Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Московский государственный университет
геодезии и картографии

Источники и приемники оптического излучения

Москва
МИИГАиК
2020

Рецензенты:
канд. техн. наук **Н.Х. Голыгин** (МИИГАиК);
доктор техн. наук **В.Г. Лысенко** (ФГУП «ВНИИМС»)

Составитель Шилкин В.А.
Источники и приемники оптического излучения: учебно-методическое пособие. — М.: МИИГАиК, 2020. — 28 с.

Написано в соответствии с утвержденными программами дисциплин «Оптические и оптико-электронные приборы и системы», «Источники и приемники оптического излучения», рекомендовано кафедрой оптико-электронных приборов и утверждено к изданию редакционно-издательской комиссией факультета оптического приборостроения. Является учебным пособием для проведения лабораторных практикумов.

Электронная версия учебно-методического пособия размещена на сайте библиотеки МИИГАиК http://library.miigaik.ru.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Расчетное задание №1

Расчет изотермы Планка……4

Расчетное задание №2

Расчет соотношений между энергетическими и фотометрическими величинами……10

Расчетное задание №3

Расчет коэффициента использования излучения приемником……..16

Расчетное задание №4

Пересчет параметров приемника излучения……..20

Расчетное задание № 1

РАСЧЕТ ИЗОТЕРМЫ ПЛАНКА

Целью работы является приобретение практических навыков проведения расчетов с использованием законов теплового излучения.

В теории теплового излучения при расчетах оптико-электронных систем [3] используется понятие «черное тело» как идеальный излучатель. Под *черным телом* (ЧТ) [1] понимают такой тепловой излучатель, который имеет при заданной температуре на всех длинах волн максимально возможную спектральную интенсивность поверхностной плотности потока излучения (спектральной плотности энергетической светимости) $M_{e\lambda}$.

Основные законы теплового излучения

Закон Кирхгофа: в точке поверхности теплового излучателя при любой температуре и любой длине волны спектральный коэффициент направленного излучения для заданного направления равен спектральному коэффициенту поглощения α_λ для противоположно направленного неполяризованного излучения. При этом

$$\frac{M_{e\lambda 1}}{\alpha_{\lambda 1}} = \frac{M_{e\lambda 2}}{\alpha_{\lambda 2}} = \ldots = \frac{M_{e\lambda n}}{\alpha_{\lambda n}} = M_{e\lambda ЧТ},$$

где $M_{e\lambda ЧТ}$ спектральная плотность энергетической светимости ЧТ.

В соответствии с законом Кирхгофа, чем больше тело поглощает энергию, тем оно больше ее излучает. ЧТ имеет коэффициент поглощения $\alpha_{\lambda ЧТ} = 1$ и наибольшие значения $M_{e\lambda}$ (полный излучатель) для всех длин волн излучения.

Закон Планка (основной и наиболее общий закон в теории теплового излучения) дает зависимость **спектральной интенсивности поверхностной плотности потока излучения** $M_{e\lambda}$ от длины волны λ, *мкм,* и температуры *T, К* (температура по шкале Кельвина), ЧТ:

$$M_{e\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1 \right]^{-1}, \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1},$$

где $C_1 = 37415\cdot 10^4$, Вт·мкм^4·м$^{-2}$, $C_2 = 14388$, мкм·К.

Графическим изображением закона Планка при T=const является так называемая изотерма Планка. Вид изотермы Планка показан на рисунке 1.1.

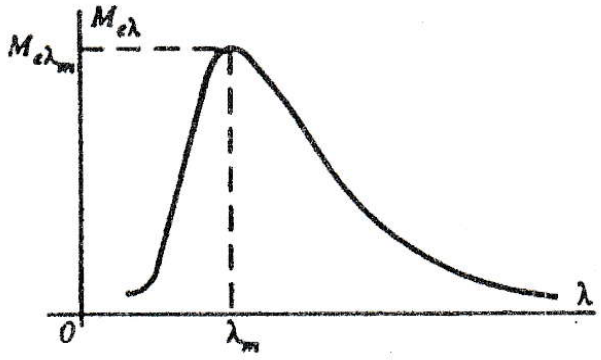

Рисунок 1.1. Изотерма Планка

Закон Вина определяет длину волны излучения ЧТ, соответствующую максимуму кривой $M_{e\lambda} = f(\lambda, T)$:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}, \text{ мкм.}$$

Максимальное значение спектральной интенсивности поверхностной плотности потока излучения может быть найдено как

$$M_{e\lambda m} = 1,2864 \cdot 10^{-11} \cdot T^5, \text{ Вт}\cdot \text{м}^{-2}\cdot \text{мкм}^{-1}.$$

Закон Стефана-Больцмана устанавливает связь между **поверхностной плотностью потока излучения (энергетической светимостью)** M_e черного тела и его температурой T:

$$M_e = \int_0^\infty M_{e\lambda} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4, \text{ Вт}\cdot \text{м}^{-2},$$

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

В диапазоне длин волн от 0 до λ_m поверхностная плотность потока излучения

$$M_e^* = \int_0^{\lambda_m} M_{e\lambda} \cdot d\lambda = \frac{1}{4} \cdot \sigma \cdot T^4 = 0,25 \cdot M_e.$$

Исходные данные.

№	Наименование параметра	Вариант	Примечание
1	Температура излучателя (ЧТ) T, К	$(И + Ф) \cdot 100$	Принятые обозначения:
2	Спектральный диапазон $(\lambda_1 \div \lambda_2)$, мкм	от 0,25 до 4	$И$ – количество букв в имени студента;
3	Шаг дискретизации $\Delta\lambda$, мкм	0,25	$Ф$ – количество букв в фамилии студента

В расчетном задании требуется рассчитать отрезок изотермы Планка в заданном спектраль-

ном диапазоне при заданной температуре T черного тела и определить, какая часть энергии K приходится на диапазон длин волн от λ_1 до λ_2 мкм.

Порядок расчета.

1. По закону Планка рассчитать спектральную интенсивность поверхностной плотности $M_{e\lambda}$ для температуры T черного тела с шагом дискретизации $\Delta\lambda$ для диапазона длин волн от λ_1 до λ_2 мкм.

2. С учетом закона Стефана-Больцмана определить, какая часть энергии K приходится на диапазон длин волн от λ_1 до λ_2 мкм с по формуле

$$K = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{e\lambda} \cdot d\lambda} \approx \frac{\Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda}}{\sigma \cdot T^4}.$$

3. В п. 2 интеграл $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \cdot d\lambda$ вычислялся путем его замены на сумму вписанных прямоугольников. Повысить точность вычислений можно, применив метод трапеций. При этом площадь фигуры под графиком любой кривой можно разделить на прямоугольные трапеции. Сумма площадей этих трапеций и будет искомым значением определённого интеграла. С учетом, что площадь трапеции определяется как полусумма оснований, умноженная на высоту, получим для i – й трапеции $M_{ei} = \Delta\lambda \cdot (M_{e\lambda i+1} + M_{e\lambda i})/2$. При этом интеграл для вычисления поверхностной плотности потока излучения, для диапазона длин волн от λ_1 до λ_2, заменяется на сумму вписанных трапеций $\Sigma M_{ei} \approx \Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} (M_{e\lambda i+1} + M_{e\lambda i})/2$. Тогда относительная доля энергии, которая приходится на диапазон длин волн от λ_1 до λ_2,

Содержание отсчета.

Расчетные формулы, таблицы с результатами расчета график изотермы, значение K, выводы по результатам расчетов.

Пример 1.1.

Исходные данные.

1. Температура излучателя (ЧТ) $T = 2898$ К.
2. Спектральный диапазон от 0 до $\lambda_м$.
3. Шаг дискретизации $\Delta\lambda = 0{,}1$ мкм.

В расчетном задании требуется рассчитать отрезок изотермы Планка при заданной температуре T черного тела и определить, какая часть энергии K приходится на диапазон длин волн от 0 до $\lambda_м$.

Таблица 1.1. Результаты расчета в EXCEL изотермы Планка и относительной доли энергии K, которая приходится на диапазон длин волн от 0 до $\lambda_м$ для ЧТ с температурой T = 2898 К.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	T	λ	$\Delta\lambda$	$M_{e\lambda}$	M_e	$K_{прям}$	$(Me\lambda_{i+1}+Me\lambda_i)/2$	$K_{трап}$
2	2898	0,1	0,1	=(374150000*СТЕПЕНЬ(B3;-5))/(EXP(14388/(B3*A$2))-1) 0,00	=5,67*СТЕПЕНЬ(10;-8)**СТЕПЕНЬ(A2;4) 3999231,86	=C2*D12/E2 0,28	0,00	=C2*G12/E2 0,25
3		0,2		19,36			=D3+D2)/2 9,68	
4		0,3		10003,47			5011,41	
5		0,4		148689,69			79346,58	
6		0,5		583234,92			365962,30	
7		0,6		1226749,07			904992,00	
8		0,7		1852038,54			1539393,81	
9		0,8		2308019,33			2080028,93	
10		0,9		2557523,59			2432771,46	
11	λ_m=	1		2629667,12			2593595,35	
12			$\Sigma M_{e\lambda}$=	=СУММ(D2:D11) 11315945,09		Σ=	=СУММ(G2:G11) 10001111,53	
13			$M_{e\lambda m}$=	=1,2864*СТЕПЕНЬ(10;-11)*СТЕПЕНЬ(A2;5) 2629468,29				

Примечание. Оператор $ позволяет зафиксировать величину при копировании по столбцу, например, значение температуры из ячейки A2, как A$2.

Результаты расчета: $K = K_{прям}$ = 0,28 при применении метода вписанных прямоугольников и $K = K_{трап}$ = 0,25 (что соответствует теории для диапазона длин волн от 0 до $\lambda_м$) для метода трапеций.

Относительная погрешность вычислений при применении метода вписанных прямоугольников δ = (0,28 – 0,25)/0,25 · 100 % = 12 %.

Вывод: при уменьшении шага дискретизации результат вычислений $K_{прям}$ по методу вписанных прямоугольников будет приближаться к результатам вычислений $K_{трап}$ по методу трапеций, так при $\Delta\lambda$ = 0,05 мкм $K_{прям}$ = 0,27.

Метод численного интегрирования функции одной переменной метод парабол или метод Симпсона имеет практически такую же точность, как и метод трапеций.

Пример 1.2.

Исходные данные.

1. Температура излучателя (черное тело) T = 1200 К.

2. Спектральный диапазон $(\lambda_1 \div \lambda_2)$ = (0,25÷4) мкм.

3. Шаг дискретизации $\Delta\lambda$ = 0,25 мкм.

В расчетном задании требуется рассчитать отрезок изотермы Планка при заданной температуре T черного тела и определить, какая часть энергии K приходится на диапазон длин волн от 0,25 до 4 мкм.

Таблица 1.2. Результаты расчета в EXCEL изотермы Планка и относительной доли энергии K, которая приходится на диапазон длин волн от 0,25 до 4 мкм для черного тела с температурой T = 1200 К.

	A	B	C	D	E	F	G	
1	T	λ	$\Delta\lambda$	$M_{e\lambda}$	M_e	$K_{прям}$	$(M_{e\lambda i}+1+M_{e\lambda i})/2$	$K_{трап}$
2	1200	0,25	0,25	=(374150000*СТЕПЕНЬ(B2;-5))/ /(EXP(14388/(B2*A$2))-1) 0	=5,67*СТЕПЕНЬ(10;-8) *СТЕПЕНЬ(A2;4) 117573,12	=C2*D18/E2 0,63	0,00	=C2*G18/E2 0,61
3		0,5		0,46			=(D3+D2)/2 0,23	
4		0,75		179,81			90,14	
5		1		2321,98			1250,89	
6		1,25		8370,91			5346,44	
7		1,5		16644,69			12507,80	
8		1,75		24142,24			20393,46	
9		2		29200,05			26671,15	
10		2,25		31618,21			30409,13	
11		2,5		31920,72			31769,47	
12		2,75		30792,41			31356,57	
13		3		28824,67			29808,54	
14		3,25		26448,91			27636,79	
15		3,5		23949,55			25199,23	
16		3,75		21499,49			22724,52	
17		4		19194,82			20347,16	
18			$\Sigma M_{e\lambda}$=	=СУММ(D2:D17) 295108,94		Σ=	=СУММ(G2: G17) 285511,30	
19	λ_m=	2,415	$M_{e\lambda m}$=	=1,2864*СТЕПЕНЬ(10;-11) *СТЕПЕНЬ(A2;5) 32009,75				

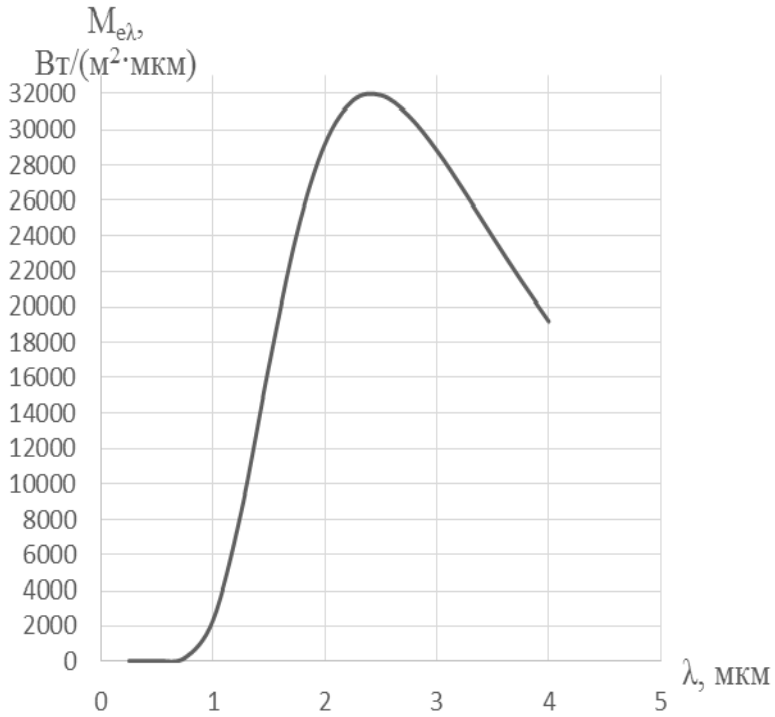

Рисунок 1.2. Зависимость $M_{e\lambda}$ от длины волны $\boldsymbol{\lambda}$ при T = 1200 К**.**

Результаты расчета: $K = K_{прям} = 0{,}63$ при применении метода вписанных прямоугольников и $K = K_{трап} = 0{,}61$ для метода трапеций. Относительная погрешность вычислений при применении метода вписанных прямоугольников $\delta = (0{,}63 - 0{,}61)/0{,}61 \cdot 100\ \% = 3{,}3\ \%$.

Вывод: при расширении диапазона длин волн результат вычислений $K_{прям}$ по методу вписанных прямоугольников будет приближаться к результатам вычислений $K_{трап}$ по методу трапеций.

Расчетное задание № 2

РАСЧЕТ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Целью работы является изучение методики пересчета энергетических величин в фотометрические, расчет потока излучения и светового потока, попадающего во входной зрачок прибора, а также облученности и освещенности этого зрачка.

В **энергетической системе единиц** [1, 2, 3], применяемой во всем оптическом диапазоне длин волн излучения, для описания распределения в пространстве **потока излучения Φ_e** – средней мощности излучения за время, значительно большее периода электромагнитных колебаний, используются следующие величины:

– поверхностная плотность потока излучения (энергетическая светимость)

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_1},\ \text{Вт/м}^2,$$

где dA_1, – площадь элемента излучающей поверхности;

– облученность (энергетическая освещенность)

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_2},\ \text{Вт/м}^2,$$

где dA_2 – площадь элемента поверхности, на которую падает поток;

– сила излучения

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega},\ \text{Вт/ср},$$

где $d\Omega = \frac{dA_2}{l^2}$ – элементарный телесный угол, dA_2 – площадь элемента облучаемой поверхности, ℓ – расстояние от источника до облучаемой поверхности;

– энергетическая яркость (лучистость) в данном направлении

$$L_e = \frac{dI_{e\theta}}{dA_{1\theta}},\ \text{Вт/(ср·м}^2\text{)},$$

где $dI_{e\theta}$ – сила излучения в данном направлении, $dA_{1\theta}$ – элемент видимой площади излучающей поверхности. Связь между M_e и L_e для черного тела (следствие из закона Ламберта) имеет вид:

$$M_e = \pi \cdot L_e .$$

В качестве спектральных характеристик излучения используются следующие величины:

– спектральная плотность потока излучения

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}, \text{ Вт/мкм},$$

– спектральная интенсивность поверхностной плотности (спектральная плотность энергетической светимости)

$$M_{e\lambda} = \frac{dM_e}{d\lambda}, \text{ Вт/(м}^2\text{·мкм)},$$

– спектральная плотность энергетической яркости

$$L_{e\lambda} = \frac{dL_e}{d\lambda}, \text{ Вт/(ср·м}^2\text{·мкм)}.$$

Важнейшим параметром системы **фотометрических (световых) величин** является **световой поток Φ_v**, т.е. поток, воспринимаемый глазом человека. Человеческий глаз неодинаково чувствителен к излучению различных длин волн. Отношение светового потока Φ_v к потоку излучения Φ_e, взятое в бесконечно малом спектральном интервале длин волн, называется **спектральной световой эффективностью**, которая количественно определяет спектральную чувствительность глаза

$$K_\lambda = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}}, \text{ лм / Вт}.$$

Отношение K_λ для какой-либо длины волны излучения к максимальному значению $K_{\lambda m}$ называется относительной спектральной световой эффективностью глаза (относительной спектральной чувствительностью глаза)

$$V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda m}}.$$

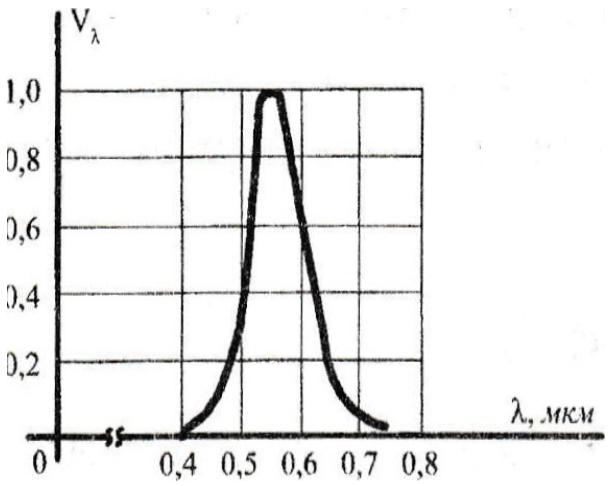

Рисунок 2.1

Численное значение $K_{\lambda m}$ = 683 лм / Вт.

На рисунке 2.1 показана зависимость относительной спектральной чувствительности глаза (относительной видности) от длины волны. Ее максимум соответствует λ_m = 0,555 мкм.

Функция V_λ определяется ГОСТ 8.332-2013.

В таблице 2.1 приведены значения относительной спектральной чувствительности глаза в диапазоне от 0,4 до 0,76 мкм.

Таблица 2.1 Относительная спектральная чувствительность глаза

λ, мкм	V_λ	λ, мкм	V_λ	λ, мкм	V_λ	λ, мкм	V_λ
0,4	0,004	0,5	0,323	0,6	0,631	0,7	0,004
0,425	0,007	0,525	0,793	0,625	0,3321	0,725	0,0007
0,45	0,038	0,55	0,995	0,65	0,107	0,75	0,0001
0,475	0,113	0,575	0,915	0,675	0,023	0,76	0,00006

Таким образом, спектральная плотность светового потока

$$\Phi_{v\lambda} = K_\lambda \cdot \Phi_{e\lambda}$$

При этом световой поток Φ_v определяется как

$$\Phi_v = \int_{0,4}^{0,76} \Phi_{e\lambda} \cdot K_\lambda \cdot d\lambda = 683 \cdot \int_{0,4}^{0,76} \Phi_{e\lambda} \cdot V_\lambda \cdot d\lambda$$

Соотношение между падающим на глаз потоком излучения Φ_e и воспринимаемым глазом световым потоком Φ_v может быть определено как

$$\frac{\Phi_v}{\Phi_e} = 683 \cdot \frac{\int_{0,4}^{0,76} \Phi_{e\lambda} \cdot V_\lambda \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda} = 683 \cdot \eta_{гл},$$

где $\eta_{гл}$ – **коэффициент использования глазом потока излучения** для данного источника, или КПД глаза.

Основные фотометрические величины:

– светимость $M_v = \dfrac{d\Phi_v}{dA_1}$, *лм/м²;*

– освещенность $E_v = \dfrac{d\Phi_v}{dA_2}$, *лк;*

– сила света $I_v = \dfrac{d\Phi_v}{d\Omega}$, *кд;*

– яркость $L_v = \dfrac{dI_{v\theta}}{dA_{1\theta}}$, *кд/м²*.

Переход от энергетических к фотометрическим величинам может быть осуществлен как

$$\Phi_v = 683 \cdot \eta_{гл} \cdot \Phi_e, \text{ лм;}$$

$$E_v = 683 \cdot \eta_{гл} \cdot E_e, \text{ лк;}$$

$$I_v = 683 \cdot \eta_{гл} \cdot I_e, \text{ кд};$$

$$L_v = 683 \cdot \eta_{гл} \cdot L_e, \text{ кд/м}^2.$$

КПД глаза может быть вычислен как:

- по методу вписанных прямоугольников

$$\eta_{гл} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \cdot V_\lambda \cdot d\lambda}{\int_0^\infty M_{e\lambda} \cdot d\lambda} \approx \frac{\Delta\lambda \cdot \sum_{0,4}^{0,76} M_{e\lambda} \cdot V_\lambda}{\sigma \cdot T^4},$$

где $\Delta\lambda$ – шаг дискретизации;

- по методу трапеций

$$\eta_{гл} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \cdot V_\lambda \cdot d\lambda}{\int_0^\infty M_{e\lambda} \cdot d\lambda} \approx \frac{\Delta\lambda \cdot \sum_{0,4}^{0,76} (M_{e\lambda i+1} \cdot V_{\lambda i+1} + M_{e\lambda i} \cdot V_{\lambda i}) / 2}{\sigma \cdot T^4}.$$

Исходные данные.

Величины исходных данных выбрать в соответствии с таблицей 2.2.

В расчетном задании требуется рассчитать поток излучения и световой поток, попадающие во входной зрачок прибора (рисунок 2.2), а также облученность и освещенность этого зрачка для площадного источника.

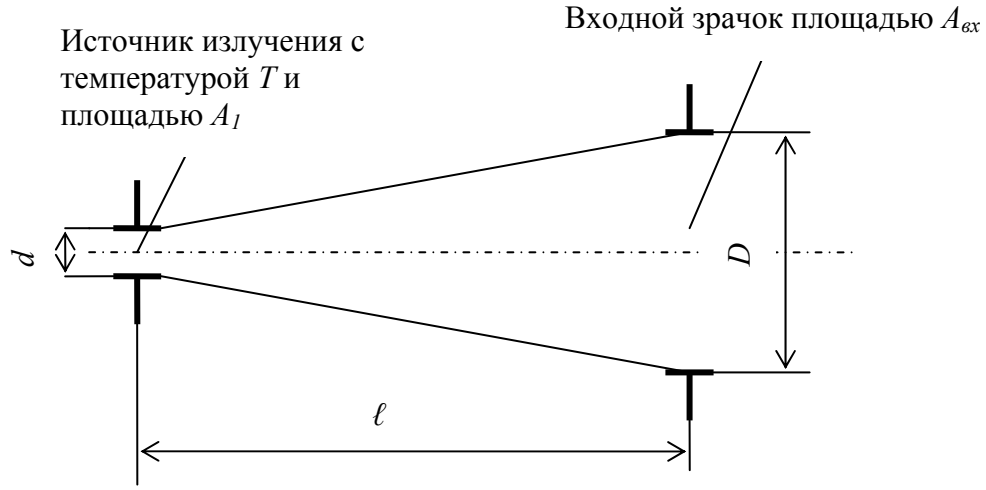

Рисунок 2.2 Схема для расчета потока излучения, попадающего во входной зрачок.

Считать, что излучающая поверхность и входной зрачок расположены параллельно и ослаблением излучения на пути от источника излучения до входного зрачка прибора можно пренебречь.

Таблица 2.2

№	Наименование параметра	Вариант	Примечание
1	Температура излучателя (черное тело) *T,* К	(*И* + *Ф*) · 250	Принятые обозначения: *И* □ количество букв в имени студента; *Ф* □ количество букв в фамилии студента
2	Диаметр излучающей поверхности *d,* мм	2	
3	Расстояние от излучателя до входного зрачка прибора *ℓ,* м	*Ф*	
4	Диаметр входного зрачка *D,* мм	*Ф·И*	
5	КПД глаза $\eta_{гл}$	Из таблицы 4.2 для *T, К*	

Порядок расчета.

1. Вычисляем площадь излучающей поверхности $A_1 = \dfrac{\pi d^2}{4}$.

2. Вычисляем площадь входного зрачка прибора $A_{вх} = \dfrac{\pi D^2}{4}$.

3. Считаем, что сила излучения одинакова внутри телесного угла Ω. Тогда поток излучения, попадающий во входной зрачок **от площадного источника**

$$\Phi_{вх} = I_e \cdot \Omega = L_e \cdot \frac{A_1 \cdot A_{вх}}{l^2},$$

где $I_e = L_e \cdot A_1$ – энергетическая сила излучения, $\Omega = \dfrac{A_{вх}}{l^2}$.

С учетом следствия из закона Ламберта и закона Стефана-Больцмана, энергетическая яркость

$$L_e = \frac{M_e}{\pi} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\pi}.$$

При этом поток излучения $\Phi_{вх}$ и облученность $E_{вх}$ для заданных конструктивных размеров A_1, $A_{вх}$, ℓ и температуры черного тела T могут быть найдены как

$$\Phi_{вх} = \sigma \cdot T^4 \cdot \frac{A_1 \cdot A_{вх}}{\pi \cdot l^2};$$

$$E_{вх} = \sigma \cdot T^4 \cdot \frac{A_1}{\pi \cdot l^2}.$$

3. Переход от энергетических величин к фотометрическим (рассмотрен в этом задании) проводится с использованием КПД глаза (таблица 4.2).

Содержание отчета.

Порядок расчета, таблица с исходными данными (таблица 2.3), результаты расчета.

Таблица 2.3 Исходные данные и результаты вычислений

Исходные данные	
T, К	
d, мм	
ℓ, м	
D, мм	
$\eta_{гл}$	
Результаты расчета	
A_1, мм^2	
$A_{вх}$, мм^2	
Φ_e, Вт	
E_e, Вт/м^2	
Φ_v, лм	
E_v, лк	

Пример 2.1 Результаты расчета в EXCEL **потока излучения** и **светового потока**, попадающих во входной зрачок прибора, а также **облученности** и **освещенности** этого зрачка для площадного источника.

	A	B
1	Исходные данные	
2	T, К	3000
3	d, мм	2
4	ℓ, м	6
5	D, мм	54
6	$\eta_{гл}$	3,09E-02
7		Результаты расчета
8	A_1, мм^2	=3,14*СТЕПЕНЬ(B3;2)/4 3,14
9	$A_{вх}$, мм^2	=3,14*СТЕПЕНЬ(B5;2)/4 2289,06
10	Φ_e, Вт	=5,67*СТЕПЕНЬ(10;-8)*СТЕПЕНЬ(B2;4)*B8*СТЕПЕНЬ(10;-6)* B9*СТЕПЕНЬ(10;-6)/(3,14*СТЕПЕНЬ(B4;2)) 0,00029
11	E_e, Вт/м^2	=5,67*СТЕПЕНЬ(10;-8)*СТЕПЕНЬ(B2;4)*B8* СТЕПЕНЬ(10;-6)/(3,14*СТЕПЕНЬ(B4;2)) 0,13
12	Φ_v, лм	=B10*683*3,09*СТЕПЕНЬ(10;-2) 0,0062
13	E_v, лк	=B11*683*3,09*СТЕПЕНЬ(10;-2) 2,69

Расчетное задание № 3

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИЕМНИКОМ

Целью задания является освоение методики расчета коэффициента использования излучения приемником.

Для эффективного использования излучения необходимо, чтобы спектральные характеристики источника и приемника излучения были согласованы между собой. Количественно эта эффективность оценивается коэффициентом использования приемником излучения источника.

Коэффициент использования излучения приемником, характеризующий эффективность согласования спектральных характеристик источника и приемника определяется как [3]

$$\varphi = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \cdot S_{\lambda}^{отн} \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \cdot d\lambda},$$

где $M_{e\lambda}$ – спектральная интенсивность поверхностной плотности излучения источника,

$S_{\lambda}^{отн}$ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения на данной длине волны, λ_1 и λ_2 – границы спектральной чувствительности приемника излучения.

При использовании в качестве излучателя черного тела, в расчете коэффициента использования, применяется закон Стефана-Больцмана с бесконечными пределами интегрирования по длинам волн

$$\varphi = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \cdot S_{\lambda}^{отн} \cdot d\lambda}{\int_{0}^{\infty} M_{e\lambda} \cdot d\lambda} \approx \frac{\Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} (M_{e\lambda i+1} \cdot S_{e\lambda i+1}^{отн} + M_{e\lambda i} \cdot S_{e\lambda i}^{отн}) / 2}{\sigma \cdot T^4},$$

где $\Delta\lambda$ – шаг дискретизации спектрального диапазона $(\lambda_1 \div \lambda_2)$,

$M_{e\lambda i}$ и $M_{e\lambda i+1}$ – предыдущее и последующее (через $\Delta\lambda$) значения $M_{e\lambda}$,

$S_{e\lambda i}^{отн}$ и $S_{e\lambda i+1}^{отн}$ – соответствующие значения $S_{\lambda}^{отн}$,

$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ [Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$] – постоянная Стефана-Больцмана.

Исходные данные.

№	Наименование параметра	Вариант		Примечание
	[1)]Тип приемника излучения и его спектральная характеристика	Рис. 3.1 и 3.2		[1)]Выбрать самостоятельно, исключая данные примера 3.1.
1	Температура излучателя (ЧТ) *T,* К	**1500**	*PBS,* 295 К*; PBS,* 295 К	
		750	*PbTe, 77* К*; PbSe,* 77 К*; InSb,*77 К*; CdHgTe (КРТ),* 156 К	
		325	*Ge:Hg, 30 K; Ge:Zn, Sb,* 50 К	
		300	*CdHgTe,* 77 К	
2	Спектральный диапазон $(\lambda_1 \div \lambda_2)$, мкм	Из рис. 3.1 и 3.2 [4]		
3	Шаг дискретизации $\Delta\lambda$, мкм	0,25 для рис. 3.1 и 0,5 для рис. 3.2		

В расчетном задании требуется рассчитать коэффициент использования приемником излучения черного тела с температурой *T.*

Порядок расчета.

1. По закону Планка рассчитать спектральную интенсивность поверхностной плотности $M_{e\lambda}$ для температуры *T* черного тела, с шагом дискретизации $\Delta\lambda$ для диапазона длин волн $(\lambda_1 \div \lambda_2)$, используя методику расчета, изложенную в расчетном задании №1.

2. Найти полусуммы произведений интенсивностей поверхностной плотности $M_{e\lambda i}$ и $M_{e\lambda i+1}$ и относительных спектральных чувствительностей приемника $S^{отн}_{e\lambda i}$ и $S^{отн}_{e\lambda i+1}$, для заданного диапазона длин волн, $(M_{e\lambda i+1} \cdot S^{отн}_{e\lambda i+1} + M_{e\lambda i} \cdot S^{отн}_{e\lambda i})/2$.

3. С учетом закона Стефана-Больцмана, определить коэффициент использования приемником излучения черного тела с температурой *T* по формуле

$$\varphi \approx \frac{\Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} (M_{e\lambda i+1} \cdot S^{отн}_{e\lambda i+1} + M_{e\lambda i} \cdot S^{отн}_{e\lambda i})/2}{\sigma \cdot T^4}.$$

Содержание отсчета.

Расчетные формулы, таблицы с результатами вычислений, значение φ.

Пример 3.1

Исходные данные.

1) Приемник излучения: фоторезистор *Ge:Hg,* 30 К (германий легированный ртутью, охлаж-

денный до температуры T = 30 К).

2) Спектральный диапазон от 6 до 14 мкм.

3) Шаг дискретизации $\Delta\lambda$ = 0,5 мкм.

4) Температура излучателя (черного тела) T = 375 К.

В расчетном задании требуется рассчитать коэффициент использования приемником излучения черного тела с температурой T = 375 К.

Таблица 3.1. Результаты расчета в EXCEL коэффициента использования излучения черного тела с температурой T = 375 К для фоторезистора *Ge:Hg,* 30 К.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	T	λ	$\Delta\lambda$	$S_\lambda^{отн}$	$M_{e\lambda}$	(Mλi+1*Sλi+1+Mλi*Sλi)/2	M_e	φ
2	375	6	0,5	0,62	=(374150000*СТЕПЕНЬ(B2;-5))/(EXP(14388/(B2*A2))-1) 80,51	=E2*D2 49,92	=5,67*СТЕПЕНЬ(10;-8)*СТЕПЕНЬ(A2;4) 1121,26	=C2*F19/G2 0,47
3		6,5		0,7	88,33	=(E3*D3+E2*D2)/2 55,87		
4		7		0,78	93,10	67,22		
5		7,5		0,84	95,20	76,29		
6		8		0,9	95,13	82,79		
7		8,5		0,94	93,41	86,71		
8		9		0,98	90,48	88,24		
9		9,5		1	86,73	87,70		
10		10		0,99	82,45	84,18		
11		10,5		0,94	77,90	77,43		
12		11		0,88	73,24	68,84		
13		11,5		0,84	68,60	61,04		
14		12		0,78	64,07	53,80		
15		12,5		0,65	59,72	44,40		
16		13		0,58	55,57	35,53		
17		13,5		0,45	51,66	27,74		
18		14		0,2	47,99	16,42		
19					Σ((Mλi+1*Sλi+1+Mλi*Sλi)/2)=	1064,11		

Примечание. В ячейке F2 записывается произведение $S_\lambda^{отн} \cdot M_{e\lambda}$ для λ_1 (в примере =E2*D2).

Результаты расчета: коэффициент использования приемником (фоторезистором *Ge:Hg,* 30 К) излучения черного тела с температурой T = 375 К в спектральном диапазоне от 6 до 14 мкм φ = 0,47.

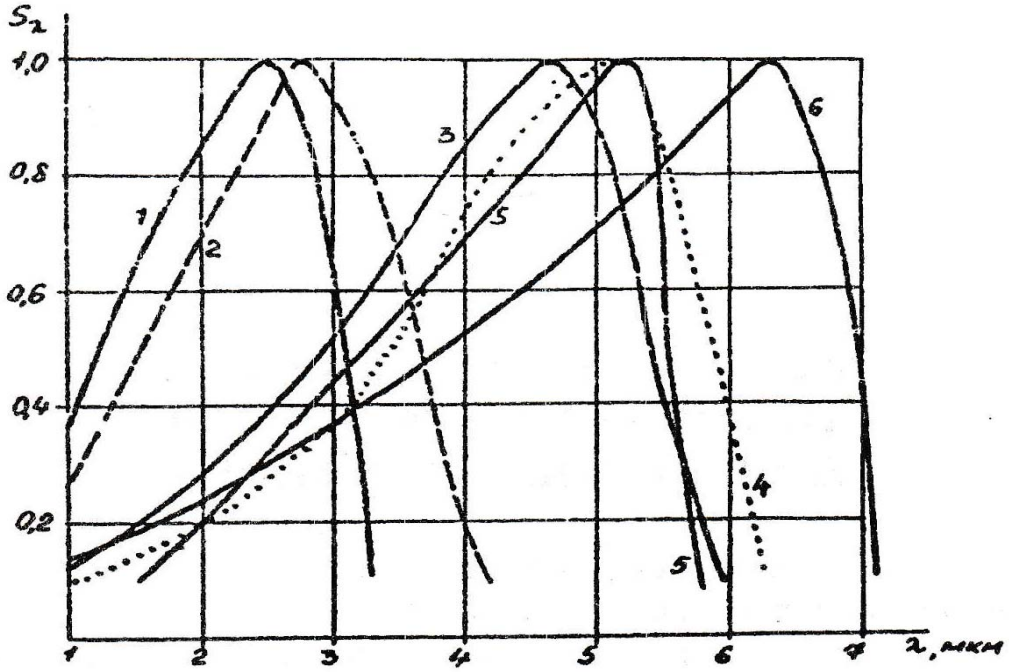

Рисунок 3.1. Спектральные характеристики фоторезисторов:

1- *PBS,* 295 К; 2- *PBS,* 77 К (при охлаждении до 77 К);

3- *PBTe,* 77 К; 4-*PBSe,* 77 К; 5-*InSb,* 77 К; 6- *КРТ,* 156 К

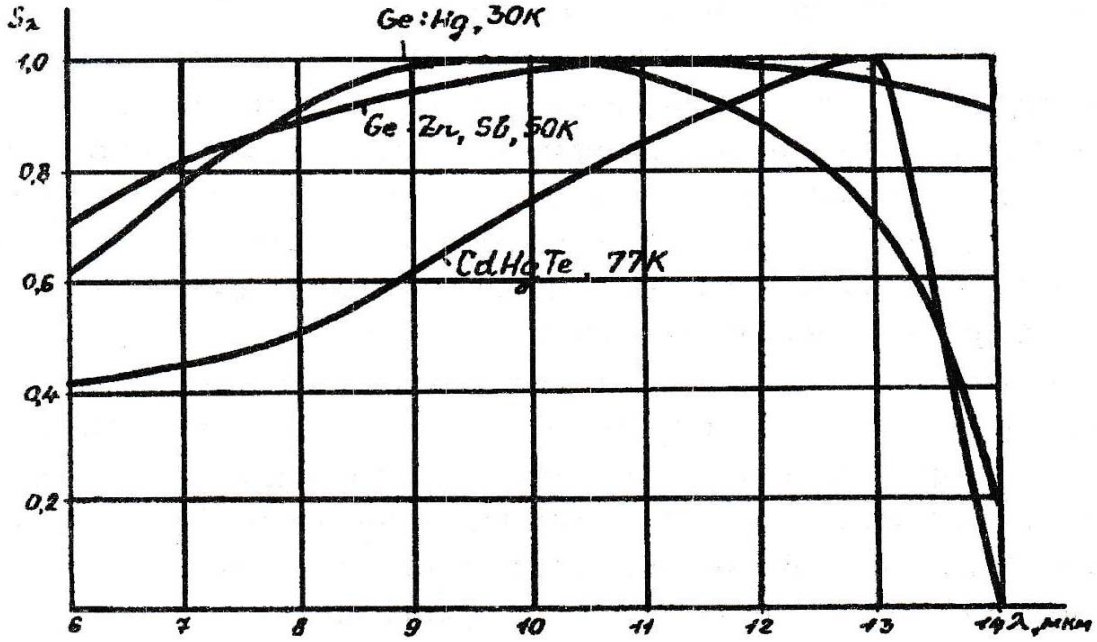

Рисунок 3.2. Спектральные характеристики приемников излучения для диапазона (6÷14) мкм

Расчетное задание № 4

ПЕРЕСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

Целью задания является освоение методики пересчета параметров приемника излучения.

В паспорте приемника излучения приводятся его параметры (чувствительность и порог чувствительности), определенные при работе по эталонному источнику, например, черному телу с заданной температурой $T_э$. В реальных условиях температура источника $T_р$ обычно отлична от температуры эталонного источника. Поэтому необходим пересчет параметров.

Основные формулы пересчета параметров приемников:

1. Если задана чувствительность приемника в энергетических единицах $S_e^э$, то формулы пересчета имеют вид

$$S_e^р = S_e^э \cdot \frac{\varphi^р}{\varphi^э},$$

$$S_v^э = \frac{S_e^э}{683 \cdot \eta_{гл}^э},$$

$$S_v^р = \frac{S_e^э \cdot \varphi^р}{683 \cdot \varphi^э \cdot \eta_{гл}^э},$$

где $S_v^э$ – чувствительность приемника для излучения эталонного источника в фотометрических величинах, $\varphi^э$ и $\varphi^р$ – коэффициенты использования приемником излучений эталонного и реального (рабочего) источников, $\eta_{гл}^э$ – КПД глаза для излучения эталонного источника.

2. Если известна чувствительность приемника в фотометрических единицах $S_v^э$, то формулы пересчета

$$S_e^р = \frac{683 \cdot S_v^э \cdot \eta_{гл}^э \cdot \varphi^р}{\varphi^э},$$

$$S_v^р = \frac{S_v^э \cdot \eta_{гл}^э \cdot \varphi^р}{\varphi^э \cdot \eta_{гл}^р},$$

$$S_e^э = S_v^э \cdot 683 \cdot \eta_{гл}^э,$$

где $\eta_{гл}^р$ – КПД глаза для излучения реального источника.

3. Порог чувствительности (пороговый поток) в единичной полосе частот $\Phi_{vn1}^э$ или $\Phi_{en1}^э$ и/или удельная обнаружительная способность $D_e^{*э}$ или $D_v^{*э}$, приведенные в паспорте приемника излу-

чения, были определены с учетом интегральной чувствительности и дисперсии шума $\overline{u_ш^2}$ или $\overline{I_ш^2}$ для эталонного источника

$$\Phi^э_{vn1} = \frac{\sqrt{\overline{u_ш^2}}}{S^э_v\sqrt{\Delta f}},\ \Phi^э_{en1} = \frac{\sqrt{\overline{u_ш^2}}}{S^э_e\sqrt{\Delta f}},\ D^{*э}_e = \frac{S^э_e\sqrt{A_{пи}\Delta f}}{\sqrt{\overline{u_ш^2}}},\ D^{*э}_v = \frac{S^э_v\sqrt{A_{пи}\Delta f}}{\sqrt{\overline{u_ш^2}}}.$$

Соответственно, при работе с излучением от реального источника, их величины могут быть пересчитаны как

$$\Phi^р_{en1} = \Phi^э_{en1}\cdot\frac{\varphi^э}{\varphi^р},$$

$$D^{*р}_e = D^{*э}_e\cdot\frac{\varphi^р}{\varphi^э},$$

$$\Phi^р_{vn1} = \Phi^э_{vn1}\cdot\frac{\eta^р_{гл}\cdot\varphi^э}{\eta^э_{гл}\cdot\varphi^р},$$

$$D^{*р}_v = D^{*э}_v\cdot\frac{\eta^э_{гл}\cdot\varphi^р}{\eta^р_{гл}\cdot\varphi^э}$$

$$\Phi^р_{vn1} = \Phi^э_{en1}\cdot 683\cdot\eta^э_{гл}\cdot\frac{\varphi^э}{\varphi^р},$$

$$D^{*р}_v = D^{*э}_e\cdot\frac{\varphi^р}{683\cdot\eta^э_{гл}\cdot\varphi^э},$$

$$\Phi^р_{en1} = \Phi^э_{vn1}\cdot\frac{\varphi^э}{683\cdot\eta^э_{гл}\cdot\varphi^р},$$

$$D^{*р}_e = D^{*э}_v\cdot\frac{683\cdot\eta^э_{гл}\cdot\varphi^р}{\varphi^э}.$$

Исходные данные.

1) Тип приемника излучения (выбирается самостоятельно из таблицы 4.1) и его спектральная характеристика $S_{\lambda отн} = f(\lambda)$ в соответствии с п. 5 Примечания.

2) Паспортные значения параметров (из таблицы 4.1) приемника излучения $S^э_e$ или $S^э_v$ и $\Phi^э_{en1}$ или $\Phi^э_{vn1}$.

3) Тип и параметры эталонного источника излучения (из таблицы 4.1).

4) Тип и параметры реального источника излучения (ЧТ с $T_р$ = (И + Ф) · 250, где И – количество букв в имени, Ф – количество букв в фамилии студента).

5) Коэффициенты использования глазом потоков излучения эталонного $\eta^э_{гл}$ и рабочего $\eta^р_{гл}$ источников (из таблицы 4.2).

Таблица 4.1 Параметры приемников излучения [5]

Фотодиоды (Si)					
Тип фотодиода	Размеры чувствительного элемента, мм, (число элементов)	Интегральная чувствительность по току $S_v^э$, мА/лм или (мА/лк), не менее	Длина волны максимума спектральной чувствительности, мкм	Порог чувствительности в единичной частотной полосе лм·Гц$^{-1/2}$, не более	Темновой ток, мкА, не более
ФД-7К	∅10 (d=10)	($4{,}7\cdot10^{-1}$)	0,82…0,86	□	5
ФД-9К	4×4	3	0,85…0,92	□	10
ФД-11К	∅2,5 (d=2,5)	5	0,88…0,94	$3\cdot10^{-10}$	10
ФД-19К	1×1 (4)	3,8	0,75…0,8	$2{,}5\cdot10^{-9}$	3
ФД-20-32К	2×1,35 (2)	4	0,78…0,92	$4\cdot10^{-10}$	1,6
ФД-21-КП	∅1,55 (d=1,55)	3,3	0,72…0,85	$4\cdot10^{-10}$	0,006
ФД-24К	∅10 (d=10)	6 ($4{,}7\cdot10^{-1}$)	0,75…0,85	$5\cdot10^{-8}$	2,5
ФД-28КП	1,24×1,24	($7{,}5\cdot10^{-3}$)	0,72…0,85	$8\cdot10^{-12}$	4

Примечание.

1. Для паспортизации кремниевых фотодиодов, в качестве эталонного источника излучения, применяется источник типа А с $T_э$ =2856 К (по ГОСТ 7721-89 Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка).

2. Площадь круглого чувствительного элемента $A_{пи} = \dfrac{\pi \cdot d^2}{4}$.

3. Если задан темновой ток I_T, то удельный пороговый поток $\Phi_{vn}^{*э} = \dfrac{I_T}{S_v^э \sqrt{\Delta f_{эфф} \cdot A_{эфф}}}$, где $\Delta f_{эфф}$ □ эффективная полоса пропускания при измерении темнового тока, $A_{эфф}$ □ эффективная площадь чувствительного элемента. Методика определения $A_{эфф}$ приведена в ГОСТ 17772-88. При расчетах принять $\Delta f_{эфф} \approx 500$ Гц, $A_{эфф} \approx 0{,}9 \cdot A_{пи}$.

4. Формула для пересчета размерности интегральной чувствительности $S_v^э\left[мА / лм\right] = \dfrac{S_v^э\left[мкА / лк\right]}{A_{эфф}\left[мм^2\right]}$.

5. Все фотодиоды, приведенные в данной таблице, имеют чувствительную площадку на основе кремния (Si). При этом конкретные экземпляры приемников имеют смещение длины волны максимума спектральной чувствительности и всей спектральной характеристики в определенных пределах. В связи с этим при расчетах использовать спектральную характеристику рисунок 4.1 а), если нижняя граница длины волны максимума спектральной чувствительности > 0,75 мкм, и спектральную характеристику рисунок 4.1 б), если нижняя граница длины волны максимума спектральной чувствительности ≤ 0,75 мкм.

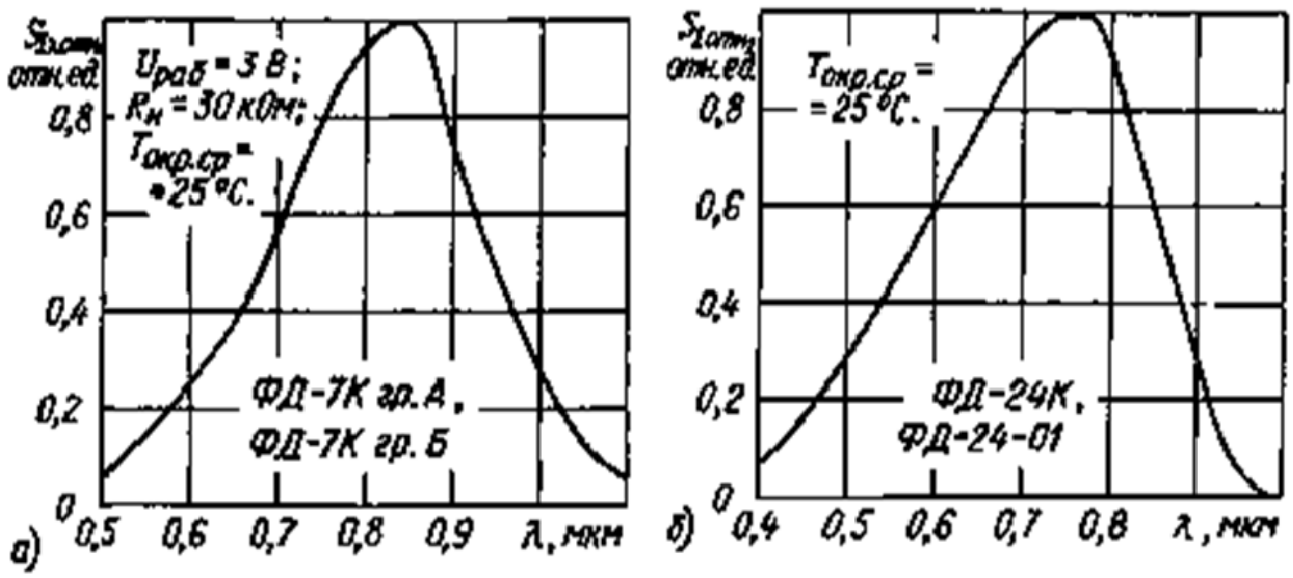

Рисунок 4.1 Спектральная характеристика фотодиодов: а) для ФД-7К, б) для ФД-24К и ФД-24-01.

Порядок расчета.

Порядок расчета рассмотрен в примере 4.1. для реального источника – галогеновой лампы (тепловой источник излучения), а в примере 4.2 для реального источника - лазера.

Содержание отсчета.

Расчетные формулы, таблицы с результатами расчета, выводы по результатам расчета.

Пример 4.1.

Исходные данные:

1. Приемник излучения кремниевый фотодиод ФД-24К. Его спектральная характеристика приведена на рисунке 4.1. Паспортные значения параметров ФД-24К (таблица 4.1):

− интегральная чувствительность $S^э_v$ = 6 мА/лм = $6 \cdot 10^{-3}$ А/лм;

− пороговый поток в единичной полосе пропускания, не более, $Ф^э_{vn1} = 5 \cdot 10^{-8}$ лм·Гц$^{1/2}$.

2. Эталонный источник излучения типа А (ЧТ с температурой $T_э$ = 2856 К).

3. Реальный источник излучения – галогеновая лампа (ЧТ с температурой $T_р$ = 3100 К).

4. Коэффициенты использования глазом потоков излучения эталонного $\eta^э_{гл} = 2{,}43 \cdot 10^{-2}$ и рабочего $\eta^р_{гл} = 3{,}52 \cdot 10^{-2}$ источников (из таблицы 4.2).

В расчетном задании требуется пересчитать в энергетические величины параметры приемника излучения – интегральную чувствительность $S^э_v$ и пороговый поток $Ф_{эvn1}$ к источнику типа ЧТ с температурой $T_р$ = 3100 К, отличной от температуры эталонного источника.

Порядок и результаты расчета.

1) Определяем коэффициенты использования излучения для эталонного $\varphi^э$ и реального источников $\varphi^р$ излучения (расчетное задание №3).

Таблица 4.2. Результаты расчета в EXCEL коэффициента использования излучения черного тела с температурой T = 2856 К для кремниевого фотодиода ФД-24К.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	T	λ	$\Delta\lambda$	$S_\lambda^{отн}$	$M_{e\lambda}$	$(M_{\lambda i+1}*S_{\lambda i+1}+M_{\lambda i}*S_{\lambda i})/2$	M_e	φ
2	2856	0,4	0,1	0,1	=(374150000*СТЕПЕНЬ(B2;-5))/(EXP(14388/(B2*A$2))-1) 148689,69	=E2*D2 0,00	=5,67*СТЕПЕНЬ(10;-8)*СТЕПЕНЬ(A2;4) 3999231,86	=C2*F9/G2 0,14
3		0,5		0,27	583234,92	=(E3*D3+E2*D2)/2 78736,71		
4		0,6		0,6	1226749,07	446761,44		
5		0,7		0,92	1852038,54	1219962,45		
6		0,8		0,93	2308019,33	1925166,71		
7		0,9		0,3	2557523,59	1456857,53		
8		1		0	2629667,12	383628,54		
9					$\Sigma M_{e\lambda}*S_\lambda^{отн}$ =	5511113,38		

Результаты расчета: для температуры черного тела T = 2856 К, коэффициент использования излучения приемником ФД-24К $\boldsymbol{\varphi^э = 0{,}14}$, для T = 3100 К, $\boldsymbol{\varphi^р = 0{,}16}$.

2) Проводим пересчет параметров:

$$S_e^р = \frac{683 \cdot S_\nu^э \cdot \eta_{гл}^э \cdot \varphi^р}{\varphi^э} = \frac{683 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}43 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}16}{0{,}14} = 0{,}114 \text{ А/Вт};$$

$$\Phi_{en1}^р = \Phi_{\nu n1}^э \cdot \frac{\varphi^э}{683 \cdot \eta_{гл}^э \cdot \varphi^р} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}14}{683 \cdot 2{,}43 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}16} = 2{,}6 \cdot 10^{-7} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}.$$

Пример 4.2.

Исходные данные как в **Примере 4.1** за исключением п. 3. В качестве реального источника излучения применен лазер с длиной волны λ = 532 нм (зеленый цвет излучения).

В расчетном задании требуется пересчитать в энергетические величины параметры приемника излучения – интегральную чувствительность $S^э_\nu$ и пороговый поток $\Phi_{эvn1}$ при приеме излучения лазера с длиной волны λ = 532 нм.

Порядок и результаты расчета.

1) Определяем коэффициенты использования излучения для эталонного $\varphi^э$ и реального источников $\varphi^р$ излучения (расчетное задание №3).

Результаты расчета: коэффициенты использования излучения приемником ФД-24К для черного тела с $T_э$ = 2856 К $\varphi^э$ **= 0,14**, для лазера с длиной волны излучения λ = 532 нм = 0,532 мкм, с учетом рисунка 4.1 б),

$$\varphi^р = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \cdot S_\lambda^{отн} \cdot d\lambda}{\int_0^\infty M_{e\lambda} \cdot d\lambda} = S_\lambda^{отн} = \mathbf{0,38}.$$

2) Проводим пересчет параметров:

$$S_e^р = \frac{683 \cdot S_v^э \cdot \eta_{гл}^э \cdot \varphi^р}{\varphi^э} = \frac{683 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,43 \cdot 10^{-2} \cdot 0,9}{0,14} = 0,27 \text{ А/Вт};$$

$$\Phi_{en1}^р = \Phi_{vn1}^э \cdot \frac{\varphi^э}{683 \cdot \eta_{гл}^э \cdot \varphi^р} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,14}{683 \cdot 2,43 \cdot 10^{-2} \cdot 0,8} = 2,24 \cdot 10^{-6} \text{ Вт·Гц}^{-1/2}.$$

Таблица 4.3. Коэффициенты использования глазом (КПД глаза) потока излучения ЧТ

Температура излучателя, К	КПД глаза $\eta^{э}_{гл}$	Температура излучателя, К	КПД глаза $\eta^{э}_{гл}$
1200	$6{,}10\cdot10^{-6}$	5500	$1{,}30\cdot10^{-1}$
1300	$2{,}00\cdot10^{-5}$	5750	$1{,}34\cdot10^{-1}$
1400	$5{,}60\cdot10^{-5}$	6000	$1{,}36\cdot10^{-1}$
1500	$1{,}42\cdot10^{-4}$	6500	$1{,}37\cdot10^{-1}$
1600	$2{,}82\cdot10^{-4}$	7000	$1{,}35\cdot10^{-1}$
1700	$4{,}77\cdot10^{-4}$	7500	$1{,}31\cdot10^{-1}$
1800	$6{,}00\cdot10^{-4}$	8000	$1{,}26\cdot10^{-1}$
1900	$1{,}58\cdot10^{-3}$	8500	$1{,}21\cdot10^{-1}$
2000	$2{,}45\cdot10^{-3}$	9000	$1{,}14\cdot10^{-1}$
2100	$3{,}65\cdot10^{-3}$	9500	$1{,}07\cdot10^{-1}$
2200	$5{,}16\cdot10^{-3}$	10000	$9{,}88\cdot10^{-2}$
2300	$7{,}03\cdot10^{-3}$	11000	$9{,}48\cdot10^{-2}$
2360	$8{,}50\cdot10^{-3}$	12000	$8{,}90\cdot10^{-2}$
2400	$9{,}33\cdot10^{-3}$	13000	$7{,}60\cdot10^{-2}$
2500	$1{,}20\cdot10^{-2}$	14000	$6{,}47\cdot10^{-2}$
2600	$1{,}51\cdot10^{-2}$	15000	$5{,}83\cdot10^{-2}$
2700	$1{,}88\cdot10^{-2}$	16000	$5{,}11\cdot10^{-2}$
2850	$2{,}43\cdot10^{-2}$	17000	$4{,}45\cdot10^{-2}$
3000	$3{,}09\cdot10^{-2}$	18000	$3{,}85\cdot10^{-2}$
3100	$3{,}52\cdot10^{-2}$	19000	$3{,}33\cdot10^{-2}$
3200	$4{,}04\cdot10^{-2}$	20000	$3{,}06\cdot10^{-2}$
3300	$4{,}47\cdot10^{-2}$	25000	$1{,}73\cdot10^{-2}$
3400	$4{,}95\cdot10^{-2}$	30000	$1{,}18\cdot10^{-2}$
3500	$5{,}57\cdot10^{-2}$	35000	$8{,}61\cdot10^{-3}$
3750	$6{,}82\cdot10^{-2}$	40000	$5{,}37\cdot10^{-3}$
4000	$8{,}10\cdot10^{-2}$	45000	$3{,}84\cdot10^{-3}$
4250	$9{,}24\cdot10^{-2}$	50000	$3{,}58\cdot10^{-3}$
4500	$1{,}03\cdot10^{-1}$	55000	$3{,}18\cdot10^{-3}$
4750	$1{,}11\cdot10^{-1}$	60000	$2{,}64\cdot10^{-3}$
5000	$1{,}19\cdot10^{-1}$	65000	$2{,}11\cdot10^{-3}$
5250	$1{,}25\cdot10^{-1}$	70000	$1{,}33\cdot10^{-3}$

Литература

1. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения: Уч. пособие для вузов.— С.-Пб.: Политехника, 1999. -240 с.

2. Савиных В.П., Соломатин В.А. Оптико-электронные системы дистанционного зондирования. М.: Недра, 1995. -345 с.

3. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2004. -472 с.

4. Справочник по инфракрасной технике/Под ред. У. Вольфа и Г. Цисиса. В 4-х томах./Пер. с англ. Н.В. Васильченко, В.А. Есакова и М.М. Мирошникова. М.: Мир, т. 1-1995. -606 с., т.2-1999. -347 с., т.3 -1999. -472 с., т.4-1999. -472 С.

5. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. -М.: Радио и связь, 1987. -296 с., ил.

Внутривузовское издание

Подписано в печать 22.12.2020. Гарнитура Таймс
Формат 60×90/16 Бумага офсетная
Объем 2 усл. печ. л.
Тираж 25 экз. Заказ № 41

Отпечатано в типографии МИИГАиК