

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ОПТИЧЕСКАЯ И ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки  
12. 03. 04 «Биотехнические системы и технологии»  
дневной формы обучения*

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета  
<http://e.biblio.bru.by/>



Могилев 2018

УДК 60-7: 61  
ББК 32.86-5: 5  
О 62

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «21» июня 2018 г.,  
протокол № 12

Составитель д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Борисов

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Методические рекомендации разработаны в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Оптическая и лазерная техника и технологии в медицине» для студентов направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» дневной формы обучения.

Рассмотрены некоторые вопросы расчета оптических источников и приемников для медицинских применений.

Учебно-методическое издание

## ОПТИЧЕСКАЯ И ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Технический редактор	А. Т. Червинская
Компьютерная верстка	Е. С. Лустенкова

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2018



## Содержание

Введение.....	4
1 Расчет фотометрических характеристик оптических источников.....	5
2 Расчет пространственных характеристик оптических источников.....	6
3 Расчет параметров и характеристик фотоприемников.....	7
4 Расчет оптических систем оптико-электронных приборов.....	9
5 Пространственное согласование источников света и фотоприемников...	10
6 Спектральное согласование источников и фотоприемников.....	12
7 Расчет объективных фотометров.....	13
8 Расчет нефелометрических преобразователей.....	14
9 Контрольная работа.....	15
Список литературы.....	15
Приложение А.....	16
Приложение Б.....	17



## Введение

Целью методических рекомендаций является привитие навыков самостоятельного применения в расчетах фотоэлектрических приборов параметров и характеристик первичных преобразователей.

Проведение практических занятий ставит следующие основные задачи:

- 1) систематизировать, расширить и закрепить теоретические знания, необходимые инженеру при расчете характеристик оптических приборов медицинского назначения;
- 2) развить навыки самостоятельной работы с научно-технической литературой;
- 3) подготовить студентов к самостоятельному решению задач при выполнении курсовых работ (проектов) и выпускной квалификационной работы.



## 1 Расчет фотометрических характеристик оптических источников

**Пример 1.** Точечный источник излучает поток излучения  $\Phi_e = 125,6$  Вт. Определить силу излучения источника.

*Решение*

Так как источник точечный, то сила излучения будет постоянна.

$$\text{Тогда } I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} = \frac{125,6}{4 \cdot 3,14} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}.$$

**Пример 2.** Гелий-неоновый лазер на длине волны 0,63 мкм излучает поток излучения 20 мВт. Определить световой поток, излучаемый лазером.

*Решение*

Так как источник является монохроматическим, то связь между потоком излучения и световым потоком определяется выражением  $\Phi_v = 683V_\lambda \Phi_{e\lambda}$ . Из таблицы Б.1 видно, что значение функции видности на длине волны лазера  $V_\lambda = 0,265$ . Тогда  $\Phi_v = 683 \cdot 0,265 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 3,6$  лм.

**Пример 3.** Натровая лампа на длине волны 586 нм излучает световой поток 10 лм. Определить поток излучения, излучаемый лампой.

*Решение*

Лампа излучает монохроматическое излучение. Значение функции видности на длине волны лампы равно 0,814. Тогда  $\Phi_{e\lambda} = \frac{\Phi_v}{683V_\lambda} = \frac{10}{683 \cdot 0,814} = 18$  мВт.

*Задачи для самостоятельного решения.*

1 Излучение аргонового лазера с длиной волны 0,488 нм создает на площадке освещенность 10 лк.

Определить поток излучения лазера, падающий на площадку площадью 100 см<sup>2</sup>.

2 Лампа накаливания, представляющая собой полоску вольфрама в виде прямоугольника размерами 10 × 1 мм, нагрета до температуры 2856 К. Определить поток излучения и световой поток, излучаемый лампой; энергетическую светимость; светимость; силу излучения; силу света; энергетическую яркость и яркость источника, энергетическую освещенность и освещенность площадки площадью 100 см<sup>2</sup>, расположенной на расстоянии 1 м от лампы под углом 45° к направлению на лампу. Нить накала считать серым нагревателем с коэффициентом теплового излучения  $\varepsilon = 0,4$ . Считать, что излучение в пространстве распределяется равномерно.



## 2 Расчет пространственных характеристик оптических источников

**Пример 1.** Найти светимость и энергетическую светимость *He-Ne* и полупроводникового лазеров, генерирующих мощность 5 мВт на длине волны 0,63 мкм. Излучающая поверхность *He-Ne* лазера – круг диаметром  $d = 3$  мм, а полупроводникового – прямоугольный полосок шириной  $a = 1$  мкм и длиной  $b = 5$  мкм. Расходимость лазерного излучения в обоих случаях считать дифракционной.

*Решение*

Энергетическая светимость – это поток излучения, излучаемый с единицы поверхности источника. Поэтому

$$M_e = \frac{\Phi_e}{S},$$

где  $S$  – площадь излучающей площадки.

Тогда для газового лазера

$$M_e(\text{He-Ne}) = \frac{\Phi_e}{S} = \frac{4\Phi_e}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2} = 707 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для полупроводникового лазера

$$M_e(\text{ППЛ}) = \frac{\Phi_e}{S} = \frac{4\Phi_e}{a \cdot b} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 10^9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Светимость лазеров можно найти из следующего соотношения:

$$M_V(\text{He-Ne}) = \frac{\Phi_V}{S} = \frac{4\Phi_V}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 683 \cdot \Phi_e V_\lambda}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 683 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,278}{3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-6}} = 1,34 \cdot 10^5 \frac{\text{ЛМ}}{\text{м}^2}.$$

$$M_V(\text{ППЛ}) = \frac{\Phi_V}{S} = \frac{\Phi_V}{ab} = \frac{683 \cdot \Phi_e V_\lambda}{ab} = \frac{683 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,278}{10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 1,9 \cdot 10^{11} \frac{\text{ЛМ}}{\text{м}^2}.$$

*Задачи для самостоятельного решения.*

1 Фотодиод ФД-7К с диаметром светочувствительной площадки 12 мм установлен на расстоянии 10 мм от светодиода.

Определить, под каким телесным углом излучение из светодиода попадает на фотодиод.

2 Определить, во сколько раз лампа направленного действия (диаграмма направленности приведена в таблице 1) создает большую освещенность на оси



по сравнению с лампой ненаправленного действия (диаграмма направленности приведена в таблице 2). Мощности ламп одинаковы.

Таблица 1 – Диаграмма направленности лампы направленного действия

$\Theta^0$	5	15	25	35	45	55	65	75	85
$I_{\text{еотн}}$	0,92	0,7	0,44	0,23	0,13	0,08	0,04	0,02	0,01

Таблица 2 – Диаграмма направленности лампы ненаправленного действия

$\Theta^0$	5	15	25	35	45	55	65	75	85
$I_{\text{еотн}}$	0,99	0,96	0,93	0,91	0,9	0,87	0,83	0,79	0,72

Продолжение таблицы 2

$\Theta^0$	95	105	115	125	135	145	155	165	175
$I_{\text{еотн}}$	0,71	0,71	0,76	0,8	0,78	0,75	0,66	0,5	0,26

### 3 Расчет параметров и характеристик фотоприемников

**Пример 1.** Дана интегральная чувствительность фотоприемника в световых единицах  $S_V$ , А/лм. Определить ее в энергетических единицах  $S_e$ , А/Вт.

*Решение*

Из определения интегральной чувствительности в световых единицах  $S_V$  фототок

$$I = S_V^{\circ} \Phi_V^{\circ},$$

где  $\Phi_V^{\circ}$  – световой поток эталонного источника, попадающий на фотоприемник.

С другой стороны, по определению интегральной чувствительности в энергетических единицах  $S_e^{\circ}$  следует, что ток фотоприемника

$$I = S_e^{\circ} \Phi_e^{\circ},$$

где  $\Phi_e^{\circ}$  – поток излучения эталонного источника, попадающий на фотоприемник.

Тогда, приравнивая полученные токи, имеем  $S_e^{\circ} \Phi_e^{\circ} = S_V^{\circ} \Phi_V^{\circ}$ . Если выразить световой поток и поток излучения эталонного источника через спектральную плотность потока излучения, которые считаются известными, то получим искомое выражение в следующем виде:



$$S_e^{\vartheta} = \frac{S_V^{\vartheta} \Phi_V^{\vartheta}}{\Phi_e^{\vartheta}} = S_V^{\vartheta} \frac{683 \int_0^{\infty} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda}^{\vartheta} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}^{\vartheta} d\lambda} = S_V^{\vartheta} \frac{683 \int_0^{\infty} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda, \text{эт}}^{\vartheta} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda, \text{эт}}^{\vartheta} d\lambda} = 683 S_V^{\vartheta} \kappa_2^{\vartheta},$$

где  $\kappa_2^{\vartheta} = \frac{683 \int_0^{\infty} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda}^{\vartheta} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}^{\vartheta} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda, \text{эт}}^{\vartheta} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda, \text{эт}}^{\vartheta} d\lambda}$  – КПД глаза по эталонному источнику.

Этот параметр имеет смысл и по другому любому источнику. С ним связана световая отдача источника света  $\eta = 683 \kappa_2^{\vartheta}$ , которая также характеризует не только эталонный, но и любой источник света.

**Пример 2.** Определить интегральную чувствительность фотоприемника по произвольному источнику излучения  $S_e^u$ , если его интегральная чувствительность по эталонному источнику равна  $S_e^{\vartheta}$ .

*Решение*

Применим связь между коэффициентом использования потока излучения фотоприемником и его интегральной чувствительностью. Интегральная чувствительность по любому источнику  $S_e^u$  равна отношению эффективно используемого потока излучения (обычно это фототок) к потоку излучения, поглощенному фотоприемником:

$$S_e^u = \frac{I}{\Phi_e} = \frac{\int_0^{\infty} S_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} S_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda} = S_{\lambda, \text{max}} \frac{\int_0^{\infty} S_{\lambda, \text{эт}} \Phi_{e\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} S_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda} = S_{\lambda, \text{max}} \kappa^u,$$

где  $\kappa^u$  – коэффициент использования потока излучения произвольного источника.

Для эталонного источника также справедливо аналогичное соотношение

$$S_e^{\vartheta} = S_{\lambda, \text{max}} \kappa^{\vartheta}.$$

Тогда, разделив два полученных выражения, имеем искомое соотношение

$$S_e^u = S_e^{\vartheta} \frac{\kappa^u}{\kappa^{\vartheta}}.$$

Из приведенных примеров видно, что для пересчета параметров фотоприемников необходимо знать спектральную плотность потока излучения произ-

вольного и эталонного источников излучения, спектральную характеристику фотоприемника и кривую видности. Все эти характеристики достаточно знать в относительных единицах.

*Задачи для самостоятельного решения.*

1 Пороговый поток излучения по эталонному источнику равен  $\Phi_{\text{енор}}^{\circ}$ . Найти пороговый поток излучения по произвольному источнику.

2 Определить интегральную чувствительность в световых единицах по произвольному источнику  $S_V^u$ , если известна интегральная чувствительность в световых единицах по эталонному источнику  $S_V^{\circ}$ .

3 Определить пороговый световой поток по произвольному источнику  $\Phi_{V\text{нор}}^u$ , если известен пороговый световой поток по эталонному источнику  $\Phi_{V\text{нор}}^{\circ}$ .

#### 4 Расчет оптических систем оптико-электронных приборов

**Пример 1.** Определить связь между плоским и соответствующим телесным углами.

*Решение*

Рассмотрим связь телесного угла  $\omega$  с соответствующим половинным плоским углом  $\theta$  (рисунок 1).

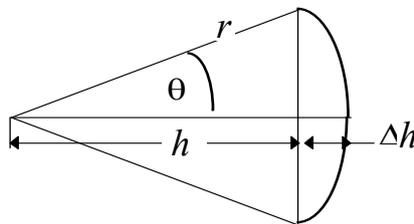


Рисунок 1 – Схема расчета телесного угла

По определению телесный угол  $\omega = \frac{S}{r^2}$ , где  $S$  – площадь сферического сегмента радиуса  $r$ . Но из геометрии известно, что  $S = 2\pi r(r - h)$ .

Тогда

$$\omega = \frac{2\pi r(r - h)}{r^2} = 2\pi \left(1 - \frac{h}{r}\right) = 2\pi(1 - \cos \theta).$$

Эта формула справедлива всегда. Если же телесный угол малый (большое расстояние  $r$  по сравнению с размерами площадки), то можно положить, что

$S \approx \pi R^2$ , а  $R = r \sin \theta$ . Тогда  $\omega = \frac{\pi r^2 \sin^2 \theta}{r^2} = \pi \sin^2 \theta$ .

*Задачи для самостоятельного решения.*

1 Определить светимость ламбертовского излучателя  $M_V$ , если известна его яркость  $L_V$ .

2 Определить освещенность изображения площадки  $dS$ , если это изображение создается оптической системой со входным апертурным углом  $u$ , поперечное увеличение системы равно  $\beta$ , а коэффициент пропускания –  $\tau$ .  $L_V$  – яркость площадки  $dS$ .

## 5 Пространственное согласование источников света и фотоприемников

**Пример 1.** Определить поток излучения, вводимый в волоконный световод оптической линии связи от светодиода с диаметром излучающей площадки 50 мкм, если мощность светодиода равна 5 мВт, а используются для передачи излучения два многомодовых и один одномодовый волоконные световоды с диаметром световедущей сердцевины 100, 50 и 10 мкм соответственно и числовой апертурой 0,2. Светодиоды устанавливаются вплоты к площадке светодиода. Диаграмма направленности светодиода приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Диаграмма направленности светодиода баррасовского типа

$\Theta^\circ$	5	15	25	35	45	55	65	75	85
$I_{\text{еомн}}(\theta)$	0,99	0,92	0,81	0,7	0,56	0,48	0,3	0,2	0,08

*Решение*

Определим апертурный угол для указанных волоконных световодов:

$$\sin \varphi = NA; \varphi = \arcsin NA = \arcsin 0,2 = 11,5^\circ.$$

Это значит, что лучи, идущие от источника под углами, большими апертурного, не будут распространяться по световоду. Так как светодиод является осесимметричным источником, то поток излучения, вводимый в световод, можно определить по следующей формуле:

$$\Phi_e = \Phi_\Sigma \frac{2\pi \int_0^{11,5^\circ} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta}{2\pi \int_0^\pi I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta} = \Phi_\Sigma \frac{\int_0^{11,5^\circ} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta}, \quad (1)$$

где  $\Phi_\Sigma$  – полный поток излучения (мощность) светодиода.

Интегралы вычислим графическим интегрированием на основании приведенной диаграммы направленности.



$$\int_0^{90''} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta = \int_0^{10''} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta + \int_{10''}^{20''} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta + \int_{20''}^{30''} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta + \dots + \int_{80''}^{90''} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta.$$

$$\begin{aligned} \int_0^{90''} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta &= 0,99(\cos 0^0 - \cos 10^0) + 0,92(\cos 10^0 - \cos 20^0) + \\ &+ 0,81(\cos 20^0 - \cos 30^0) + 0,7(\cos 30^0 - \cos 40^0) + 0,56(\cos 40^0 - \cos 50^0) + \\ &+ 0,48(\cos 50^0 - \cos 60^0) + 0,3(\cos 60^0 - \cos 70^0) + 0,2(\cos 70^0 - \cos 80^0) + \\ &+ 0,08(\cos 80^0 - \cos 90^0) = 0,015 + 0,042 + 0,06 + 0,07 + 0,07 + 0,068 + \\ &+ 0,047 + 0,034 + 0,014 = 0,42. \end{aligned}$$

$$\int_0^{11,5^0} I_{\text{еомн}}(\theta) \sin \theta d\theta = 0,985(\cos 0^0 - \cos 11,5^0) = 0,02.$$

$$\Phi_e = 5 \cdot 10^{-3} \frac{0,02}{0,42} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Вт.}$$

Столько же излучения вводится в многомодовые световоды. Для одномодового же волоконного световода количество введенного излучения будет меньше во столько раз, во сколько раз площадь излучающей площадки светодиода больше площади сердцевинки одномодового световода.

$$\Phi_{\text{одномод}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{100}{2500} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ Вт.}$$

*Задачи для самостоятельного решения.*

1 Светодиод мощностью 10 мВт установлен на расстоянии 10 см от линзы диаметром 3 см. Определить поток излучения, попадающий на линзу, если угловая расходимость светодиода составляет  $60^\circ$ .

2 Определить поток излучения, вводимый в одномодовый волоконный световод с диаметром световедущей сердцевинки  $d_o = 5$  мкм от гелий-неонового одномодового и многомодового лазеров с помощью микрообъектива с фокусным расстоянием  $f = 10$  мм. Числовая апертура световода  $NA = 0,12$ . Диаметр лазерного пучка  $d = 4$  мм. Расходимость одномодового лазера  $\beta_1 = 1,5$  мрад. Расходимость многомодового лазера  $\beta_2 = 3$  мрад.

3 Волоконный световод с диаметром световедущей сердцевинки 100 мкм и числовой апертурой 0,2 приставлен вплотную к излучающей площадке свето-



диода, имеющей диаметр 300 мкм. Мощность светодиода 100 мВт. Светодиод излучает в одно полупространство и диаграмма направленности его излучения описывается выражением  $I_e(\theta) = |\cos \theta|$ .

## 6 Спектральное согласование источников и фотоприемников

**Пример 1.** При поглощении потока излучения 100 мВт германиевым фотодиодом от источника, спектральная плотность излучения которого описывается выражением  $\Phi_{e\lambda_{отн}} = e^{-5(\lambda-1)^2}$ , он показывает ток 10 мА. Определить максимальную чувствительность фотодиода.

*Решение*

Если известна максимальная чувствительность фотоприемника, то генерируемый им фототок определяется выражением

$$I = S_{\lambda_{\max}} \Phi_{\Sigma} \frac{\int_0^{\infty} S_{\lambda_{отн}} \Phi_{e\lambda_{отн}} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda_{отн}} d\lambda}, \quad (2)$$

где  $S_{\lambda_{\max}}$  – максимальная чувствительность фотоприемника;

$\Phi_{\Sigma}$  – поток излучения, поглощенный фотоприемником.

Из формулы (2) можно определить максимальную чувствительность фотоприемника (интеграл в числителе полученного выражения равен  $15,83 \cdot 10^{-7}$  м).

Для вычисления интеграла в числителе выражения (2) используем данные об относительной чувствительности германиевого фотодиода, приведенной в таблице А.1. Тогда при разбиении спектральной области на промежутки шириной 100 нм искомый интеграл будет

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} S_{\lambda_{отн}} \Phi_{e\lambda_{отн}} d\lambda &= 10^{-7} (0,03 \cdot 0,165 + 0,2 \cdot 0,287 + 0,34 \cdot 0,449 + 0,47 \cdot 0,638 + 0,57 \cdot 0,819 + \\ &+ 0,67 \cdot 0,951 + 0,75 \cdot 1 + 0,82 \cdot 0,951 + 0,88 \cdot 0,819 + 0,93 \cdot 0,638 + 0,98 \cdot 0,449 + 1 \cdot 0,287 + \\ &+ 0,96 \cdot 0,165 + 0,84 \cdot 0,086 + 0,66 \cdot 0,041 + 0,36 \cdot 0,017) = 2\Delta\lambda(0,0495 + 0,0574 + \\ &+ 0,15266 + 0,29986 + 0,46683 + 0,63717 + 0,75 + 0,77982 + 0,72072 + 0,59334 + \\ &+ 0,44002 + 0,287 + 0,1584 + 0,7224 + 0,02706 + 0,0646) = 10,908 \cdot 10^{-7} \text{ м}. \end{aligned}$$

Максимальная чувствительность фотодиода будет

$$S_{\lambda_{\max}} = \frac{I}{\Phi_{\Sigma}} \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda_{отн}} d\lambda}{\int_0^{\infty} S_{\lambda_{отн}} \Phi_{e\lambda_{отн}} d\lambda} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-3}} \frac{15,83 \cdot 10^{-7}}{10,908 \cdot 10^{-7}} = 0,145 \left( \frac{\text{А}}{\text{Вт}} \right).$$



### Задачи для самостоятельного решения.

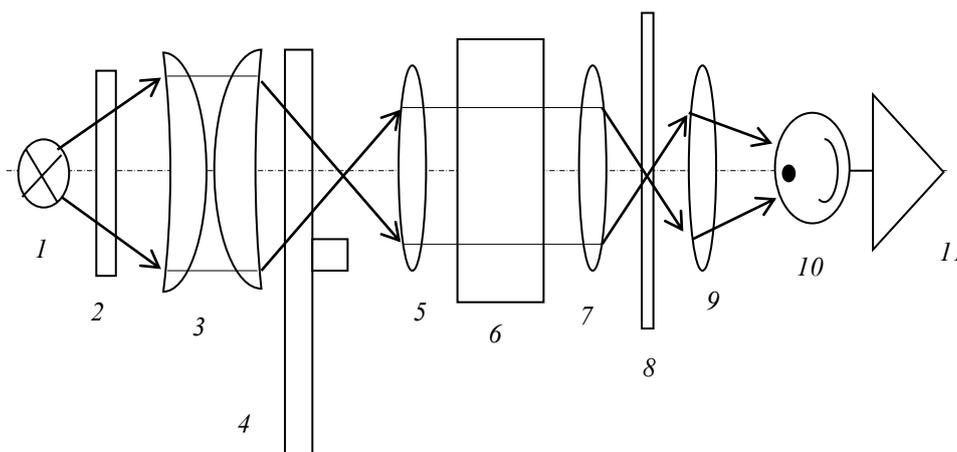
1 На кремниевый фотодиод ФД-256 с максимальной чувствительностью  $S_{\lambda_{\max}} = 0,6 \text{ А/Вт}$  на длине волны  $0,9 \text{ мкм}$  падает поток излучения гелий-неонового лазера  $10 \text{ мВт}$  на длине волны  $0,63 \text{ мкм}$ . Определить ток фотодиода.

2 На германиевый фотодиод с интегральной чувствительностью  $10 \text{ мА/Вт}$  падает излучение от галогенной лампы накаливания с температурой нити накала  $2600 \text{ К}$ . Мощность поглощенного излучения равна  $200 \text{ мВт}$ . Определить ток фотодиода.

3 На кремниевый фотодиод с интегральной чувствительностью  $10 \text{ мА/Вт}$  падает излучение от галогенной лампы накаливания с температурой нити накала  $3200 \text{ К}$ . Мощность поглощенного излучения равна  $200 \text{ мВт}$ . Определить ток фотодиода.

## 7 Расчет объективных фотометров

**Пример 1.** Рассчитать габаритные и фотометрические параметры однолучевого одноканального объективного фотометра, оптическая схема которого приведена на рисунке 2.



1 – источник излучения; 2 – оптический фильтр; 3 – конденсор; 4 – модулятор; 5, 7, 9 – объективы; 6 – контролируемый объект; 8 – компенсатор; 10 – фотоприемник; 11 – устройство для обработки и регистрации электрического сигнала

Рисунок 2 – Оптическая схема однолучевого одноканального объективного фотометра

В качестве источника света используется галогенная лампа накаливания мощностью  $50 \text{ Вт}$  с температурой нити накала  $2600 \text{ °С}$ . Диаметр нити накала –  $5 \text{ мм}$ . Диаметр конденсора  $5 \text{ см}$  с фокусным расстоянием  $7 \text{ см}$ . Линзы 5, 7, 9 с фокусным расстоянием  $5 \text{ см}$  имеют диаметр  $4 \text{ см}$ . В качестве модулятора используется обтюратор из прозрачного и непрозрачного полудисков. Размеры кюветы с жидкостью  $40 \times 40 \times 10 \text{ мм}$ . В качестве фотоприемника используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ-112.

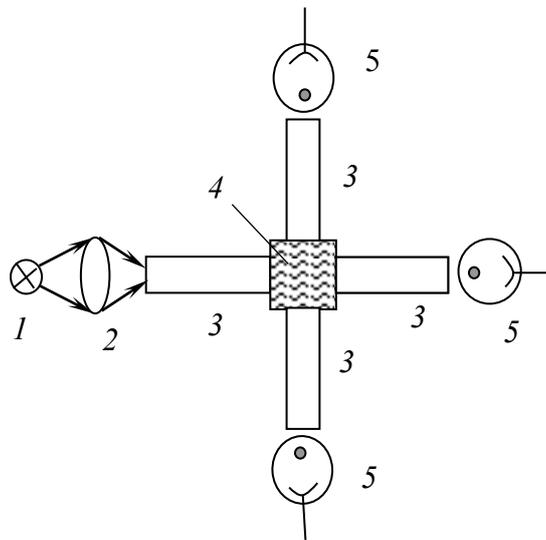
*Задачи для самостоятельного решения.*

1 Разработать оптическую схему однолучевого двухканального объективного фотометра.

2 Разработать оптическую схему двухлучевого двухканального объективного фотометра.

## 8 Расчет нефелометрических преобразователей

**Пример 1.** Рассчитать габаритные и фотометрические параметры однолучевого одноканального нефелометра на базе волоконно-оптических жгутов, оптическая схема которого приведена на рисунке 3.



1 – источник света; 2 – фокусирующая линза; 3 – волоконно-оптические жгуты; 4 – кювета с рассеивающей жидкостью; 5 – фотоприемники

Рисунок 3 – Оптическая схема нефелометра-турбидиметра

В качестве источника света используется галогенная лампа накаливания мощностью 20 Вт с температурой нити накала 3200 °С. Диаметр нити накала – 5 мм. Фокусирующая линза диаметром 2 см с фокусным расстоянием 3 см. Волоконно-оптические жгуты имеют диаметр 10 мм, длину 10 см, коэффициент пропускания 0,5, числовую апертуру 0,3. Размеры квадратной кюветы с жидкостью 10 × 10 × 20 мм. В качестве фотоприемников используются фотодиоды ФД-7К.

*Задачи для самостоятельного решения.*

1 Разработать оптическую схему однолучевого зеркального нефелометра.

2 Разработать оптическую схему нефелометра с опорным оптическим каналом.

## 9 Контрольная работа

### Вариант 1

**Задача 1.** Световой поток, излучаемый монохроматическим источником с длиной волны 420 нм, равен 10 лм. Определить поток излучения источника.

**Задача 2.** Галогенная лампа с температурой нити накала 2600 К установлена на расстоянии 0,2 м от объектива диаметром 30 мм, который фокусирует излучение лампы на кремниевый фотодиод, интегральная чувствительность которого равна 10 мА/лм.

Определить фототок, если диаграмма направленности лампы  $I_{\text{еотн}}(\theta) = \cos \theta$  и лампа излучает в одно полупространство.

### Вариант 2

**Задача 1.** Световой поток, излучаемый монохроматическим источником с длиной волны 430 нм, равен 20 лм. Определить поток излучения источника.

**Задача 2.** Галогенная лампа с температурой нити накала 3200 К установлена на расстоянии 0,3 м от объектива диаметром 30 мм, который фокусирует излучение лампы на германиевый фотодиод, интегральная чувствительность которого равна 20 мА/лм.

Определить фототок, если диаграмма направленности лампы  $I_{\text{еотн}}(\theta) = \cos^2 \theta$  и лампа излучает в одно полупространство.

## Список литературы

- 1 Неразрушающий контроль в строительстве : учебное пособие / И. Эйнав [и др.]; под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Спектр, 2012. – 312 с.
- 2 Основы диагностики технических устройств и сооружений: монография / Г. А. Бигус [и др.]. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 445 с.
- 3 Источники и приемники излучения: учебное пособие / Г. Г. Ишанин [и др.]. – Санкт-Петербург: Политехника, 1991. – 240 с.
- 4 **Бараночников, М. Л.** Приемники и детекторы излучений: справочник / М. Л. Бараночников. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 640 с.
- 5 Источники и приемники излучений: методические указания к практическим занятиям для студентов специальности 20 01 00 «Приборы и методы контроля качества и диагностики» / Сост. В. И. Борисов, Е. Н. Прокопенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – 31 с.



## Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Относительная спектральная плотность потока излучения абсолютно черного тела, моделирующего излучение эталонного источника типа А ( $\Phi_{\text{ел.отн}}^{\lambda}$ ), галогенной лампы для нагрева с температурой нити накала 2600 К ( $\Phi_{\text{ел.отн}}^{2600}$ ), осветительной галогенной лампы с температурой нити накала 3200 К ( $\Phi_{\text{ел.отн}}^{3200}$ ), относительная спектральная чувствительность германиевого ( $S_{\text{ел.отн}}^{\text{Ge}}$ ), кремниевого ( $S_{\text{ел.отн}}^{\text{Si}}$ ) фотодиодов и фотосопротивления ФСА-1 ( $S_{\text{ел.отн}}^{\text{ФСА}}$ )

Длина волны, нм	$\Phi_{\text{ел.отн}}^{\lambda}$	$\Phi_{\text{ел.отн}}^{2600}$	$\Phi_{\text{ел.отн}}^{3200}$	$S_{\text{ел.отн}}^{\text{Ge}}$	$S_{\text{ел.отн}}^{\text{Si}}$	$S_{\text{ел.отн}}^{\text{ФСА}}$
400	0,06	0,023	0,11	0,03	0,18	0,37
500	0,21	0,12	0,34	0,20	0,36	0,40
600	0,45	0,31	0,62	0,34	0,42	0,42
700	0,68	0,54	0,84	0,47	0,44	0,44
800	0,82	0,74	0,96	0,57	0,86	0,46
900	0,96	0,89	1	0,67	0,98	0,50
1000	1,00	0,97	0,98	0,75	0,70	0,54
1100	0,98	1	0,92	0,82	0,01	0,58
1200	0,94	0,99	0,84	0,88		0,64
1300	0,87	0,95	0,76	0,93		0,70
1400	0,80	0,89	0,68	0,98		0,76
1500	0,73	0,83	0,6	1,00		0,81
1600	0,65	0,76	0,53	0,96		0,87
1700	0,59	0,69	0,47	0,84		0,91
1800	0,52	0,63	0,41	0,66		0,95
1900	0,47	0,57	0,36	0,36		0,98
2000	0,41	0,51	0,32	0,01		1,00
2100	0,37	0,46	0,28			0,95
2200	0,33	0,42	0,25			0,85
2300	0,30	0,38	0,22			0,75
2400	0,27	0,34	0,2			0,68
2500	0,24	0,31	0,18			0,47



## Приложение Б (справочное)

Таблица Б.1 – Значения функции видности  $V_\lambda$  от длины волны света

Длина волны, нм	Функция видности $V_\lambda$	Длина волны, нм	Функция видности $V_\lambda$	Длина волны, нм	Функция видности $V_\lambda$
400	0,0004	530	0,862	660	0,061
410	0,0012	540	0,954	670	0,032
420	0,004	550	0,995	680	0,017
430	0,0116	560	0,995	690	0,0082
440	0,023	570	0,952	700	0,0041
450	0,038	580	0,870	710	0,0021
460	0,06	590	0,757	720	0,00105
470	0,091	600	0,631	730	0,00052
480	0,139	610	0,503	740	0,00025
490	0,208	620	0,381	750	0,00012
500	0,323	630	0,265	760	0,00006
510	0,503	640	0,175		
520	0,710	650	0,107		

