записать для фотоприёмников, которые характеризуются токовой чувствительностью S_U . При этом необходимо учитывать физические принципы работы различных фотоприёмников и схемы их включения [12].

Для большинства типов фотоприёмников справедливо соотношение (5.10) между вольтовой S_U и токовой S_I чувствительностями.

$$S_U = R_H \cdot S_I, \quad (8.11)$$

где S_U – вольтовая чувствительность фотоприёмника; R_H – сопротивление нагрузки.

Наиболее важными являются следующие соотношения.

Из выражений (8.8) и (8.11) следует, что постоянная составляющая напряжения на нагрузке R_H фотоприёмника:

$$\overline{U_{\text{общ}}} = I_T R_H + \Phi_{\text{фона}} S_{U_{\text{фона}}} + \Phi_{\text{с=}} S_U = I_T R_H + U_{\text{фона}} + U_{\text{с=}}. \quad (8.12)$$

где $S_{U_{\text{фона}}}$ – вольтовая чувствительность фотоприёмника к излучению фона; S_U – вольтовая чувствительность фотоприёмника к излучению источника 1; $U_{\text{фона}}$ – напряжение на нагрузке, создаваемое излучением фона, $U_{\text{фона}} = \Phi_{\text{фона}} S_{U_{\text{фона}}}$; $U_{\text{с=}}$ – постоянная составляющая фотосигнала, $U_{\text{с=}} = \Phi_{\text{с=}} S_U$.

Из выражений (8.9) и (8.11) следует, что переменная составляющая общего тока $U_{\sim\text{общ}}$:

$$U_{\sim\text{общ}}(t) = \Phi_{\sim} S_U \sin \omega_m t. \quad (8.13)$$

Из выражений (8.10) и (8.11) следует, что амплитуда переменной составляющей напряжения фотосигнала:

$$U_{\sim} = \Phi_{\sim} S_U. \quad (8.14)$$

Амплитуда переменной составляющей сигнала (напряжения или тока) определяется только излучением источника 1, а величина постоянной составляющей общего тока $\overline{I_{\text{общ}}}$ зависит от множества внешних факторов: изменения уровня фона $\Phi_{\text{фона}}$, изменений темнового тока I_T , которые могут быть обусловлены изменением температуры фотоприёмника, его временной деградацией и другими факторами. Исходя из изложенного, для передачи информации в оптико-электронных приборах используются, как правило, только модулированные потоки излучения источников, либо

осуществляется модуляция параметров излучения в оптической системе прибора.

8.2 Расчёт основных составляющих шума оптико-электронного прибора в заданной полосе частот электронного тракта

Шумовая погрешность оптико-электронного прибора определяется не только собственными шумами фотоприёмника, но и схемой его включения, наличием внешних засветок, шумами сопротивления нагрузки и первых каскадов предварительного усилителя [1, 3, 4, 7].

В оптико-электронных приборах присутствуют четыре группы шумов по их происхождению:

- фотонный (радиационный) шум;
- собственные шумы фотоприёмников
- шум цепи нагрузки фотоприёмника и электронного тракта оптико-электронного прибора:
 - ✓ шум сопротивления нагрузки фотоприёмника;
 - ✓ шум предварительного усилителя оптико-электронного прибора.

Расчёт собственных шумов фотоприёмников на основе их паспортных данных рассмотрен в разделе 7.

Шумовые параметры фотоприёмника, приведённые в паспортах и справочниках, не в полной мере учитывают те составляющие шума, которые обусловлены условиями их работы в конкретном оптико-электронном приборе, а именно фотонный шум, шум сопротивления нагрузки фотоприёмника и шум предварительного усилителя оптико-электронного прибора.

В реальных условиях эксплуатации на чувствительную площадку фотоприёмника может падать большой поток фона $\Phi_{\text{фона}}$, который может существенно превышать те значения, которые были реализованы при аттестации фотоприёмника. В результате возникает дополнительная по отношению к условиям аттестации постоянная составляющая фототока.

При аттестации фотоприёмников производителем в ряде случаев выполняется измерение зависимостей их параметров и характеристик от величины фона (чувствительности, шумовых и пороговых параметров, а также обнаружительной способности). При отсутствии необходимой информации разработчику оптико-электронной аппаратуры приходится самостоятельно производить такие измерения в процессе проектирования.

Повышенный уровень оптического излучения фона приводит к увеличению постоянной составляющей фототока, которая описывается выражением (8.8). Величина этой дополнительной постоянной составляющей фототока:

$$I_{\text{=общ,доп}} = \Phi_{\text{фона}} S_{I_{\text{фона}}} + \Phi_{\text{с=}} S_I = I_{\text{фона}} + I_{\text{с=}} . \quad (8.15)$$

где $S_{I_{\text{фона}}}$ – токовая чувствительность фотоприёмника к излучению фона; S_I – токовая чувствительность фотоприёмника к излучению объекта (цели).

Эта дополнительная постоянная составляющая фототока $I_{\text{=общ,доп}}$ вызывает появление дополнительной составляющей спектральной плотности дисперсии дробового шума. Согласно выражениям (7.29) и (7.30), спектральные плотности дисперсии тока и напряжения шума этих составляющих:

$$D_{fI_{\text{др.ш.фп.доп}}} = 2 e I_{\text{=общ,доп}} , \quad (8.16)$$

$$D_{fU_{\text{др.ш.фп.доп}}} = 2 e I_{\text{=общ,доп}} R_{\text{н}}^2 , \quad (8.17)$$

где e – заряд электрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки фотоприёмника.

Шум фотоприёмника складывается из составляющей, не учитывающей величину фона (выражения (6.32) и (6.33)), и составляющей, учитывающей наличие фона (выражения (8.16) и (8.17)).

С учётом дополнительной составляющей дробового шума фотоприёмника суммарное значение спектральной плотности дисперсии шума фотоприёмника определяется выражениями:

$$D_{fI_{\text{ш.фп.}\Sigma}} = D_{fI_{\text{ш.фп}}} + D_{fI_{\text{др.ш.фп.доп}}} , \quad (8.18)$$

$$D_{fU_{\text{ш.фп.}\Sigma}} = D_{fU_{\text{ш.фп}}} + D_{fU_{\text{др.ш.фп.доп}}} . \quad (8.19)$$

Аналогично можно учесть и другие составляющие шума для условий конкретной задачи.

Кроме собственных шумов фотоприёмника, при расчёте оптико-электронного прибора следует учитывать тепловой шум сопротивления резистора нагрузки $R_{\text{н}}$ и шум активного элемента предварительного усилителя.

Спектральная плотность дисперсии тока и напряжения теплового шума резистора нагрузки:

$$D_{fI_{т.ш.}R_H} = \frac{4 k T_H}{R_H} , \quad (8.20)$$

$$D_{fU_{т.ш.}R_H} = 4 k T_H R_H , \quad (8.21)$$

где k - постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹); T_H – температура резистора нагрузки; R_H – сопротивление резистора нагрузки.

Спектральная плотность дисперсии тока $D_{fI_{т.ш.}ПУ}$ или напряжения $D_{fU_{т.ш.}ПУ}$ шума активного элемента предварительного усилителя может быть получена на основании сведений, приводимых в справочниках и в паспортах на соответствующие элементы электронной техники. При этом следует учитывать схему их включения.

Выражение для расчёта спектральной плотности дисперсии тока шума оптико-электронного прибора должно учитывать составляющие, перечисленные в п. 7.3:

- фотонный (радиационный) шум $D_{fI_{фот.ш.фп.}}$, выражение (7.26);
- собственные шумы фотоприёмника, включающие составляющую, не учитывающую величину фона $D_{fI_{ш.фп}}$, выражение (6.32), и составляющую, учитывающую величину фона $D_{fI_{др.ш.фп.доп}}$, выражение (8.16) или (8.17);
- шум сопротивления нагрузки фотоприёмника $D_{fI_{т.ш.}R_H}$, выражение (8.20) или (8.21);
- шум предварительного усилителя оптико-электронного прибора $D_{fI_{ш.ПУ}}$.

Спектральная плотность дисперсии (мощности) тока шума оптико-электронного прибора, приведённая к выходу фотоприёмника, то есть ко входу предварительного усилителя, может быть рассчитана с помощью следующего выражения:

$$D_{fI_{ш.ОЭП}} = D_{fI_{фот.ш.фп.}} + D_{fI_{ш.фп}} + D_{fI_{др.ш.фп.доп}} + D_{fI_{т.ш.}R_H} + D_{fI_{ш.ПУ}} . \quad (8.22)$$

Спектральная плотность дисперсии (мощности) напряжения шума оптико-электронного прибора, приведённая к выходу фотоприёмника, с учётом выражений (7.26), (6.33), (8.17) и (8.21) может быть рассчитана с помощью аналогичного выражения:

$$D_{fU_{ш.ОЭП}} = D_{fU_{фот.ш.фп.}} + D_{fU_{ш.фп}} + D_{fU_{др.ш.фп.доп}} + D_{fU_{т.ш.}R_H} + D_{fU_{ш.ПУ}} . \quad (8.23)$$

При расчёте разработчик оптико-электронной аппаратуры должен оценить величину каждой из составляющих, входящих в состав выражений (8.22) или (8.23). При решении большинства практических задач фотонный шум и шум, вызванный фоновым излучением, могут оказаться несущественными, однако пренебрегать ими априори нецелесообразно.

8.3 Расчёт шума предварительного усилителя

В качестве примеров оценки шума предварительного усилителя рассмотрим схемы с предварительным усилителем на основе полевого транзистора и усилителя на основе операционного усилителя, включённого по схеме преобразователя ток-напряжение.

Рассмотрим схемы включения фотоприёмника и предварительный усилитель на основе полевого транзистора, представленный на рисунке 8.5 [12, 24]. Выбор полевого транзистора обоснован тем, что его шум существенно меньше, чем шум биполярных транзисторов. Современные малошумящие микросхемы создаются на основе полевых транзисторов.

Различные схемы включения фоторезисторов, их особенности и обоснование выбора рассмотрены в ряде учебников и монографий [1, 12].

На рисунке 8.5а приведена простейшая и наиболее часто применяемая схема включения.

В паспортах фоторезисторов, как правило, приводится их темновое сопротивление R_T , то есть сопротивление фоторезистора в отсутствие падающего на него излучения.

Фоторезисторы отличаются относительно небольшим внутренним сопротивлением, не более десятков кОм. С точки зрения схемотехники они рассматриваются как генераторы напряжения с внутренним сопротивлением, равным R_T , и для них приводится величина их вольтовой чувствительности S_U , В/Вт, при сопротивлении нагрузки, равном темновому, $R_H = R_T$.

При больших фоновых засветках $\Phi_{\text{фона}}$ внутреннее сопротивление фоторезистора изменяется, поэтому при расчётах следует учитывать это изменение [12].

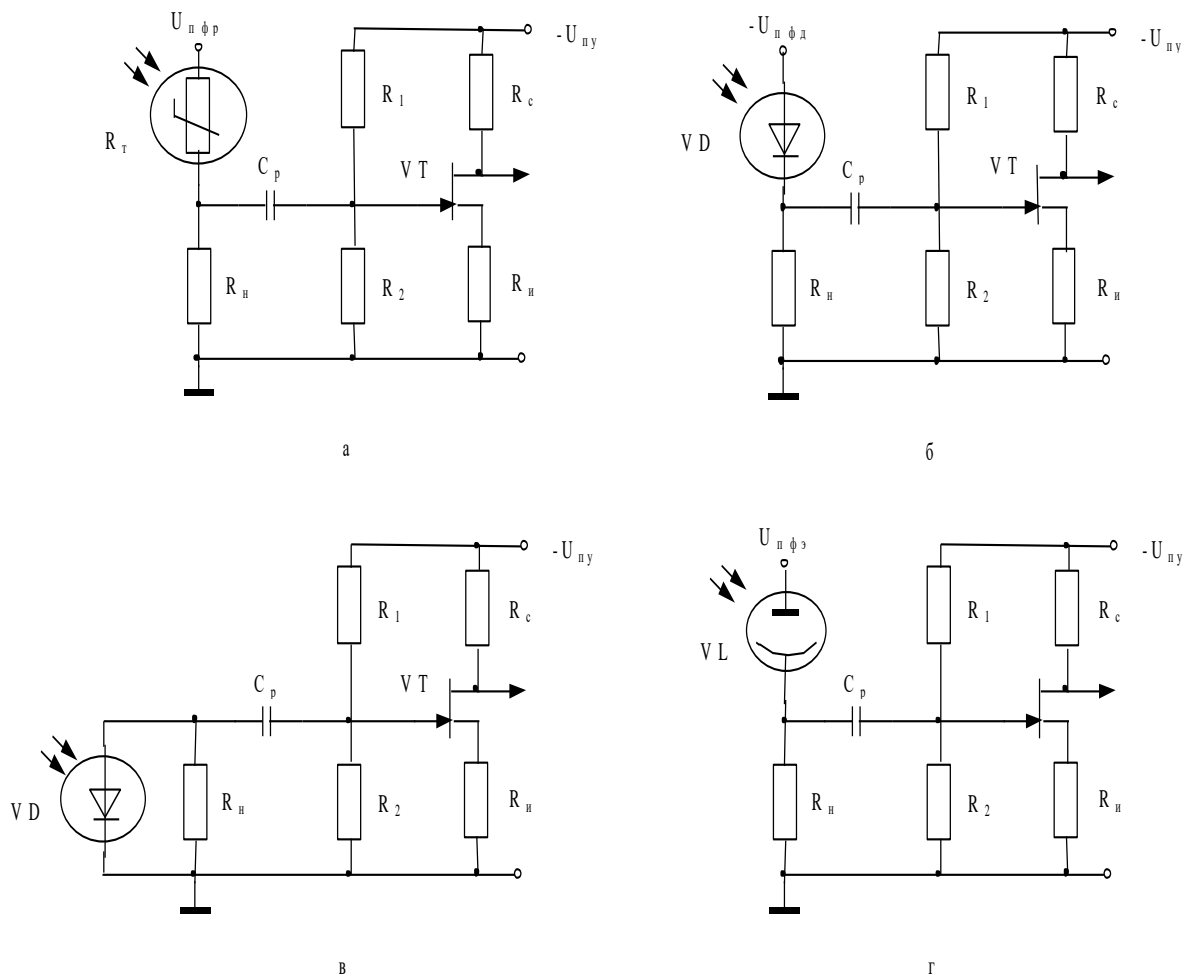


Рисунок 8.5 – Схемы включения фотоприёмников и предварительный усилитель на полевом транзисторе:

- а - фоторезистор; б - фотодиод в фотодиодном режиме;
- в - фотодиод в фотогальваническом режиме; г - фотоэлемент

Особенностью фоторезисторов является то, что, кроме вольтовой чувствительности S_U , для них иногда приводится относительное изменение сопротивления S_R , которое не зависит от схемы включения [12]:

$$S_R = \frac{\Delta R_\Phi}{\Delta \Phi R_\Phi}, \quad \left[\frac{1}{\text{Вт}} \right], \quad (8.24)$$

где ΔR_Φ – изменение величины сопротивления фоторезистора, вызванное изменением потока излучения $\Delta \Phi$; R_Φ – сопротивление фоторезистора при потоке Φ .

Выбор величины сопротивления нагрузки R_H возможен на основании различных критериев, например:

- по критерию максимальной вольтовой чувствительности,
- по критерию максимального отношения сигнал/шум и другим.

Максимальная вольтовая чувствительность обеспечивается при величине сопротивления нагрузки, равной величине темнового сопротивления фотоприёмника R_T [12]:

$$R_H = R_T . \quad (8.25)$$

При выборе величины нагрузки фоторезистора также следует учитывать его максимально допустимое напряжение питания $U_{\text{фр.макс}}$ и максимально допустимую электрическую мощность рассеивания $P_{\text{фр.макс}}$.

Напряжение питания цепи фоторезистор-сопротивление нагрузки должно удовлетворять условиям [12]:

$$U_{\text{п.фр.}} \leq U_{\text{фр.макс}} \frac{R_H}{R_\phi + 1} , \quad (8.26)$$

$$U_{\text{п.фр.}} \leq \frac{P_{\text{фр.макс}}}{U_{\text{фр.макс}}} R_\phi \left(\frac{R_H}{R_\phi} + 1 \right) . \quad (8.27)$$

Другие схемы включения фоторезисторов рассмотрены в [1, 12].

Схемы включения фотодиода (рис. 8.5б, 8.5в) и фотоэлемента, (рис. 8.5г) с точки зрения их эквивалентной электрической схемы идентичны. Фотоумножитель, как правило, включается аналогично.

Общим для этих фотоприёмников является то, что их внутреннее сопротивление, как правило, велико (более 10 МОм), поэтому их следует рассматривать как генераторы тока. В паспортах и справочных материалах для этих фотоприёмников приводится их токовая чувствительность S_I , А/Вт.

Методики расчёта сопротивления нагрузки для этих схем рассмотрены в [12].

При выборе режима включения фотодиода (фотодиодный или фотогальванический), как правило, выбирают фотодиодный режим включения, который обеспечивает более высокую чувствительность и линейность преобразования сигнала.

На первом этапе проектирования сопротивление нагрузки R_H , для фотодиодов, фотоэлементов, фотоумножителей, как правило, выбирают равным темновому сопротивлению фотоприёмника R_T , если $R_T \leq 2$ МОм, или принимают $R_H = 2$ МОм, если $R_T > 2$ МОм.

Для этих фотоприёмников справедливо соотношение (5.10) между вольтовой S_U и токовой S_I чувствительностями:

$$S_U = R_H S_I . \quad (8.28)$$

Из выражения (8.28) следует, что, чем больше сопротивление нагрузки R_H , тем больше вольтовая чувствительность S_U . Однако возможности увеличения сопротивления нагрузки ограничены максимальным потоком излучения $\Phi_{\text{макс}}$, который может зарегистрировать фотодиод. В [12] показано, что максимальное значение сопротивления нагрузки

$$R_{H \text{ макс}} = \frac{U_{\text{п.фд.}}}{\Phi_{\text{макс}} S_I + I_T} \quad (8.29)$$

где I_T – темновой ток фотодиода, который приводится в его паспорте или справочных материалах.

Пирозлектрические фотоприёмники и полупроводниковые болометры включаются в цепь с сопротивлением нагрузки до 50–200 МОм.

При выборе сопротивления нагрузки следует учитывать также постоянную времени T_K инерционного контура, образованного сопротивлением нагрузки R_H и ёмкостью инерционного контура C_K , образованного ёмкостью фотоприёмника $C_{\text{фп}}$, ёмкостью монтажа C_M и входной ёмкостью предварительного усилителя C_B :

$$T_K = R_H C_K = R_H (C_{\text{фп}} + C_M + C_B) \quad (8.30)$$

Ёмкость фотоприёмника указывается в его паспорте. Для предварительных расчётов можно задаться следующими значениями параметров: ёмкость монтажа $C_M = (1-5)$ пФ, входная ёмкость предварительного усилителя $C_B = (2-10)$ пФ.

При таких параметрах и невысокой частоте модуляции ($f_M \ll 10$ кГц) инерционность системы в ряде случаев определяется временем установления нормированной переходной характеристики (постоянной времени) ПОИ $\tau_{\text{пои}}$.

Постоянные времени фоторезисторов и фотодиодов приводятся в справочной литературе [1, 3], а постоянные времени фотоумножителей ($\tau_{\text{фy}} \approx 1...5$ нс) и фотоэлементов ($\tau_{\text{фy}} \approx 10^{-12}$ с) пренебрежимо малы.

С учётом изложенных соображений сопротивление нагрузки R_H и постоянная времени $\tau_{\text{пои}}$ должны удовлетворять условиям:

$$R_H \leq \frac{0,1}{C_K f_M}, \quad \tau_{\text{пои}} \leq \frac{0,1}{f_M} \quad (8.31)$$

Основной составляющей шума полевых транзисторов является тепловой шум канала, который характеризуется эквивалентным шумовым сопротивлением:

$$R_{ш} = \frac{2}{3 S_{ПТ}} \quad (8.32)$$

где $S_{ПТ}$ – крутизна вольтамперной характеристики полевого транзистора (её типовое значение – $S_{ПТ} = (1...3) \cdot 10^{-3}$ А/В).

Спектральная плотность дисперсии (мощности) тока шума полевого транзистора, приведённая к его входу:

$$D_{fI_{ш.ПТ}} = \frac{4kT_{ПТ}R_{ш}}{R_{Н}^2} \quad (8.33)$$

Спектральная плотность дисперсии (мощности) напряжения шума полевого транзистора, приведённая к его входу:

$$D_{fU_{ш.ПТ}} = 4kT_{ПТ}R_{ш} \quad (8.34)$$

где $T_{ПТ}$ – температура полевого транзистора.

Для рассмотренных схем включения фотоприёмников в сочетании с предварительным усилителем (рис. 8.5) выражения (8.22) и (8.23), с учётом выражений (8.33) и (8.34), принимают вид:

$$D_{fI_{ш.ОЭП}} = D_{fI_{фот.ш.фп.}} + D_{fI_{ш.фп}} + D_{fI_{др.ш.фп.доп}} + D_{fI_{т.ш.РН}} + D_{fI_{ш.ПТ}} \quad (8.35)$$

$$D_{fU_{ш.ОЭП}} = D_{fU_{фот.ш.фп.}} + D_{fU_{ш.фп}} + D_{fU_{др.ш.фп.доп}} + D_{fU_{т.ш.РН}} + D_{fU_{ш.ПТ}} \quad (8.36)$$

Выражения (8.35) и (8.36), как и более общие выражения (8.22) и (8.23), позволяют оценить спектральную плотность дисперсии (мощности) шума, приведённую к выходу фотоприёмника, то есть ко входу предварительного усилителя.

Шумы предварительного усилителя физически появляются только на его выходе, но выражения (8.33) и (8.34) описывают величину шума приведённой к его входу.

Оценка параметров сигнала, в п.8.1 также приведена применительно к выходу фотоприёмника, то есть ко входу предварительного усилителя.

8.4 Отношение сигнал/шум в оптико-электронном приборе

Энергетический расчёт оптико-электронного прибора позволяет рассчитать величины параметров сигнала и шума, а также их изменение при прохождении сигнала и шума по тракту оптико-электронного прибора или

системы от источника оптического излучения до формирования конечной информации потребителю.

Вопросы энергетического расчёта оптико-электронных приборов рассмотрены в ряде трудов известных учёных, ставших классическими [1, 3, 4, 5, 7].

Настоящее учебное пособие не претендует на сопоставимую ширину охвата и глубину анализа вопросов теории и расчёта оптико-электронных приборов. Здесь сделан акцент на применении в практических расчётах параметров и характеристик [44] элементов приборов, измеряемых в соответствии с установленными методиками [45].

Возможности решения задач обнаружения сигнала, измерения его параметров и передачи информации ограничены шумами, которые обусловлены физической природой оптического излучения, электронов и их взаимодействием с веществом:

- невозможно обнаружить сколь угодно малый сигнал;
- невозможно измерить параметры сигнала с бесконечно малой погрешностью;
- невозможно передать информацию без её искажения.

Одним из универсальных параметров, характеризующим предельные возможности оптико-электронного прибора, является отношение сигнал/шум.

При анализе прохождения сигнала и шума по цепи оптико-электронного прибора его следует рассматривать как частотный фильтр с эквивалентной полосой частот $\Delta f_{\text{ОЭПэкв}}$.

Отношение сигнал/шум μ — это безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала $P_{\text{сигн}}$ к мощности шума $P_{\text{шума}}$ в эквивалентной полосе частот $\Delta f_{\text{ОЭПэкв}}$:

$$\mu = \frac{P_{\text{сигн}}}{P_{\text{шума}}} . \quad (8.37)$$

Отношение сигнал/шум может быть выражено в децибелах:

$$\mu(\text{дБ}) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{сигн}}}{P_{\text{шума}}} \right) \quad (8.38)$$

Спектр шума бесконечен, он охватывает всю полосу частот $\Delta f_{\text{ОЭПэкв}}$.

Из выражения (8.22) следует, что дисперсия (мощность) тока белого шума оптико-электронного прибора в эквивалентной полосе частот $\Delta f_{\text{ОЭПэкв}}$, приведённая к выходу фотоприёмника, то есть ко входу предварительного усилителя может быть рассчитана с помощью следующего выражения:

$$P_{I \text{ шумаОЭП}} = \overline{I_{\text{ш.ОЭП}}^2} = D_{fI_{\text{ш.ОЭП}}} \Delta f_{\text{ОЭПэкв}} , \quad (8.39)$$

где

$$D_{fI_{\text{ш.ОЭП}}} = D_{fI_{\text{фот.ш.фп.}}} + D_{fI_{\text{ш.фп}}} + D_{fI_{\text{др.ш.фп.доп}}} + \\ + D_{fI_{\text{т.ш.РН}}} + D_{fI_{\text{ш.ПУ}}} . \quad (8.40)$$

Из выражения (8.23) следует, что дисперсия (мощность) напряжения белого шума оптико-электронного прибора в эквивалентной полосе частот $\Delta f_{\text{ОЭПэкв}}$, приведённая к выходу фотоприёмника, то есть ко входу предварительного усилителя, может быть рассчитана с помощью следующего выражения:

$$P_{U \text{ шумаОЭП}} = \overline{U_{\text{ш.ОЭП}}^2} = D_{fU_{\text{ш.ОЭП}}} \Delta f_{\text{ОЭПэкв}} , \quad (8.41)$$

где

$$D_{fU_{\text{ш.ОЭП}}} = D_{fU_{\text{фот.ш.фп.}}} + D_{fU_{\text{ш.фп}}} + D_{fU_{\text{др.ш.фп.доп}}} + \\ + D_{fU_{\text{т.ш.РН}}} + D_{fU_{\text{ш.ПУ}}} . \quad (8.42)$$

В п. 8.1 рассмотрен пример преобразования теоретически неограниченного во времени синусоидального сигнала.

Переменная составляющая тока фотоприёмника для рассмотренного в п. 8.1 примера, согласно выражениям (8.9) и (8.10) имеет вид:

$$I_{\sim \text{общ}}(t) = \Phi_{\sim} S_I \sin \omega_m t = I_{\sim} \sin \omega_m t . \quad (8.43)$$

Средняя мощность неограниченного во времени синусоидально модулированного сигнала, согласно [54, 55], равна:

$$P_{\text{сигн}} = \frac{(I_{\sim})^2}{2} . \quad (8.44)$$

или

$$P_{\text{сигн}} = \frac{(U_{\sim})^2}{2} . \quad (8.45)$$

Рассматриваемый в настоящем примере бесконечный синусоидальный сигнал имеет нулевую ширину полосы частот.

Из выражений (8.37), (8.44) и (8.39) следует, что отношение сигнал/шум для рассматриваемого примера синусоидально модулированного сигнала на фоне белого шума опико-электронного прибора с эквивалентной шумовой полосой частот $\Delta f_{\text{ОЭПэкв}}$:

$$\mu = \frac{(I_{\sim})^2}{2 D_{fI_{\text{ш.ОЭП}}} \Delta f_{\text{ОЭПэкв}}} \quad (8.46)$$

или, с учётом выражений (8.37), (8.45) и (8.41):

$$\mu = \frac{(U_{\sim})^2}{2 D_{fU_{\text{ш.ОЭП}}} \Delta f_{\text{ОЭПэкв}}} \quad (8.47)$$

Рассмотренный пример синусоидально модулированного сигнала является простейшим.

Для оценки отношения сигнал/шум в различных вариантах реализации преобразования и обработки информации в опико-электронных приборах различного назначения следует обратиться к многочисленной литературе по данному вопросу [1, 3, 4, 5, 7, 54, 55].

8.5 Расчёт шумовой погрешности измерительного опико-электронного прибора

При проектировании измерительного опико-электронного прибора необходимо оценить предельную погрешность измерения, то есть погрешность, ограниченную только шумами.

Этот вопрос рассматривается в известных трудах [1, 3, 4, 7, 54, 55], а также в многочисленных научных публикациях.

Рассмотрим пример оценки амплитуды одномерного, изменяющегося во времени сигнала.

Существуют различные оптимальные алгоритмы обработки сигнала, которые соответствуют различным критериям [1, 3, 4, 54].

При оптимальной по критерию максимума правдоподобия обработке сигнала [54, 55] средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды тока $\sigma_{\text{ш}I}$ или напряжения $\sigma_{\text{ш}U}$ фотосигнала с детерминированной начальной фазой на фоне нормального белого шума:

$$\sigma_{шI} = \sqrt{\frac{D_{fI_{ш.0ЭП}}}{2e_0}} \quad \text{или} \quad \sigma_{шU} = \sqrt{\frac{D_{fU_{ш.0ЭП}}}{2e_0}}, \quad (8.48)$$

где e_0 – удельная энергия сигнала за время измерения $T_{изм}$:

$$e_0 = \int_0^{T_{изм}} f^2(t) dt \quad (8.49)$$

здесь $f^2(t)$ – нормированный закон модуляции сигнала.

Если оптическое излучение модулировано синусоидально (выражение (8.1), рис. 8.3), то из (8.49) следует:

$$e_0 = \int_0^{T_{изм}} (\sin \omega_m t)^2 dt = \frac{T_{изм}}{2}. \quad (8.50)$$

Из выражений (8.48) и (8.50) следует, что при оптимальной по критерию максимума правдоподобия обработке синусоидально модулированного оптического сигнала средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды тока $\sigma_{шI}$ или напряжения $\sigma_{шU}$ фотосигнала с детерминированной начальной фазой на фоне нормального белого шума:

$$\sigma_{шI} = \sqrt{\frac{D_{fI_{ш.0ЭП}}}{T_{изм}}}, \quad \sigma_{шU} = \sqrt{\frac{D_{fU_{ш.0ЭП}}}{T_{изм}}}. \quad (8.51)$$

Если оптическое излучение модулировано в виде прямоугольных импульсов со скважностью, равной 2, то из (8.49) следует:

$$e_0 = \int_0^{T_{изм}} f^2(t) dt = T_{изм}. \quad (8.52)$$

Из выражений (8.48) и (8.51) следует, что при оптимальной по критерию максимума правдоподобия обработке оптического сигнала, модулированного в виде прямоугольных импульсов со скважностью, равной 2, средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды тока $\sigma_{шI}$ или напряжения $\sigma_{шU}$ фотосигнала с детерминированной начальной фазой на фоне нормального белого шума:

$$\sigma_{ш I} = \sqrt{\frac{D_{fI_{ш.ОЭП}}}{2 T_{изм}}} , \quad \sigma_{ш U} = \sqrt{\frac{D_{fU_{ш.ОЭП}}}{2 T_{изм}}} . \quad (8.53)$$

Выражения (8.48) позволяют рассчитать шумовую (предельную) погрешность измерения амплитуды сигнала и при других законах модуляции оптического излучения.

Вопросы по 8 разделу

1. Какие составляющие оптического излучения могут присутствовать в плоскости входного зрачка оптико-электронного прибора, кроме полезного оптического сигнала объекта?
2. Какие средства и методы предусмотрены в схеме прибора для выделения информативной составляющей потока излучения?
3. Какие составляющие полезного сигнала содержит поток излучения на фотоприёмнике при синусоидальной модуляции излучения источника?
4. Из каких составляющих складывается общий поток излучения на чувствительной площадке фотоприёмника?
5. Почему чувствительность фотоприёмника к излучению фона и источника в общем случае будет различной?
6. Какие составляющие электрического сигнала могут присутствовать на выходе фотоприёмника, кроме полезного сигнала от источника? Как описывается фототок и общий ток в цепи приёмника?
7. Какой вывод можно сделать на основе анализа формул (8.8) и (8.9)?
8. От чего зависит амплитуда переменной составляющей сигнала (напряжения или тока)?
9. Почему для передачи информации в оптико-электронном приборе используются, как правило, модулированное излучение?
10. Из-за каких факторов в реальных условиях эксплуатации оптико-электронного прибора возникает дополнительная по отношению к условиям аттестации постоянная составляющая фототока?
11. Что вызывает появление дополнительной составляющей спектральной плотности дисперсии дробового шума на выходе фотоприёмника?
12. Как может быть представлено суммарное значение спектральной плотности дисперсии шума фотоприёмника с учётом дополнительной составляющей дробового шума?

13. Какие составляющие шума должны быть учтены в выражении для расчёта спектральной плотности дисперсии тока/напряжения шума, приведённой к выходу фотоприёмника?
14. Почему для обработки сигнала часто используются схемы с предварительным усилителем на основе полевого транзистора?
15. На основе каких критериев выполняется выбор величины сопротивления нагрузки?
16. При каком значении сопротивления нагрузки обеспечивается максимальная вольтовая чувствительность фоторезистора?
17. Почему при выборе режима включения фотодиода (фотодиодный или фотогальванический), как правило, выбирают фотодиодный режим?
18. Как выбирается сопротивление нагрузки для фотодиодов, фотоэлементов, фотоумножителей?
19. Чем ограничены возможности увеличения сопротивления нагрузки фотодиода?
20. Каким условиям должны удовлетворять сопротивление нагрузки и постоянная времени схемы включения фотоприёмника?
21. Какие составляющие содержит выражение для расчёта дисперсии шума, приведённой ко входу предварительного усилителя?
22. Какова основная цель энергетического расчёта опико-электронного прибора?
23. Чем ограничены возможности решения задач обнаружения сигнала, измерения его параметров и передачи информации?
24. Как определяется величина отношения сигнал/шум (в абсолютном или логарифмическом представлении)?
25. Как можно рассчитать отношение сигнал/шум для синусоидально модулированного сигнала на фоне белого шума?
26. Как рассчитать предельную погрешность оценки амплитуды одномерного модулированного сигнала при его оптимальной обработке по критерию максимума правдоподобия?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены этапы энергетического расчёта оптико-электронного прибора, который включает:

- расчёт энергии собственного и отражённого оптического излучения объектов (целей), фона, помех;
- расчёт преобразований параметров энергии оптического излучения оптической системой и оценку величины этих параметров на чувствительном элементе фотоприёмника;
- анализ преобразования параметров энергии оптического излучения фотоприёмником в параметры электрического сигнала;
- расчёт шума фотоприёмника в реальных условиях эксплуатации;
- расчёт шума элементов электрической схемы оптико-электронного прибора, в частности сопротивления нагрузки фотоприёмника и предварительного усилителя;
- расчёт соотношения сигнала и шума в оптико-электронном приборе и оценку параметров обнаружения, параметров погрешности измерения физических величин, характеризующих объект, погрешности систем управления и других параметров прибора в зависимости от решаемой им задачи.

Учебное пособие не претендует на анализ всех вопросов проектирования оптико-электронных приборов. Эти вопросы раскрываются в многочисленных научных трудах и учебниках.

В учебном пособии рассмотрены вопросы применения измеряемых технических параметров и характеристик элементов, которые приводятся в их паспортах и информационных материалах производителей.

При изложении материала в максимально возможной степени использованы термины и определения, установленные государственными стандартами в области оптики и фотоники.

Литература

1 Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учебное пособие. 3-е изд., испр. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 704 с. ISBN 978-5-8114-1036-1.

2 ГОСТ Р 58568-2019. Оптика и фотоника. Фотоника. Термины и определения.

3 Порфирьев Леонид Федорович. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах : учебник / Порфирьев Л.Ф. — Изд. 2-е, стер. — СПб. [и др.] : Лань, 2013. — 386, [1] с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — Библиогр.: с. 383-384. — ISBN 978-5-8114-1512-0

4 Теория оптико-электронных систем: учебное пособие / Г.М. Мосягин; под ред. В.Я. Колочкина. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 348с. ISBN 978-7037-5260-6

5 Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов : учебник / Ю. Г. Якушенков. — 6-е. — Москва : Логос, 2018. — 568 с. — ISBN 978-5-98704-533-6.

6 Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. ИК системы смотрящего типа. М.: Логос, 2004. 444 с.

7 Лебедев Е.Г. Системы импульсной оптической локации: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. - 368 с.:ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература.) ISBN 978-5-8114-1588-5 (700 экз).

8 Хадсон Р. Инфракрасные системы. Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 536с.

9 Основы оптики : научное издание / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. С. Н. Бреуса, А. И. Головашкина, А. А. Шубина ; под ред. Г. П. Мотулевич. - 2-е изд. , испр. - М. : Наука, 1973. - 715 с. : ил. - Библиогр.: в конце глав. - Текст : непосредственный.

10 Основы оптики в техническом университете: учебное пособие / А.М. Хорохоров. – Москва: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2021. – Библиогр.: 389 с.: ил.

11 Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники оптического излучения - СПб: Политехника, 2009. – 415 с.

12 Ишанин Г.Г., Челибанов В.П. Приемники оптического излучения: Учебник/Под ред. профессора В.В. Коротаева. — СПб. Издательство «Лань», 2014. — 304 с: ил. — (Учебники для вузов, специальная литература). Режим доступа: <http://e.lanbook.com/>

13 Rogalski A. Next decade in infrared detectors. October 2017. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications. DOI:10.1117/12.2300779.

14 Ллойд Д. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.

15 Тепловизионные системы. Г.С. Мельников, С.В. Михеев, А.Ю. Карузин, В.В. Коротаев, В.М. Самков, В.А. Тупиков / Под ред. профессора В.В. Коротаева. – СПб: Университет ИТМО, 2024. – 152 с.

16 Handbook of Optics (in 5 vol.) // Ed.-in-Chief M. Bass. 3rd ed. New York [etc.]: McGraw-Hill, (2010). Vol. 2: Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry // J. H. Altman [etc.]; ed.: M. Bass, V. N. Mahajan, E. V. Stryland .— [2010] .— XXIV, 4075, [4] p.: il. ISBN 978-0-07-163600-1.— ISBN 978-0-07-149890-6.

17 Korotaev Valery V., Maraev Anton A. Sources and detectors of optical radiation - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2017. - 104 с. - Режим доступа: https://books.ifmo.ru/book/2098/Sources_and_detectors_of_optical_radiation.htm

18 ГОСТ Р 70973—2023. Оптика и фотоника. Оптика физическая. Термины, определения и буквенные обозначения основных величин. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 34 с.

19 ГОСТ 8.654—2016. Государственная система обеспечения единства измерений. Фотометрия. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

20 ГОСТ 8.332—2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

21 ГОСТ 8.417—2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. М.: Стандартинформ, 2018. 34 с.

22 Брамсон, Микаэль Абрамович. Инфракрасное излучение нагретых тел / Брамсон, Микаэль Абрамович. — М. : Наука, 1964. — 223с. : ил. 1964

23 Брамсон, Микаэль Абрамович. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел / М. А. Брамсон ; Акад. наук СССР. - Москва : Наука, 1964. - 313

24 Коротаев В.В., Мусяков В.Л. Методические указания к курсовой работе по курсу "Источники и приемники излучения". - Л.: ЛИТМО, 1991. - 26 с.

25 Коротаев В.В., Мусяков В.Л. Энергетический расчёт ОЭП / Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию. - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006, 44 с.

26 В.В. Коротаев Расчёт шумовой погрешности оптико-электронных приборов. Методические указания - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. - 47 с. - 100 экз. URL: https://books.ifmo.ru/book/764/raschet_shumovoy_pogreshnosti_optiko-elektronnyh_priborov._metodicheskie_ukazaniya.htm

27 https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/infrared_kird0001e.pdf (дата обращения: 20.02.2025)

28 ГОСТ Р 54814 — 2018. Светодиоды и светодиодные модули для общего освещения и связанное с ними оборудование. Термины и определения. М. Стандартинформ. 2018. 15с.

29 https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/110660_series_kled1055e.pdf (дата обращения: 20.02.2025)

30 https://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Solar_spectrum_ru.svg (дата обращения: 20.02.2025)

31 Ландсберг Г.С. Оптика: учебное пособие для вузов. — 6-е изд. стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 848 с. — ISBN 5-9221-0314-8.

32 МИ 2590-2008. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталонные материалы. Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева. Каталог 2008-2009. Санкт-Петербург. 2008. 107с.

33 Иванов В.С., Золотаревский Ю.М., Котюк А.Ф., Либерман А.А. и др. Основы оптической радиометрии / Под ред. проф. А.Ф. Котюка. — М.: Физматлит, 2003. — 544 с. — ISBN 5-9221-0427-6.

34 ГОСТ Р 59607— 2021 Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик фотоприёмников Москва. Российский институт стандартизации. 2021

35 Турыгин И.А. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение, ч. 1, 1965; ч. II, 1966.

36 Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов / Серия «Выдающиеся ученые ИТМО. - СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. - 274 с.

37 Федотов Ю.В., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А., Чумаченко С.И. Лабораторные измерения спектров отражения лесной растительности Европейской части России в диапазоне 1–2,4 мкм // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 15–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-15-24>

38 Korotaev, V.V.; Rodikova, L.S.; Timofeev, A.N.; Ryzhova, V.A.; Yarishev, S.N.; Djamiykov, T.S.; Marinov, M.B. An Optoelectronic System for the Online Monitoring of the Chord Length of Steam Turbine Rotor Blades for Early Fault Detection. *Machines* 2025, 13, 174. <https://doi.org/10.3390/machines13030174>

39 Korotaev V.V., Pantyushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. Deflection measuring system for floating dry docks // Ocean Engineering - 2016, Vol. 117, pp. 39-44.

40 Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Vasileva A.V., Anisimov A.G., Korotaev V.V. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale // Measurement - 2018, Vol. 123, pp. 226-234.

41 Сычева Е.А., Коротаев В.В., Некрылов И.С., Тимофеев А.Н., Клещенок М.А., Пуга Коэлью Родригеш Ж. Выбор параметров оптико-электронных систем контроля смещений с активными реперными марками // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics] - 2018. - Т. 18. - № 2(114). - С. 205–211.

42 hamamatsu.com

43 <https://www.sony.net/>

44 ГОСТ Р 59605—2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения. Термины и определения. Москва. Российский институт стандартизации. 2021

45 ГОСТ Р 59607— 2021 Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик фотоприёмников Москва. Российский институт стандартизации. 2021

46 https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/g12180_series_kird1121e.pdf (дата обращения: 20.02.2025)

47 https://www.sony-semicon.com/files/62/flyer_industry/IMX990_991_992_993_Flyer_en.pdf (дата обращения: 20.02.2025)

48 Бокшанский В.Б., Карасик В.Е. Расчёт характеристик фоточувствительных приборов с зарядовой связью: Учебно-методическое пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 54 с.

49 Князев М.Г., Бондаренко А.В., Докучаев И.В. Расчёт пороговых значений потока излучения и освещённости для ПЗС матриц Kodak KAI-1003M, Kodak FTF-3020M b Philips KAI-1020. Цифровая обработка сигналов. 2006. №3. С.49-56.

50 <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors.html>

51 https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/infrared_kird0001e.pdf (дата обращения: 20.02.2025)

52 https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/p11120-201_kird1113e.pdf (дата обращения: 20.02.2025)

53 ГОСТ 8.023-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений световых величин непрерывного и импульсного излучений. Москва. Стандартиформ. 2019.

54 Лебедько Е.Г. Теоретические основы передачи информации, М., СПб., Лань, 2011, 350с.

55 Лебедько Е.Г. Преобразование информации в технических системах, Учебное пособие для ВУЗов. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 151 с

**Коротаев Валерий Викторович
Рыжова Виктория Александровна**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А