МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЙ

Методические рекомендации к практическим занятиям для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения

Могилев 2022

УДК 681.7.069
ББК 34.9
И91

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «4» января 2022 г., протокол № 4

Составитель ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

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

В методических рекомендациях кратко изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения практических заданий. Методические рекомендации разработаны в соответствии с учебной программой по дисциплине «Источники и приемники излучений» для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения.

Учебно-методическое издание

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЙ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	А. А. Подошевко
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 31 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

1 Расчет фотометрических характеристик оптических источников 4
2 Расчет спектральных и пространственных характеристик оптических источников 8
3 Пространственное согласование источников света и фотоприемников 14
4 Пересчет параметров фотоприемников 18
5 Спектральное согласование источников и фотоприемников при использовании световых фотометрических единиц 24
6 Спектральное согласование источников и фотоприемников при использовании энергетических фотометрических единиц 28
7 Расчет пьезопреобразователей 30
8 Расчет магнитных и емкостных преобразователей 36
Список литературы 42
Приложение А 43
Приложение Б 44

1 Расчет фотометрических характеристик оптических источников

1.1 Основные теоретические положения

Оптическое излучение − электромагнитное излучение, длина волн которого находится в диапазоне приблизительно от 1 нм до 1 мм. При этом по спектральному составу принято подразделять весь оптический диапазон на три области спектра: ультрафиолетовую − излучение с длиной волны от 1 нм до 0,38 мкм; видимую − излучение с длиной волны от 0,38 до 0,78 мкм и инфракрасную − излучение с длиной волны от 0,78 мкм до 1 мм [1].

Система фотометрических величин и единиц обеспечивает возможность числовой характеристики параметров излучения в оптическом диапазоне. Эта система охватывает величины и единицы, выработанные применительно к видимому излучению и получившие название световых (обозначаются индексом *v*), а также величины и единицы, выработанные для энергетических измерений как в видимой, так и в невидимой части излучения оптического диапазона, называемые энергетическими (обозначается индексом *e*).

В качестве основной единицы, к которой привязывают энергетические и световые единицы, является единица мощности – ватт (Вт) [1–3].

Поток излучения Φ_e – средняя мощность, переносимая оптическим излучением за время, значительно большее периода электромагнитных колебаний. Поток излучения измеряется в ваттах. Это основная величина, необходимая для оценки количества энергии, проникающей в наши приборы.

В световых фотометрических единицах потоку излучения соответствует световой поток.

Световой поток Φ_v оценивает мощность светового излучения в световых единицах. Он измеряется в люменах (лм).

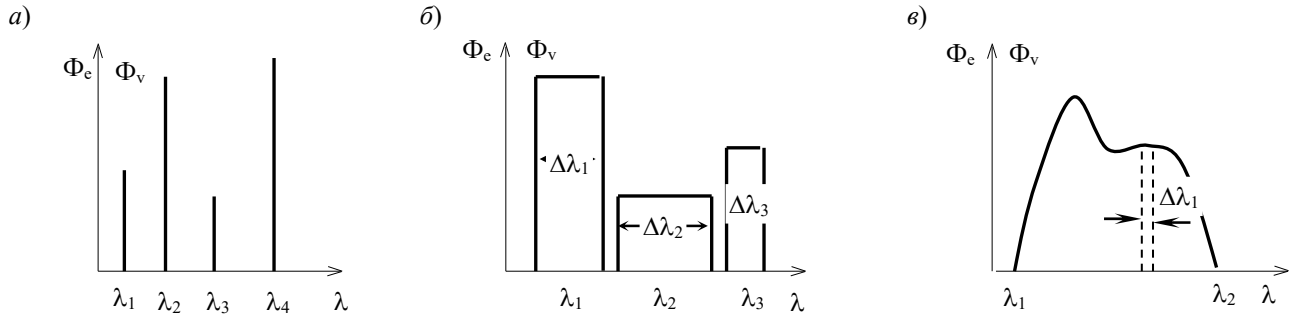
Поток излучения и световой поток характеризуются распределением во времени, по спектру и по пространству.

По спектральному составу потоки излучения и световые потоки бывают монохроматическими (линейчатыми), полосатыми и со сплошным (непрерывным) спектром. К примеру, на рисунке 1.1 приведено графическое изображение таких потоков излучения и световых потоков [1].

Линейчатый спектр характерен для излучения одноатомных газов, газовых и твердотельных лазеров. Полосатые потоки характерны для излучения молекул, паросветных ламп высокого давления, полупроводниковых лазеров и лазеров на красителях. Поток излучения и световой поток с непрерывным спектром характерен для излучения нагретых тел.

Полные потоки для монохроматического излучения равны сумме потоков для каждой длины волны соответственно

$$\Phi_{e\Sigma} = \Phi_e(\lambda_1) + \Phi_e(\lambda_2) + \ldots + \Phi_e(\lambda_n); \quad \Phi_{v\Sigma} = \Phi_v(\lambda_1) + \Phi_v(\lambda_2) + \ldots + \Phi_v(\lambda_n). \quad (1.1)$$



а – линейчатый поток излучения и световой поток; *б* – полосатый поток излучения и световой поток; *в* – поток излучения и световой поток с непрерывным спектром

Рисунок 1.1 – Графическое изображение потоков излучения и световых потоков

Полный поток излучения и световой поток равны сумме потоков для каждой полосы соответственно

$$\Phi_{e\Sigma} = \Phi_e(\lambda_1)\Delta\lambda_1 + \Phi_e(\lambda_2)\Delta\lambda_2 + ... + \Phi_e(\lambda_n)\Delta\lambda_n; \quad (1.2)$$

$$\Phi_{v\Sigma} = \Phi_v(\lambda_1)\Delta\lambda_1 + \Phi_v(\lambda_2)\Delta\lambda_2 + ... + \Phi_v(\lambda_n)\Delta\lambda_n. \quad (1.3)$$

Поток со сплошным спектром можно представить в виде отдельных монохроматических потоков, примыкающих непосредственно друг к другу.

$$\Phi_{e\lambda} = \lim_{\Delta\lambda\to 0}\frac{\Delta\Phi_e}{\Delta\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}; \Phi_{v\lambda} = \lim_{\Delta\lambda\to 0}\frac{\Delta\Phi_v}{\Delta\lambda} = \frac{d\Phi_v}{d\lambda}. \quad (1.4)$$

Величины (1.4) называют спектральной плотностью потока излучения и спектральной плотностью светового потока соответственно.

Единицей измерения спектральной плотности потока излучения и светового потока в системе СИ будет $\Phi_{e\lambda}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, и $\Phi_{v\lambda}$, $\frac{\text{лм}}{\text{м}}$, соответственно, но для удобства пользуются внесистемными единицами $\Phi_{e\lambda}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{мкм}}$, и $\Phi_{v\lambda}$, $\frac{\text{лм}}{\text{мкм}}$, т. к. длина волны оптического излучения сравнима с микрометром.

Связь между световым потоком и потоком излучения для монохроматического источника определяется следующим выражением:

$$\Phi_{v\lambda} = 683 V_\lambda \Phi_{e\lambda}, \quad (1.5)$$

где $\Phi_{v\lambda}$ – световой поток на длине волны λ;

V_λ – значение функции видности на длине волны λ;

$\Phi_{e\lambda}$ – спектральная плотность потока излучения на длине волны λ.

Связь между световым потоком и потоком излучения для источника со сплошным спектром определяется выражением

$$\Phi_v = 683\int_0^{\infty} V_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda = 683\int_{0,38}^{0,78} V_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda . \qquad (1.6)$$

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

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 $\Phi_v = 683 V_\lambda \Phi_{e\lambda}$. Из таблицы 1.1 видно, что значение функции видности на длине волны лазера равно $V_\lambda = 0,265$. 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 $\Phi_{e\lambda} = \dfrac{\Phi_v}{683 V_\lambda} = \dfrac{10}{683 \cdot 0,814} = 18$ мВт.

1.2 Задачи для самостоятельного решения

1.2.1 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^2.

1.2.2 Аргоновый лазер генерирует монохроматические потоки излучения на следующих длинах волн, приведенных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Поток излучения лазера на разных длинах волн

Длина волны λ, мкм	Поток излучения $Ф_e$, Вт
0,514	0,7
0,488	2
0,4965	0,5
0,4765	0,5
0,454	0,6

Определить суммарный поток излучения и световой поток, генерируемый лазером.

1.2.3 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, а также энергетическую освещенность и освещенность площадки площадью 100 $см^2$, расположенной на расстоянии 1 м от лампы под углом 45^o к направлению на лампу. Нить накала считать серым нагревателем с коэффициентом теплового излучения ε = 0,4. Считать, что излучение в пространстве распределяется равномерно.

Контрольные вопросы

1 Что такое световые фотометрические единицы?
2 Что такое энергетические фотометрические единицы?
3 Что такое световой поток?
4 Что такое поток излучения?
5 Какие бывают потоки излучения по спектральному составу?
6 Как связаны между собой поток излучения и световой поток?
7 Что представляет собой функция видности?

2 Расчет спектральных и пространственных характеристик оптических источников

2.1 Основные теоретические сведения

К спектральным и пространственным характеристикам источников излучения относятся следующие величины [1].

Распределение потока излучения и светового потока по телесным (пространственным) углам характеризуется *силой излучения* I_e, $\frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$ $\left(I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}\right)$ и *силой света* I_v, кд $\left(I_v = \frac{d\Phi_v}{d\omega}\right)$ соответственно. Здесь $d\omega$ – телесный угол, измеряемый в стерадианах (ср). Сила излучения измеряется в ваттах на стерадиан, сила света – в канделах (кд). *Кандела* – основная световая единица в системе СИ.

Распределение потока излучения и светового потока по освещаемой площадке определяется *энергетической освещенностью* E_e, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ $\left(E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}\right)$ и *освещенностью* E_v, лк $\left(E_v = \frac{d\Phi_v}{dS}\right)$ соответственно [1]. (1 лк = 1 $\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$.)

Распределение потока излучения и светового потока по поверхности источника определяется *энергетической светимостью* M_e, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ $\left(M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}\right)$ и *светимостью* M_v, $\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$ $\left(M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}\right)$ соответственно.

Энергетическая яркость L_e, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$, определяет распределение силы излучения в некотором направлении, определяемом углом α с площадки площадью dS:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS\cos\alpha} = \frac{d^2\Phi_e}{dSd\omega\cos\alpha}.$$

Аналогично определяется *яркость* L_v, $\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$, по выражению

$$L_v = \frac{dI_v}{dS\cos\alpha} = \frac{d^2\Phi_v}{dSd\omega\cos\alpha}.$$

Для импульсных источников имеет значение энергия от источника, падающая на освещаемую поверхность, определяемая энергетической экспозицией

H_e, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}\left(H_e = \int_{t_1}^{t_2} E_e dt\right)$ и световой экспозицией H_v, лк·с $\left(H_v = \int_{t_1}^{t_2} E_v dt\right)$ соответственно [1].

Наиболее полное представление о распределении силы излучения или силы света в пространстве дает *фотометрическое тело*, которое представляет собой геометрическое место векторов, равных силе света и отложенных от источника. Это геометрическое место векторов представляет собой замкнутую поверхность, окружающую светящееся тело, которое считается точечным источником.

Различают *осесимметричные* (*круглосимметричные*) фотометрические тела, которые имеют ось симметрии, через которую проходят бесчисленное количество плоскостей симметрии. Примером осесимметричного источника, имеющего осесимметричное фотометрическое тело, является обычная лампа накаливания, гелий-неоновый лазер или светодиод.

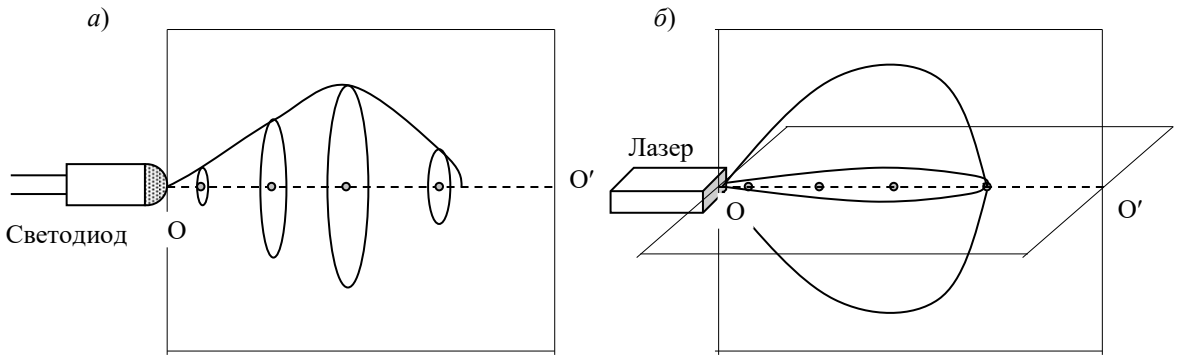
Симметричные фотометрические тела имеют две или более плоскостей симметрии. Примером симметричного источника излучения является полупроводниковый лазер, т. к. его фотометрическое тело представляет собой объемную фигуру, имеющую две перпендикулярные плоскости симметрии, одна из которых проходит через плоскость *p–n*-перехода, а другая – перпендикулярна ей.

Несимметричные источники не имеют плоскостей симметрии.

Обычно распределение силы света источника изображают на плоскости. Для этого фотометрическое тело пересекают меридианальной полуплоскостью, отсчитываемой от оси оптического прибора. В результате пересечения полуплоскости и фотометрического тела образуется линия пересечения, которая называется *кривой силы излучения* или *кривой силы света*.

Если кривую силы света или кривую силы излучения пронормировать на ее максимальное значение, то получится кривая, изменяющаяся от нуля до единицы, которая называется *диаграммой направленности* источника излучения.

Иногда для большей наглядности проводят сечение фотометрического тела экваториальными плоскостями, перпендикулярными оси источника (рисунок 2.1) [1].



а – для осесимметричного источника излучения; *б* – для симметричного источника

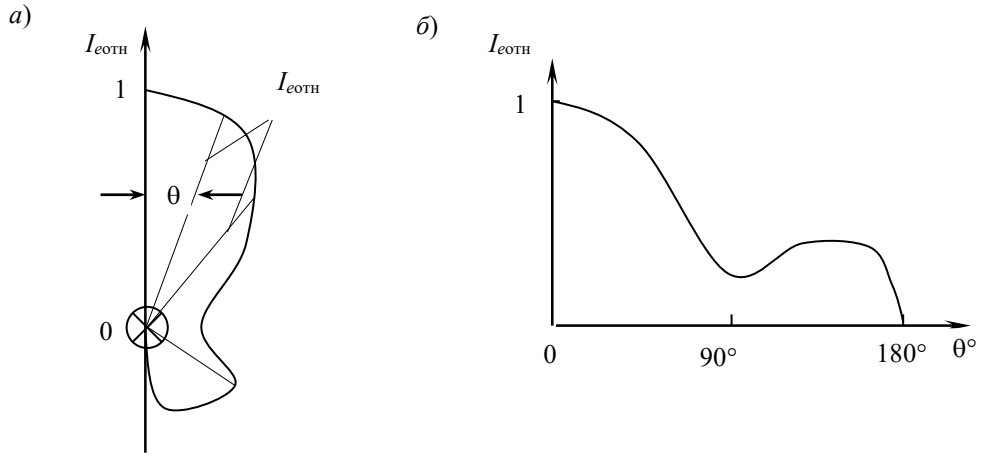
Рисунок 2.1 – Вид диаграммы направленности

Таким образом, распределение силы излучения (силы света) в пространстве для осесимметричных источников характеризуется одной диаграммой направленности (см. рисунок 2.1, *а*). Если такую диаграмму направленности поворачивать вокруг оси, то образуется пространственная фигура, представляющая собой нормированное на максимальное значение фотометрическое тело. В сечении экваториальными плоскостями осесимметричного фотометрического тела всегда будут наблюдаться окружности.

Распределение силы излучения или силы света в пространстве для симметричного источника характеризуется столькими диаграммами направленности, сколько плоскостей симметрии имеет фотометрическое тело. На рисунке 2.1, *б* приведена диаграмма направленности излучения полупроводникового лазера.

В сечении фотометрического тела излучения полупроводникового лазера экваториальными плоскостями будут наблюдаться эллипсы.

Диаграмму направленности наиболее часто изображают в полярных координатах (рисунок 2.2, *а*), но можно также ее изображать и в декартовой системе координат (рисунок 2.2, *б*).



а – излучения в полярных координатах; *б* – в декартовой системе координат

Рисунок 2.2 – Изображение диаграммы направленности источника

Телесный угол ω, под которым виден фотоприемник с места, где установлен источник, можно определить через соответствующий половинный плоский угол θ_1 по формуле

$$\omega = 2\pi\left(1-\cos\theta_1\right) = 4\pi\sin^2\frac{\theta_1}{2}. \qquad (2.1)$$

Половинный апертурный плоский угол φ волоконного световода с числовой апертурой NA определяется следующим выражением:

$$\varphi = \arcsin \mathrm{NA}. \qquad (2.2)$$

Пример – Найти силу излучения, силу света, 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 $в$ = 5 мкм. Расходимость лазерного излучения в обоих случаях считать дифракционной.

Решение

1 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

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

2 Светимость лазеров можно найти из следующих соотношений:

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

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

3 Для определения силы света и силы излучения необходимо найти телесный угол, в который излучает лазер. Так как расходимость лазеров дифракционная, то дифракционный угол α будет определяться размером излучающей площадки d и длиной волны генерируемого лазером излучения. При этом для гелий-неонового лазера расходимость будет одинаковая по всем направлениям, а для полупроводникового лазера расходимость будет разной в плоскости p–n-перехода и в ортогональной ему плоскости.

Рисунок 2.3 поясняет расчет телесного угла, в котором распространяется лазерное излучение.

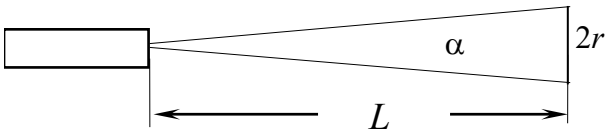


Рисунок 2.3 – Схема расчета телесного угла расходимости лазерного излучения

Плоский угол угловой дифракционной расходимости лазерного излучения $\alpha = \frac{\lambda}{d}$. Тогда телесный угол, в котором распространяется генерируемое He-Ne лазером излучение, определяется из следующего выражения:

$$d\omega = \frac{dS}{L^2} = \frac{\pi r^2}{L^2} = \frac{\pi L^2 \mathrm{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{L^2} = \pi \mathrm{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \approx \pi \left(\frac{\lambda}{2d} \right)^2 = 3{,}14 \cdot \left(\frac{0{,}63 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 3{,}46 \cdot 10^{-8} \text{ ср.}$$

Для полупроводникового лазера в плоскости *p–n*-перехода расходимость будет

$$\alpha_{\text{II}} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0{,}63}{5} = 0{,}126 \text{ рад.}$$

Для полупроводникового лазера в плоскости, перпендикулярной плоскости *p–n*-перехода, расходимость будет

$$\alpha_{\perp} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0{,}63}{1} = 0{,}63 \text{ рад.}$$

Выходное пятно генерации полупроводникового лазера будет представлять собой эллипс с полуосями, определяемыми найденной угловой расходимостью по двум плоскостям. Тогда телесный угол, в котором распространяется генерируемое полупроводниковым лазером излучение, определяется из следующего выражения:

$$d\omega = \frac{dS}{L^2} = \frac{\pi L \mathrm{tg}\alpha_{II} \cdot L \mathrm{tg}\alpha_{\perp}}{L^2} = \frac{\pi L \mathrm{tg}0{,}126 \cdot L \mathrm{tg}0{,}63}{L^2} = 0{,}29 \text{ ср.}$$

4 Исходя из полученных данных, сила излучения для He-Ne лазера будет

$$I_e(\text{He-Ne}) = \frac{\Phi_e}{d\omega} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{3{,}46 \cdot 10^{-8}} = 1{,}44 \cdot 10^5 \ \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}.$$

Для полупроводникового лазера сила излучения равна

$$I_e(\text{ППЛ}) = \frac{\Phi_e}{d\omega} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,29} = 0,0017 \ \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}.$$

5 Сила света для He-Ne лазера

$$I_V(\text{He-Ne}) = \frac{\Phi_V}{d\omega} = 683 V_\lambda I_e = 683 \cdot 0,278 \cdot 1,44 \cdot 10^5 = 2,74 \cdot 10^8 \ \text{кд}.$$

Сила света для полупроводникового лазера

$$I_V(\text{ППЛ}) = \frac{\Phi_V}{d\omega} = 683 V_\lambda I_e = 683 \cdot 0,278 \cdot 0,0017 = 3,27 \ \text{кд}.$$

2.2 Задачи для самостоятельного решения

2.2.1 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.

2.2.2 Определить, во сколько раз лампа направленного действия (диаграмма направленности приведена в таблице 2.1) создает большую освещенность на оси по сравнению с лампой ненаправленного действия (диаграмма направленности приведена в таблице 2.2). Мощности ламп одинаковы.

Таблица 2.1 – Диаграмма направленности лампы направленного действия

Θ, град	5	15	25	35	45	55	65	75	85
$I_{e\text{отн}}$	0,92	0,7	0,44	0,23	0,13	0,08	0,04	0,02	0,01

Таблица 2.2 – Диаграмма направленности лампы ненаправленного действия

Θ, град	5	15	25	35	45	55	65	75	85
$I_{e\text{отн}}$	0,99	0,96	0,93	0,91	0,9	0,87	0,83	0,79	0,72

Продолжение таблицы 2.2

Θ, град	95	105	115	125	135	145	155	165	175
$I_{e\text{отн}}$	0,71	0,71	0,76	0,8	0,78	0,75	0,66	0,5	0,26

Контрольные вопросы

1 Какими параметрами характеризуется пространственное распределение света в источниках?

2 Что такое фотометрическок тело?

3 Что такое кривая силы излучения и диаграмма направленности источников излучения?

4 Какие фотометрические величины описывают распределение света источников в пространстве?

3 Пространственное согласование источников света и фотоприемников

3.1 Основные теоретические сведения

Под спектральным согласованием понимают определение величины фототока, генерируемого фотоприемником. После определения потока излучения, падающего на светочувствительную площадку фотоприемника, фототок на выходе фотоприемника можно определить следующим образом [1, 3].

Полный ток, полученный фотоприемником при его облучении излучением с широким спектром, будет определяться выражением

$$I = \int_0^\infty S_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda = \int_0^\infty S_{\lambda\max} S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\,\max} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda = S_{\lambda\max} \Phi_{e\lambda\,\max} \int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda .$$

Для расчета фототока удобно спектральную чувствительность фотоприемников и спектральную плотность потока излучения источников использовать в относительных единицах, нормированных на соответствующие максимальные значения. А максимальные значения чувствительности фотоприемника и спектральной плотности потока излучения источника соответственно можно выразить через интегральную чувствительность фотоприемника и полный поток излучения, попадающий на фотоприемник.

Теперь, если подставить полученные выражения для максимальной чувствительности фотоприемника $S_{\lambda\max}$ и полный поток излучения, попадающий на фотоприемник Φ_Σ, в выражение для фототока, то получается следующее выражение для определения фототока, если интегральная чувствительность фотоприемника S_e известна в энергетических фотометрических единицах:

$$I = S_e \frac{\int_0^\infty \Phi^э_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi^э_{e\lambda\text{отн}} d\lambda} \cdot \Phi_\Sigma \frac{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}, \qquad (3.1)$$

где $S_{\lambda\text{отн}}$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника;

$\Phi^{э}_{e\lambda отн}, \Phi_{e\lambda отн}$ – относительная спектральная плотность эталонного источника излучения и используемого источника излучения соответственно.

Если же интегральная чувствительность фотоприемника S_V известна в световых фотометрических единицах, то фототок равен

$$I = 683 S_V \frac{\int_0^{\infty} v_\lambda \Phi^{э}_{e\lambda отн} d\lambda}{\int_0^{\infty} S_{\lambda отн} \Phi^{э}_{e\lambda отн} d\lambda} \cdot \Phi_\Sigma \frac{\int_0^{\infty} S_{\lambda отн} \Phi_{e\lambda отн} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda отн} d\lambda}, \qquad (3.2)$$

где V_λ – функция видности;

Φ_Σ – поток излучения, зарегистрированный фотоприемником.

Для вычисления интегралов, приведенных в выражениях (3.1) и (3.2), можно использовать метод геометрического интегрирования. Для этого необходимо на миллиметровке нарисовать кривую видности V_λ, график относительной спектральной чувствительности фотоприемника S_λ, график относительной спектральной плотности потока излучения эталонного источника $\Phi^{э}_{e\lambda отн}$ и график относительной спектральной плотности потока излучения источника, излучение которого регистрируется.

Пример – Определить поток излучения, вводимый в волоконный световод оптической линии связи от светодиода баррасовского типа 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 (рисунок 3.1). Диаграмма направленности светодиода приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Диаграмма направленности светодиода баррасовского типа

Θ, град	5	15	25	35	45	55	65	75	85
$I_{e отн}(\theta)$	0,99	0,92	0,81	0,7	0,56	0,48	0,3	0,2	0,08

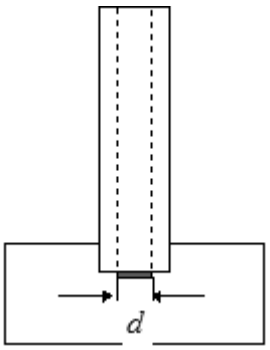


Рисунок 3.1 – Схема соединения светодиода и волоконного световода

Решение

1 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:

$$\Phi_e = 2\pi \int_0^{11,5^{\circ}} I_e(\theta)\sin\theta d\theta = 2\pi I_{e\max} \int_0^{11,5^{\circ}} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta. \qquad (3.3)$$

Но

$$I_{e\max} = \frac{\Phi_{\Sigma}}{2\pi\int_0^{\pi} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta}, \qquad (3.4)$$

где Φ_{Σ} – полный поток излучения (мощность) светодиода.

Тогда

$$\Phi_e = \Phi_{\Sigma}\frac{2\pi\int_0^{11,5^{\circ}} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta}{2\pi\int_0^{\pi} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta} = \Phi_{\Sigma}\frac{\int_0^{11,5^{\circ}} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta}{\int_0^{\pi} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta}. \qquad (3.5)$$

Интегралы вычислим графическим интегрированием на основании приведенной диаграммы направленности.

$$\int_0^{90^{\circ}} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta = \int_0^{10^{\circ}} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta + \int_{10^{\circ}}^{20^{\circ}} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta +$$

$$+ \int_{20^{\circ}}^{30^{\circ}} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta + \ldots + \int_{80^{\circ}}^{90^{\circ}} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta;$$

$$\int_0^{90^\circ} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta = 0,99\left(\cos 0^\circ - \cos 10^\circ\right) + 0,92\left(\cos 10^\circ - \cos 20^\circ\right) +$$

$$+ 0,81\left(\cos 20^\circ - \cos 30^\circ\right) + 0,7\left(\cos 30^\circ - \cos 40^\circ\right) + 0,56\left(\cos 40^\circ - \cos 50^\circ\right) +$$

$$+ 0,48\left(\cos 50^\circ - \cos 60^\circ\right) + 0,3\left(\cos 60^\circ - \cos 70^\circ\right) +$$

$$+ 0,2\left(\cos 70^\circ - \cos 80^\circ\right) + 0,08\left(\cos 80^\circ - \cos 90^\circ\right) =$$

$$= 0,015 + 0,042 + 0,06 + 0,07 + 0,07 + 0,068 + 0,047 + 0,034 + 0,014 = 0,42;$$

$$\int_0^{11,5^\circ} I_{e\text{отн}}(\theta)\sin\theta d\theta = 0,985\left(\cos 0^\circ - \cos 11,5^\circ\right) = 0,02;$$

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

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 сердцевины одномодового световода.

$$\Phi_e\left(\text{одномод.}\right) = 2,4\cdot 10^{-4}\cdot\frac{100}{2500} = 9,6\cdot 10^{-6}\ \text{Вт}.$$

3.2 Задачи для самостоятельного решения

3.2.1 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 60º.

3.2.2 Определить поток излучения, вводимый в одномодовый волоконный световод с диаметром световедущей сердцевины $d_o = 5$ 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.

3.2.3 Определить, во сколько раз увеличивается поток излучения на конденсоре диаметром $d_1 = 5$ см, установленном на расстоянии $L = 15$ см от лампы мощностью 100 Вт при использовании сферического отражателя диаметром $d_3 = 5$ см. Нить накала лампы представляет собой круг диаметром $d_2 = 6$ мм и располагается в фокусе зеркала. Радиус кривизны зеркала $R = 10$ см.

3.2.4 Волоконный световод с диаметром световедущей сердцевины 100 мкм и числовой апертурой 0,2 приставлен вплотную к излучающей площадке светодиода, имеющей диаметр 300 мкм. Мощность светодиода 100 мВт. Светодиод излучает в одно полупространство и диаграмма направленности его излучения описывается выражением $I_e(\theta) = |\cos\theta|$.

Контрольные вопросы

1 Назовите основные характеристики источников излучения.

2 Назовите основные характеристики приемников излучения.

3 В чем заключается суть пространственного согласования источников и фотоприемников?

4 На основании каких физических соображений проводится пространственное согласование источников и фотоприемников?

5 Как проводится расчет интегралов, входящих в формулы для определения потока излучения?

4 Пересчет параметров фотоприемников

4.1 Основные теоретические сведения

Параметр – это величина, характеризующая определенное свойство приемника излучения, служащая критерием оценки его качества, при работе в определенных условиях. Параметр можно измерить экспериментально или вычислить по данным измерений других величин [1, 3].

1 *Интегральная чувствительность*. Интегральной чувствительностью фотоприемника называют величину отношения эффективно преобразованной приемником энергии излучения в другой вид энергии к полному потоку излучения, падающего на фотоприемник.

Для фотоэмиссионных фотоприемников мерой их реакции является фототок, поэтому выражение для интегральной чувствительности в энергетических фотометрических единицах S_e, А/Вт, имеет вид:

$$S_e = \frac{I}{\Phi_\Sigma}, \tag{4.1}$$

где I – фототок;

Φ_Σ – полный поток излучения, поглощенный фотоприемником.

Интегральная чувствительность в световых фотометрических единицах S_V, А/лм, выражается следующим соотношением:

$$S_V = \frac{I}{\Phi_{V\Sigma}},$$

где $\Phi_{V\Sigma}$ – полный световой поток, попавший на фотоприемник.

В световых фотометрических единицах иногда интегральную чувствительность S_V, А/лк, фотоприемников выражают в виде

$$S_V = \frac{I}{E_V},$$

где E_V – освещенность чувствительной площадки фотоприемника.

Иногда в качестве интегральной чувствительности выбирают вольтовую чувствительность, которая зависит не только от параметров фотоприемника, но и от схемы включения. В этом случае интегральная чувствительность в энергетических единицах, равная $S_e = \frac{U}{\Phi_\Sigma}$, выражается в вольтах, деленных на ватт, а в световых единицах выражается в вольтах, деленных на люмен или в вольтах, деленных на люкс.

Для фоторезисторов интегральная чувствительность S_e, 1/Вт, равна отношению величины относительного изменения сопротивления элемента к изменению его облученности $S_e = \frac{\Delta R_\phi}{R_\phi} \cdot \frac{1}{\Delta\Phi_t}$. На линейном участке световой характеристики фотосопротивления его интегральная чувствительность S_e, $Вт^{-1}$, определяется выражением $S_e = \frac{\Delta R_\phi}{R_\phi} \cdot \frac{1}{\Phi_t}$. В двух случаях она измеряется в обратных ваттах.

В фотоприемниках, у которых чувствительность зависит от напряжения питания, в паспорте приводится удельная интегральная чувствительность (чувствительность на 1 В). Она выражается, например, в виде $S_V, \frac{\text{А}}{\text{лм} \cdot \text{В}}$, или в других похожих единицах.

2 *Коэффициент использования потока излучения.* Он показывает, какую долю сложного потока излучения, падающего на фотоприемник, составляет эффективный для этого приемника поток [1, 3].

Коэффициент использования потока излучения определяется следующим выражением:

$$\kappa = \frac{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda} = \frac{\Phi_{e\lambda\max} \int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\Phi_{e\lambda\max} \int_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda} = \frac{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}, \qquad (4.2)$$

где $S_{\lambda отн}$ – спектральная чувствительность фотоприемника в относительных единицах, $S_{\lambda отн} = \frac{S_\lambda}{S_{\lambda max}}$;

$S_{\lambda max}$ – максимальная чувствительность фотоприемника в абсолютных единицах.

Понятие коэффициента использования потока излучения применимо к любому излучателю, а не только к эталонному.

3 *Эффективная ширина полосы чувствительности фотоприемника*. В некоторых расчетах вместо коэффициента использования потока излучения пользуются эффективной шириной полосы чувствительности фотоприемника $\Delta\lambda_{эфф}$. Эффективной шириной полосы чувствительности фотоприемника называют ширину диапазона спектра, в которой был бы сосредоточен весь эффективный поток излучения, падающий на него, при условии, что в этом интервале спектра функция спектральной плотности потока излучения постоянна и равна своему максимальному значению.

$$\Delta\lambda_{эфф} = \frac{\int_0^\infty S_{\lambda отн}\Phi_{e\lambda}d\lambda}{\Phi^э_{e\lambda max}} = \frac{\Phi_{e\lambda max}\int_0^\infty S_{\lambda отн}\Phi_{e\lambda отн}d\lambda}{\Phi_{e\lambda max}} == \int_0^\infty S_{\lambda отн}\Phi_{e\lambda отн}d\lambda = \kappa\frac{\Phi_\Sigma}{\Phi_{e\lambda max}}.$$

4 *Пороговый поток, пороговая чувствительность.* Пороговым потоком называют тот минимальный поток излучения, который вызывает на выходе фотоприемника сигнал, эквивалентный уровню собственных шумов. Понятие порогового потока применимо и к световому потоку. Пороговый поток измеряется в ваттах, а пороговый световой поток измеряется в люменах.

Пороговый поток однотипных фотоприемников зависит от площади светочувствительной площадки и от ширины полосы частот, в которой регистрируется сигнал, т. к. величина шума зависит от полосы частот.

В этом случае для описания порогового потока вводят *понятие пороговой чувствительности.* Под пороговой чувствительностью понимают пороговый поток, отнесенный к единичной площади светочувствительного слоя фотоприемника и к единичной полосе пропускания.

Тогда интегральная $\Phi'_{e пор}$, Вт/см·Гц$^{1/2}$, и спектральная $\Phi'_{e\lambda пор}$, Вт/см·Гц$^{1/2}$, пороговые чувствительности равны соответственно

$$\Phi'_{e пор} = \frac{\Phi_{e пор}}{\sqrt{A\Delta f}};\quad \Phi'_{e\lambda пор} = \frac{\Phi_{e\lambda пор}}{\sqrt{A\Delta f}}. \qquad (4.2)$$

5 *Обнаружительная способность.* Обнаружительная способность D, D_λ – это величина, обратная соответствующей пороговой чувствительности.

6 *Квантовая эффективность и квантовая пороговая чувствительность.*

Иногда при расчете оптико-электронной аппаратуры, использующей лазерные и монохроматические источники, *применяют квантовую эффективность и квантовую пороговую чувствительность.* Квантовой эффективностью фотоприемника называют отношение числа квантов $N_{\text{кв.эфф.}}$, активно поглощенных чувствительным слоем (для внешнего фотоэффекта, выбивших фотоэлектроны, а для внутреннего фотоэффекта, сгенерировавших электронно-дырочные пары), к общему числу квантов $N_{\text{кв.}}$, попавших на фотоприемник.

Квантовая пороговая чувствительность $N_{\lambda\text{пор}}$ выражается числом квантов падающего монохроматического излучения в единицу времени, вызывающего сигнал, равный шуму.

7 *Вольтовая и токовая чувствительность* (*чувствительность по напряжению и по току*). Отношение амплитуды эффективного напряжения, снимаемого с фотоприемника при оптимальном режиме его питания, к амплитуде синусоидально модулированного потока излучения называется вольтовой чувствительностью или чувствительностью по напряжению.

8 *Сопротивление фотоприемника.* Знание его необходимо при выборе и расчете цепи включения приемника излучения и выборе сопротивления нагрузки. Для фоторезисторов выбирается темновое сопротивление (сопротивление фоторезистора без засветки светочувствительного слоя), а для фотодиодов динамическое сопротивление, равное отношению изменения напряжения сигнала к изменению тока.

9 *Шум фотоприемника.* Вместе с полезным сигналом на выходе фотоприемника возникает *хаотический сигнал со случайной частотой* и *амплитудой – шум.* Так как это случайная величина, то она со среднеквадратичным значением $\sqrt{\overline{i_ш^2}}$ или дисперсией $i_ш^2$. Распределение мощности шума по спектру частот определяется спектральной плотностью шума – дисперсией, приходящейся на бесконечно малый участок спектра.

В реальных условиях работы оптико-электронных приборов фотоприемник принимает, как правило, поток излучения, отличающийся по своему спектральному составу от эталонного источника. Поэтому для некоторых задач необходим пересчет параметров. Всевозможные варианты пересчета можно проиллюстрировать следующими примерами.

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 $S_V^э$, фототок равен

$$I = S_V^э \Phi_V^э ,$$

где $\Phi_V^э$ – световой поток эталонного источника, попадающий на фотоприемник.

С другой стороны, по определению интегральной чувствительности в энергетических единицах $S_e^э$ следует, что ток фотоприемника равен

$$I = S_e^э \Phi_e^э,$$

где $\Phi_e^э$ – поток излучения эталонного источника, попадающий на фотоприемник.

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

$$S_e^э = \frac{S_V^э \Phi_V^э}{\Phi_e^э} = S_V^э \frac{683\int\limits_0^\infty V_\lambda \Phi_{e\lambda}^э d\lambda}{\int\limits_0^\infty \Phi_{e\lambda}^э d\lambda} = S_V^э \frac{683\int\limits_0^\infty V_\lambda \Phi_{e\lambda\text{отн}}^э d\lambda}{\int\limits_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}}^э d\lambda} = 683 S_V^э \kappa_\text{г}^э,$$

где $\kappa_\text{г}^э$ – КПД глаза по эталонному источнику, $\kappa_\text{г}^э = \dfrac{683\int\limits_0^\infty V_\lambda \Phi_{e\lambda}^э d\lambda}{\int\limits_0^\infty \Phi_{e\lambda}^э d\lambda} = \dfrac{\int\limits_0^\infty V_\lambda \Phi_{e\lambda\text{отн}}^э d\lambda}{\int\limits_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}}^э d\lambda}$.

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

Пример 2 – Дан пороговый световой поток фотоприемника $\Phi_{V\text{пор}}$. Найти его пороговый поток излучения $\Phi_{e\text{пор}}$.

Решение

Из определения порогового светового потока следует, что шум фотоприемника определяется следующим образом:

$$\sqrt{\bar{i}_\text{ш}^2} = S_V^э \Phi_{V\text{пор}},$$

а из определения порогового потока излучения шум фотоприемника равен

$$\sqrt{\bar{i}_\text{ш}^2} = S_e^э \Phi_{e\text{пор}}.$$

Тогда $S_e^э \Phi_{e\text{пор}} = S_V^э \Phi_{V\text{пор}}$, а $\Phi_{e\text{пор}} = \dfrac{S_V^э}{S_e^э} \Phi_{V\text{пор}}$. С учетом того, что из первого

примера $\frac{S_V^э}{S_e^э} = \frac{1}{683\kappa_г^э} = \frac{1}{\eta_э}$, получается искомое соотношение

$$\Phi_{e\text{пор}} = \frac{\Phi_{V\text{пор}}}{683\kappa_г^э} = \frac{\Phi_{V\text{пор}}}{\eta_э}.$$

Пример 3 – Определить интегральную чувствительность фотоприемника по произвольному источнику излучения $S_e^и$, если его интегральная чувствительность по эталонному источнику равна $S_e^э$.

Решение

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

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

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

Для эталонного источника также справедливо аналогичное соотношение

$$S_e^э = S_{\lambda\max} \kappa^э.$$

Тогда, разделив два полученных выражения, получаем искомое соотношение

$$S_e^и = S_e^э \frac{\kappa^и}{\kappa^э}.$$

Из приведенных примеров видно, что для пересчета параметров фотоприемников необходимо знать спектральную плотность потока излучения произвольного и эталонного источников излучения, спектральную характеристику фотоприемника и кривую видности. Все эти характеристики достаточно знать в относительных единицах.

4.2 Задачи для самостоятельного решения

4.2.1 Пороговый поток излучения по эталонному источнику равен $\Phi^{э}_{e\text{пор}}$. Найти пороговый поток излучения по произвольному источнику.

4.2.2 Определить интегральную чувствительность в световых единицах по произвольному источнику $S^{и}_{V}$, если известна интегральная чувствительность в световых единицах по эталонному источнику $S^{э}_{V}$.

4.2.3 Определить пороговый световой поток по произвольному источнику $\Phi^{и}_{V\text{пор}}$, если известен пороговый световой поток по эталонному источнику $\Phi^{э}_{V\text{пор}}$.

4.2.4 Найти интегральную чувствительность в энергетических единицах по произвольному источнику $S^{и}_{e}$, если известна интегральная чувствительность в световых единицах по эталонному источнику $S^{э}_{V}$.

4.2.5 Определить пороговый поток излучения по произвольному источнику $\Phi^{и}_{e\text{пор}}$, если известен пороговый световой поток по эталонному источнику $\Phi^{э}_{V\text{пор}}$.

Контрольные вопросы

1 Что такое фотоприемник?
2 Назовите основные виды фотоприемников.
3 Какими основными параметрами характеризуются фотоприемники?
4 Что такое пороговый поток?
5 Что такое пороговая чувствительность?
6 Какие характеристики фотоприемников используются при расчете оптических устройств?
7 Каким образом определяется интегральная чувствительность фотоприемников?

5 Спектральное согласование источников и фотоприемников при использовании световых фотометрических единиц

5.1 Основные теоретические сведения

После определения потока излучения, падающего на светочувствительную площадку фотоприемника, если интегральная чувствительность фотоприемника S_v известна в световых фотометрических единицах, то фототок на выходе фотоприемника можно определить по следующей формуле [1, 3]:

$$I = 683 S_v \frac{\int_0^\infty v_\lambda \Phi^{э}_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi^{э}_{e\lambda\text{отн}} d\lambda} \cdot \Phi_\Sigma \frac{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}, \qquad (5.1)$$

где v_λ – функция видности;

Φ_Σ – поток излучения, поглощенный фотоприемником;

$\Phi^э_{e\lambda отн}, \Phi_{e\lambda отн}$ – относительная спектральная плотность эталонного источника излучения и используемого источника излучения соответственно.

Пример – На кремниевый фотодиод ФД-7К от источника со сплошным спектром, относительная спектральная плотность излучения которого определяется функцией $\Phi_{e\lambda отн} = e^{-5(\lambda-1)^2}$, попадает поток излучения $\Phi_\Sigma = 100$ мВт (длина волны измеряется в микрометрах). Определить ток фотодиода.

Указание – Спектральную чувствительность фотодиода взять из таблицы А.1.

Решение

Из справочника определим интегральную чувствительность фотодиода ФД-7К. Она равна 0,47 мкА/лк. Для перевода интегральной чувствительности, выраженной в амперах на люмен (А/лм), необходимо интегральную чувствительность в микроамперах на люкс (мкА/лк) разделить на площадь светочувствительного слоя фотодиода, диаметр которого равен 10 мм. Тогда интегральная чувствительность фотодиода ФД-7К будет равна 6 мА/лм. Так как интегральная чувствительность фотоприемника известна в световых единицах, то фототок можно определить по формуле (5.1).

Для расчета интегралов используем данные для спектральной плотности потока излучения эталонного источника, спектральной чувствительности фотоприемника и кривой видности, приведенные в таблицах А.1 и Б.1.

Для вычисления интегралов будем использовать геометрическое интегрирование с использованием ступенчатой аппроксимации подынтегральных функций на каждом из промежутков. Для удобства значение функций будем брать не посредине промежутка, а на его левой границе. Особенности такого вычисления поясняются на рисунке 5.1.

.

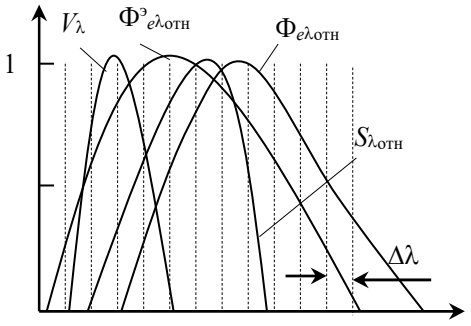


Рисунок 5.1 – Относительные спектральные характеристики эталонного источника, используемого источника, фотоприемника и человеческого глаза

Для вычисления интеграла $\int_0^\infty v_\lambda \Phi^э_{e\lambda отн} d\lambda$ разобьем весь диапазон длин волн на промежутки $\Delta\lambda = 100$ нм. Тогда искомый интеграл будет равен

$$\int_0^{\infty} v_{\lambda} \Phi^{э}_{e\lambda\text{отн}} d\lambda = \sum_{i=1}^{N} v_{\lambda_i} \Phi^{э}_{e\lambda_i\text{отн}} \Delta\lambda = \Delta\lambda \sum_{i=1}^{N} v_{\lambda_i} \Phi^{э}_{e\lambda_i\text{отн}} = 10^{-7}(0,0004 \cdot 0,06 +$$

$$+ 0,323 \cdot 0,210 + 0,631 \cdot 0,45 + 0,0041 \cdot 0,68) =$$

$$= 10^{-7}(0,000024 + 0,06783 + 0,28395 + 0,002788) = 0,354 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Для вычисления интеграла $\int_0^{\infty} S_{\lambda\text{отн}} \Phi^{э}_{e\lambda\text{отн}} d\lambda$ весь диапазон длин волн разобьем на промежутки $0{,}1$ мкм. Тогда искомый интеграл будет равен

$$\int_0^{\infty} S_{\lambda\text{отн}} \Phi^{э}_{e\lambda\text{отн}} d\lambda = 10^{-7}(0,18 \cdot 0,06 + 0,36 \cdot 0,21 + 0,42 \cdot 0,45 + 0,44 \cdot 0,68 +$$

$$+ 0,86 \cdot 0,82 + 0,98 \cdot 0,96 + 0,7 \cdot 1 + 0,01 \cdot 0,98) = 2\Delta\lambda(0,0108 + 0,0756 +$$

$$+ 0,189 + 0,2992 + 0,7052 + 0,9408 + 0,7 + 0,0098) = 5,861 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Вычисление интеграла $\int_0^{\infty} S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda$ также будем проводить при разбиении на промежутки 0,1 мкм. Тогда

$$\int_0^{\infty} S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda = 10^{-7}(0,18 \cdot 0,165 + 0,36 \cdot 0,287 + 0,42 \cdot 0,449 + 0,44 \cdot 0,638 +$$

$$+ 0,86 \cdot 0,819 + 0,98 \cdot 0,951 + 0,7 \cdot 1 + 0,01 \cdot 0,951) = 2\Delta\lambda(0,0297 + 0,10332 +$$

$$+ 0,18858 + 0,28072 + 0,70434 + 0,93198 + 0,7 + 0,0095) = 5,896 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Также вычислим интеграл $\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda$ при разбиении на промежутки 10^{-7} м. Тогда

$$\int_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda = 10^{-7}(0,008 + 0,011 + 0,017 + 0,027 + 0,041 + 0,06 + 0,086 +$$

$$+ 0,121 + 0,165 + 0,22 + 0,287 + 0,363 + 0,449 + 0,542 + 0,638 + 0,732 +$$

$$+ 0,819 + 0,894 + 0,951 + 0,988 + 1 + 0,988 + 0,951 + 0,894 + 0,818 +$$

$$+ 0,732 + 0,638 + 0,542 + 0,449 + 0,363 + 0,287 + 0,22 +$$

$$+ 0,165 + 0,121 + 0,086 + 0,06 + 0,041 + 0,027 + 0,017 + 0,011) \approx$$

$$\approx 15,83 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Подставляя полученные значения интегралов в выражение для фототока, определим его значение:

$$I = 683 S_v \frac{\int_0^\infty v_\lambda \Phi^э_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi^э_{e\lambda\text{отн}} d\lambda} \cdot \Phi_\Sigma \frac{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda} =$$

$$= 638 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \frac{0,354 \cdot 10^{-7}}{5,861 \cdot 10^{-7}} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \frac{5,896 \cdot 10^{-7}}{15,83 \cdot 10^{-7}} = 8,6 \text{ мА.}$$

5.2 Задачи для самостоятельного решения

5.2.1 На фотодиод ФД-7Г падает световой поток 10 лм от источника типа А. Определить ток фотодиода.

5.2.2 На фотодиод ФД-7Г падает излучение от галогенной лампы накаливания с температурой нити накала 2600 К. Мощность поглощенного излучения равна 100 мВт. Определить ток фотодиода.

5.2.3 На фотосопротивление ФСА-1 падает излучение от галогенной лампы накаливания с температурой нити накала 3200 К. Мощность поглощенного излучения равна 100 мВт. Определить сигнал фотосопротивления при питающем напряжении 10 В.

Контрольные вопросы

1 Какие характеристики фотоприемников относятся к спектральным?

2 Какие характеристики фотоприемников относятся к интегральным?

3 В чем отличие спектральных и интегральных характеристик фотоприемников?

4 Чем отличается абсолютная и относительная спектральная чувствительность фотоприемников?

5 Каким образом определяется чувствительность фотоприемников?

6 Спектральное согласование источников и фотоприемников при использовании энергетических фотометрических единиц

6.1 Основные теоретические сведения

Если интегральная чувствительность фотоприемника S_e известна в энергетических фотометрических единицах, то фототок на выходе фотоприемника можно определить по следующей формуле [1, 3]:

$$I = S_e \frac{\int_0^\infty \Phi^э_{e\lambda отн} d\lambda}{\int_0^\infty S_{\lambda отн} \Phi^э_{e\lambda отн} d\lambda} \cdot \Phi_\Sigma \frac{\int_0^\infty S_{\lambda отн} \Phi_{e\lambda отн} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda отн} d\lambda}, \quad (6.1)$$

где $S_{\lambda отн}$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника;

Φ_Σ – поток излучения, поглощенный фотоприемником;

$\Phi^э_{e\lambda отн}$, $\Phi_{e\lambda отн}$ – относительная спектральная плотность эталонного источника излучения и используемого источника излучения соответственно.

Пример – 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

$$I = S_{\lambda max} \Phi_\Sigma \frac{\int_0^\infty S_{\lambda отн} \Phi_{e\lambda отн} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda отн} d\lambda}, \quad (6.2)$$

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

Φ_Σ – поток излучения, поглощенный фотоприемником.

Из приведенной формулы (6.2) можно определить максимальную чувствительность фотоприемника

$$S_{\lambda\max} = \frac{I}{\Phi_\Sigma} \frac{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}{\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda}.$$

Интеграл в числителе полученного выражения вычислялся в примере 1 (см. практическое занятие № 5). Он равен $15{,}83 \cdot 10^{-7}$ м.

Для вычисления интеграла в знаменателе полученного выражения 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 равен

$$\int_0^\infty S_{\lambda\text{отн}} \Phi_{e\lambda\text{отн}} d\lambda = 10^{-7}(0{,}03 \cdot 0{,}165 + 0{,}2 \cdot 0{,}287 + 0{,}34 \cdot 0{,}449 +$$

$$+ 0{,}47 \cdot 0{,}638 + 0{,}57 \cdot 0{,}819 + 0{,}67 \cdot 0{,}951 + 0{,}75 \cdot 1 + 0{,}82 \cdot 0{,}951 +$$

$$+ 0{,}88 \cdot 0{,}819 + 0{,}93 \cdot 0{,}638 + 0{,}98 \cdot 0{,}449 + 1 \cdot 0{,}287 + 0{,}96 \cdot 0{,}165 +$$

$$+ 0{,}84 \cdot 0{,}086 + 0{,}66 \cdot 0{,}041 + 0{,}36 \cdot 0{,}017) = 2\Delta\lambda(0{,}0495 + 0{,}0574 +$$

$$+ 0{,}15266 + 0{,}29986 + 0{,}46683 + 0{,}63717 + 0{,}75 + 0{,}77982 +$$

$$+ 0{,}72072 + 0{,}59334 + 0{,}44002 + 0{,}287 + 0{,}1584 + 0{,}7224 +$$

$$+ 0{,}02706 + 0{,}0646) = 10{,}908 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Тогда максимальная чувствительность фотодиода будет равна

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

6.2 Задачи для самостоятельного решения

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

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

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

Контрольные вопросы

1 В чем заключаются особенности спектрального согласования источников и фотоприемников при использовании энергетических фотометрических единиц?

2 Как можно пересчитать чувствительность фотоприемника из световых единиц в энергетические, и наоборот?

3 Какая особенность согласования источников с непрерывным спектром с фотоприемниками при использовании энергетических фотометрических единиц?

4 Какая особенность согласования источников с непрерывным спектром с фотоприемниками?

7 Расчет пьезопреобразователей

7.1 Основные теоретические сведения

7.1.1 Расчет пьезопреобразователей методом волновых уравнений. Чувствительность пьезопреобразователя в режиме излучения в дефектоскопии принято оценивать значением коэффициента излучения (коэффициента передачи) [1, 4]

$$L = \left| \frac{\xi_m}{U} \right|, \tag{7.1}$$

где ξ_m – амплитуда смещения поверхности объекта контроля под действием излучаемой акустической волны;

U – амплитуда возбуждающего электрического напряжения.

Таким образом, анализ чувствительности излучателя сводится к исследованию выражения для амплитуды излучаемой волны.

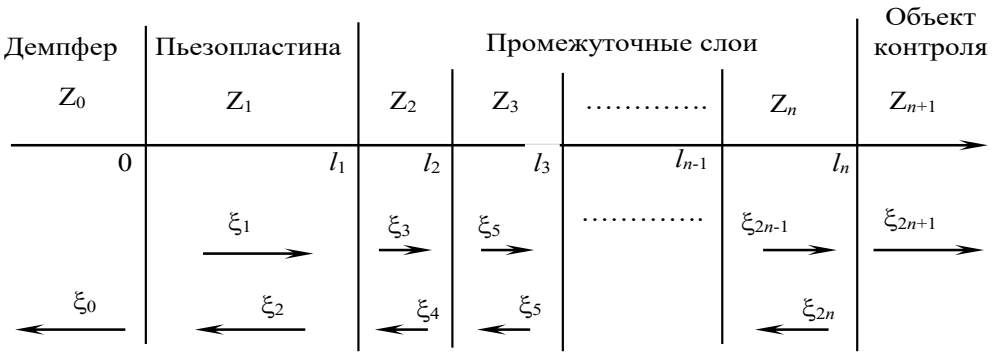
При расчете коэффициента излучения пьезоэлектрического преобразователя рассматривают следующую схему пьезопреобразователя, которая приведена на рисунке 7.1.

Схема пьезопреобразователя включает в себя демпфер, n слоев, в том числе пьезоэлемент, и исследуемый объект контроля.

Считаем, что все промежуточные слои выполнены из однородного изотропного материала. Потери в слоях не учитываются.

U – амплитуда прикладываемого к электродам пьезоэлемента синусоидального напряжения. Считаем, что генератор имеет нулевое внутреннее сопротивление. Колебания пьезопластины происходят в поперечном направлении, т. е. пьезопластина совершает колебания по толщине.

Распространение акустических волн внутри каждого элемента пьезопреобразователя описывается одномерным волновым уравнением, решение которого в общем случае представляет собой совокупность двух волн, распространяющихся навстречу друг другу. В слоях существуют обе волны. Демпфер и исследуемая среда считаются полубесконечными, и поэтому в них будут существовать только излучаемые волны.



Z_i – акустический импеданс i -го слоя; l_i – координата поверхности слоев

Рисунок 7.1 – Схема пьезопреобразователя с промежуточными слоями, нагруженного на объект контроля

Решение этой системы дает общую формулу для вычисления искомой амплитуды смещения в волне, излучаемой в исследуемую среду. Эта формула справедлива для любого числа слоев.

$$\xi_m^u = \frac{Ue_{ii}\exp\left(jk_{n+1}l_n\right)}{\omega z_{n+1}l_1}\cdot F\left(x_1\right);$$

$$F\left(x_1\right) = \frac{(1-\cos x_1) - j\alpha_{01}\sin x_1}{Q_1\cos x_1 - jR\sin x_1 - j\dfrac{\kappa_{ii}^2}{x_1}\left[2R_0(1-\cos x_1) - jQ_1\sin x_1\right]}, \qquad (7.2)$$

где $x_1 = k_1(l_1 - 0) = k_1 l_1$;

$Q_1 = (Q_2 + \alpha_{02} R_2)\cos x_2 - j(R_2 + \alpha_{02} Q_2)\sin x_2$;

$\alpha_{02} = \dfrac{Z_0}{Z_2}$;

$x_2 = k_2(l_2 - l_1)$;

$R_0 = \alpha_{12}(R_2 \cos x_2 - jQ_2 \sin x_2)$;

$\alpha_{12} = \dfrac{Z_1}{Z_2}$;

$R_1 = (\alpha_{01} Q_2 + \alpha_{12} R_2)\cos x_2 - j(\alpha_{01} R_2 + \alpha_{12} Q_2)\sin x_2$;

κ_{ii} – коэффициент электромеханической связи.

Коэффициенты Q_2, R_2 и последующие находятся из рекуррентных соотношений

$$Q_{p-1} = Q_p \cos x_p - jR_p \sin x_p;$$

$$R_{p-1} = \alpha_{p-1,p}\left(R_p \cos x_p - jQ_p \sin x_p\right), \qquad (7.3)$$

где $x_p = k_p\left(l_p - l_{p-1}\right)$;

$\alpha_{p-1,p} = \dfrac{Z_{p-1}}{Z_p}$.

Последние коэффициенты Q_n, R_n полагаются равными $Q_n = 1$; $R_n = \alpha_{n,n+1}$.

7.1.2 Расчет пьезопреобразователей в виде фазированных решеток. Фазированной решеткой называют преобразователь в виде элементов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Возбуждающие электрические импульсы на отдельные элементы подаются со сдвигом фазы (с запаздыванием по времени). Изменяя параметры сдвига фазы, управляют акустическим полем преобразователя [1].

На рисунке 7.2 приведена схема линейной (одномерной) фазовой решетки, предназначенная для регулировки параметров акустического поля в плоскости *XOY*.

Все элементы сделаны одинаковыми. Шаг решетки изготавливают обычно равным половине длины используемой акустической волны, потому что в этом случае влияние элементов друг на друга минимально. Акустическое поле фазированной решетки определяют как произведение поля отдельного элемента на множитель, учитывающий совместное действие всех элементов:

$$P = P_0 \frac{S_a}{\lambda r} \frac{\sin X}{X} \frac{\sin NX}{\sin Y}, \qquad (7.4)$$

где P_0 – амплитуда давления у поверхности элементов решетки;

S_a – суммарная площадь элементов;

λ – длина акустической волны;

r – расстояние от центра решетки до точки наблюдения;

$X = ak\sin\theta$;

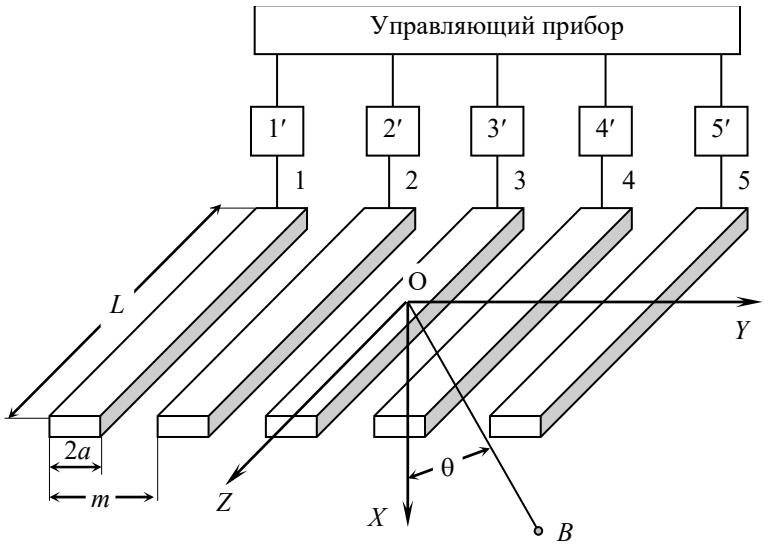
N – число элементов в решетке;

$Y = 0,5km\left(\sin\theta - \dfrac{\lambda\psi}{m}\right)$;

ψ – сдвиг фазы между соседними элементами, $\psi = \dfrac{t}{T}$ (в долях 2π);

t – соответствующая временная задержка;

T – период акустических колебаний.



1–5 – элементы решетки; 1′–5′ – элементы задержки управляющих импульсов; $2a$ – ширина элемента решетки; m – расстояние между элементами решетки; L – длина элемента решетки

Рисунок 7.2 – Схема пьезоакустического преобразователя на основе фазированной решетки

Ширину элементов $2a$ выбирают не более $0,5m$, т. е. $a \le \dfrac{\lambda}{8}$. Благодаря этому диаграмма направленности отдельного элемента определяется диаграммой направленности точечного источника.

Чтобы обеспечить угол ввода α, сдвиг фазы должен быть равен

$$\psi = \frac{m\sin\alpha}{\lambda}. \qquad (7.5)$$

Тогда акустическое поле решетки определяется выражением

$$P = P_0 \chi(\theta) \frac{S_a}{\lambda r} \frac{\sin\left[0,5kmN\left|\sin\theta - \sin\alpha\right|\right]}{\sin\left[0,5km\left|\sin\theta - \sin\alpha\right|\right]}, \qquad (7.6)$$

где $\chi(\theta)$ – диаграмма направленности точечного источника.

В этом случае основной максимум соответствует условию $\theta = \alpha$, первые минимумы – условию

$$\sin\theta = \sin\alpha \pm \frac{\pi}{0,5kmN} = \sin\alpha \pm \frac{2}{N}, \qquad (7.7)$$

если положить $m = \frac{\lambda}{2}$.

Если диаграмму направленности рассматривать по уровню 0,1, то направления на эти точки диаграммы определяются выражением

$$\sin\theta = \sin\alpha \pm \frac{1,6}{N}. \qquad (7.8)$$

Пример – Рассчитать конструктивные параметры пьезопреобразователя, излучающего в воду, в виде одномерной фазовой решетки на основе пьезокерамики ЦТС-19 толщиной 1 мм, обеспечивающего изменение угла ввода для продольной волны в пределах ±30° при ширине диаграммы направленности на уровне $\sqrt{0,1}$ равной $\theta' = 10°$. Скорость продольной акустической волны в пьезопластине и в воде равна 4060 и 1490 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ соответственно.

Решение

Определим длину волны в воде. Так как в пластине из пьезокерамики резонансная длина волны равна двойной толщине пластины, то длина волны в пьезопластине $\lambda_{\text{Пк}}$ равна 2 мм. Определим резонансную частоту пьезопреобразователя из формулы $f = \frac{C_{\text{Пк}}}{\lambda_{\text{Пк}}} = \frac{4060}{2 \cdot 10^{-3}} = 2,03 \cdot 10^6$ Гц $= 2,03$ МГц. Тогда длина волны в воде будет $\lambda_{\text{в}} = \frac{C_{\text{в}}}{f} = \frac{1490}{2,03 \cdot 10^6} = 0,72 \cdot 10^{-3}$ м $= 0,72$ мм.

Выбираем шаг решетки равным половине длины акустической волны в воде, т. е. $m = 0,5\lambda_{\text{в}} = 0,5 \cdot 0,72 = 0,36$ мм.

Ширину отдельного элемента также выбираем равным половине шага решетки, т. е. $2a = 0,18$ мм.

Необходимо рассчитать сдвиг фазы между соседними элементами, т. к. благодаря ему формируется ось диаграммы направленности.

Найдем максимальное изменение фазы при максимальном отклонении луча на $\alpha_{max} = \pm 30°$. Оно равно $\psi = tf = \dfrac{m \sin \alpha_{max}}{\lambda_в} = 0,25$ рад, т. е. фаза изменяется от 0 до 0,25 рад при отклонении акустического луча от 0° до 30°.

Число элементов преобразователя определяем из ширины диаграммы направленности. На основании рассчитанной диаграммы направленности

$$p = p_0 \chi(\theta) \frac{s_a}{\lambda r} \frac{\sin\left[0,5kmN\left|\sin\theta - \sin\alpha\right|\right]}{\sin\left[0,5km\left|\sin\theta - \sin\alpha\right|\right]}$$

первые минимумы удовлетворяют условию

$$\sin\theta = \sin\alpha \pm \pi\left(0,5kmN\right)^{-1} = \sin\alpha \pm \frac{2}{N},$$

если $m = \dfrac{\lambda_в}{2}$. Отсюда $N = \dfrac{2}{\left|\sin\theta - \sin\alpha\right|}$.

Считаем, что $\alpha = \alpha_{max}$, а $\theta = \alpha_{max} + \theta'$, что соответствует условию, требующему максимального значения. Тогда

$$N = \frac{2}{\left|\sin\left(30° + 10°\right) - \sin 30°\right|} = \frac{2}{\left|\sin\left(40°\right) - \sin 30°\right|} = \frac{2}{\left|0,64 - 0,5\right|} = 14.$$

Таким образом, количество элементов в решетчатом пьезопреобразователе равно 14.

Общий размер преобразователя будет равен $Nm = 14 \cdot 0,36 = 5,04$ мм.

7.2 Задачи для самостоятельного решения

7.2.1 Найти передаточную характеристику в виде коэффициента излучения для кварцевой пластины, излучающей в полубесконечную среду одной стороной без контактного слоя.

7.2.2 Сравнить максимальные коэффициенты преобразования (в виде коэффициента излучения) пьезопреобразователей, изготовленных из пластинок кварца и пьезокерамики ЦТС-19, PZT-5H толщиной 0,5 мм, излучающих в воду. Найти частоты, на которых наблюдаются максимальный и минимальный коэффициент излучения для этих же преобразователей.

7.2.3 Провести анализ влияния контактного слоя на характеристики пьезопреобразователя на основе кварцевой пластины и пластины из пьезокерамики, излучающей в полубесконечную среду.

7.2.4 Построить передаточную характеристику в виде коэффициента излучения для кварцевой пластины толщиной 1 мм, излучающей в полубесконечную водную среду одной стороной без контактного слоя.

7.2.5 Рассчитать конструктивные параметры пьезопреобразователя, излучающего в воду, в виде одномерной фазовой решетки на основе пьезокерамики ЦТС-19 толщиной 0,5 мм, обеспечивающего изменение угла ввода для продольной волны в пределах ±20° при ширине диаграммы направленности на уровне $\sqrt{0,1}$, равной $\theta' = 5°$.

7.2.6 Рассчитать конструктивные параметры пьезопреобразователя, излучающего в воду, в виде одномерной фазовой решетки на основе пьезокварца толщиной 1 мм, обеспечивающего изменение угла ввода для продольной волны в пределах ±30° при ширине диаграммы направленности на уровне $\sqrt{0,1}$, равной $\theta' = 10°$.

Контрольные вопросы

1 В чем заключается суть работы акустических преобразователей?

2 Какие характеристики акустических преобразователей имеют практическое значение?

3 В чем заключается особенность методов расчета акустических преобразователей?

4 Что представляют собой преобразователи на фазированных решетках?

5 В чем заключается особенность расчета преобразователей на фазированной решетке?

8 Расчет магнитных и емкостных преобразователей

8.1 Основные теоретические сведения

Действие магнитных приборов неразрушающего контроля основано либо на регистрации магнитных полей вблизи контролируемого объекта, либо на оценке магнитного потока внутри объекта контроля. Эти преобразователи преобразуют энергию магнитного поля в электрическую. Такие преобразователи принято классифицировать по первичной информации и по принципу действия. По первичной информации магнитные преобразователи делят на полемерные и градиентометрические. Первые измеряют величину магнитного поля, а вторые – величину неоднородности поля. Полемерные, в свою очередь, делятся на модульные, которые измеряют величину индукции магнитного поля и компонентные, которые измеряют отдельные компоненты индукции магнитного поля. Градиентометрические преобразователи определяют скорость изменения индукции магнитного поля в ортогональных направлениях.

При классификации по принципу действия различают индукционные, феррозондовые, гальваномагнитные, магниторезистивные, магнитооптические (магнитодоменные), магнитные ленты и магнитные порошки [1].

Индукционные преобразователи. Их работа основана на законе электромагнитной индукции, согласно которому ЭДС, наведенная в замкнутом конту-

ре, пропорциональна изменению во времени сцепления этого контура с магнитным потоком.

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\left(B \cdot S\right)}{dt} = -B\frac{dS}{dt} = -S\frac{dB}{dt}.$$

Изменение сцепления контура с магнитным потоком может быть реализовано двумя способами. Первый заключается в том, что размеры контура остаются постоянными и он не изменяет положения относительно вектора магнитной индукции, то в этом случае возникает трансформаторная ЭДС, обусловленная изменением во времени магнитного потока.

$$U_{\text{тр}} = -S\frac{dB\left(t\right)}{dt}.$$

Преобразователи, использующие трансформаторную ЭДС, называются пассивными и могут быть использованы для измерения индукции переменных магнитных полей.

Второй способ изменения сцепления контура с магнитным потоком обусловлен поворотом контура вокруг оси, перпендикулярной вектору магнитной индукции. При этом возникает так называемая ЭДС движения:

$$U_{\text{дв}} = -B\frac{dS}{dt}.$$

Преобразователи, использующие ЭДС движения, называются активными и могут быть использованы для измерения индукции постоянных магнитных полей.

Гальваномагнитные преобразователи. Их еще называют датчики Холла, принцип работы которых заключается в искривлении пути носителей тока в металлах и полупроводниках, находящихся в магнитном поле под действием силы Лоренца. К примеру, на рисунке 8.1 приведена схема образования холловской ЭДС [1].

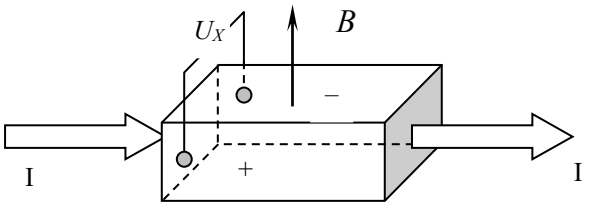


Рисунок 8.1 – Схема физического принципа работы гальваномагнитного преобразователя

При пропускании тока через кристалл преобразователя положительные заряды отклоняются измеряемым магнитным полем вправо, а отрицательные вле-

во относительно направления распространения тока. В результате этого передняя грань кристалла заряжается положительно, а задняя отрицательно, т. е. возникает холловская ЭДС, величина которой определяется выражением

$$U_X = \gamma IB,$$

где γ – чувствительность преобразователя;

I – управляющий ток;

B – измеряемая индукция магнитного поля.

Чувствительность преобразователя и номинальное значение управляющего тока приводятся в паспорте. Абсолютное значение чувствительности колеблется в пределах от 0,06 до 0,6 В/Тл.

Магниторезисторы. Их работа основана на использовании эффекта Гаусса – зависимости сопротивления полупроводника под действием магнитного поля [1].

Этот эффект относится к гальваномагнитным явлениям, заключающимся в искривлении траектории носителей свободных зарядов под действием магнитного поля. Магниторезисторы изготавливают из материалов с высокой чувствительностью к эффекту Гаусса.

Приращение сопротивления $\Delta\rho$ от индукции магнитного поля B определяется приближенной формулой:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{AB^2}{1+\mu B^2},$$

где A – коэффициент, зависящий от величины индукции магнитного поля;

μ – магнитная проницаемость материала, из которого изготовлено магнитосопротивление.

Электроемкостной метод неразрушающего контроля базируется на регистрации электрической емкости или тангенса угла диэлектрических потерь первичного преобразователя в виде электрического конденсатора, в состав которого входит объект контроля (ОК) или его часть. Если ОК диэлектрик, то электрическое поле в нем создается электроемкостным преобразователем, обкладки которого подключены к генератору переменного напряжения. Если же ОК состоит из проводящего материала, то контролируемый объект может служить одной из обкладок конденсатора. Но в этом случае также возможно расположение ОК между обкладками конденсатора [1].

Информативными параметрами являются емкость и тангенс угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta$. Эти параметры зависят от диэлектрической проницаемости и плотности материала, из которого изготовлен ОК, его размеров, формы, радиопрозрачности, содержания компонентов в смеси, влажности, степени полимеризации и старения полимерных материалов, нарушения сплошности (поры, инородные включения, расслоения), механических напряжений. Степень корреляции емкости и тангенса угла диэлектрических потерь к контролируе-

мым параметрам различна. Так, емкость сильно зависит от диэлектрической проницаемости материала, из которого изготовлен объект контроля, его размеров и формы, но tgδ слабо зависит от размеров ОК.

По взаимному расположению ОК и электродов все первичные электроемкостные преобразователи можно разделить на накладные и проходные. Электроды накладных преобразователей расположены с одной стороны ОК, а электроды проходных преобразователей охватывают контролируемый объект со всех сторон. Накладные преобразователи чаще всего используют для контроля объектов с плоскими поверхностями, а проходные – для контроля линейно-протяженных объектов (проволока, пряжа, волокна). Особый тип представляют собой погружные преобразователи, используемые для контроля сыпучих и жидких веществ. Они выполняются в виде погружаемых в среду электродов или сосуда с электродами, заполняемого контролируемой жидкостью.

Пример 1 – Построить градуировочную характеристику емкостного толщиномера для измерения толщины картона и тефлоновой ленты шириной 0,5 м. Изменение толщины картона от 0,5 до 4 мм, а ленты – от 100 до 200 мкм. Диэлектрическая проницаемость картона $\varepsilon_к = 3,$ а диэлектрическая проницаемость тефлона $\varepsilon_T = 4$. Диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_2 = 1$.

Решение

Рассмотрим плоский конденсатор с двумя слоями диэлектрика. Площадь пластин *S*. Слой исследуемого материала толщиной d_1. Толщина конденсатора – d. Схема преобразователя приведена на рисунке 8.2.

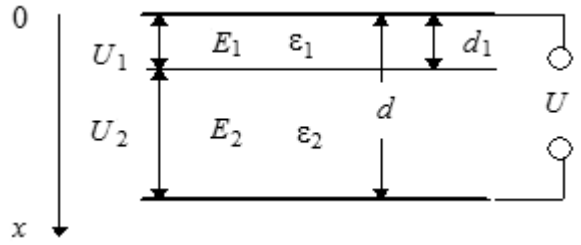


Рисунок 8.2 – Схема электроемкостного толщиномера

Напряжение на конденсаторе будет равно сумме напряжений на отдельных слоях:

$$U = U_1 + U_2; \quad U_1 = \int_0^{d_1} E_1(x)dx; U_2 = \int_{d_1}^{d} E_2(x)dx.$$

Так как эти слои однородные, то напряженность электрического поля внутри каждого из слоя будет одинаковой, поэтому ее можно вынести из под интеграла. Тогда

$$U_1 = E_1 d_1;\ U_2 = E_2 (d - d_1).$$

Из граничных условий на границе двух диэлектрических слоев $D_{1n} = D_{2n}$ следует $\varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2$. Отсюда

$$E_1 d_1 + E_2 (d - d_1) = U;\ E_1 d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_1 (d - d_1) = U;$$

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}(d - d_1)} = \frac{\varepsilon_2 U}{d_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_1 (d - d_1)};$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_1.$$

Определим емкость конденсатора при наличии в нем слоя. Из физики известно, что емкость плоского конденсатора определяется выражением $C = \frac{q}{U}$, где q – заряд конденсатора. Но с другой стороны, $q = \sigma S$, где σ – поверхностная плотность заряда на обкладках конденсатора. Ее можно найти из граничных условий на границе раздела «слой исследуемого материала – металлическая обкладка конденсатора» $\sigma = D_{1n} = D_{2n} = \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1$. Тогда

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 S}{U} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 U S}{U\left[\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 (d - d_1)\right]} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 S}{\left[\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 (d - d_1)\right]} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 S}{\varepsilon_1 d + d_1 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}.$$

Но так как $\varepsilon_2 = 1$, то $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{\varepsilon_1 d + d_1 (1 - \varepsilon_1)}$. Отсюда $d = \frac{\varepsilon_1 (\varepsilon_0 S - dC)}{C(1 - \varepsilon_1)}$.

Пример 2 – Построить градуировочную характеристику магнитного толщиномера полимерных пленок, состоящего из П-образного сердечника, на который намотана катушка с числом витков *W*, по которой протекает ток *I*. Сердечник замыкается ярмом из аналогичного материала.

Решение

Рассмотрим схему толщиномера, приведенную на рисунке 8.3.

По закону Кирхгофа для магнитодвижущей силы можем записать

$$H_c L_c + 2 H_{пл} L_{пл} = IW.$$

Из-за тонкости полимерной пленки магнитная индукция везде одинакова. Таким образом,

$$e_{\text{стали}} = e_{\text{пленки}} = e_0.$$

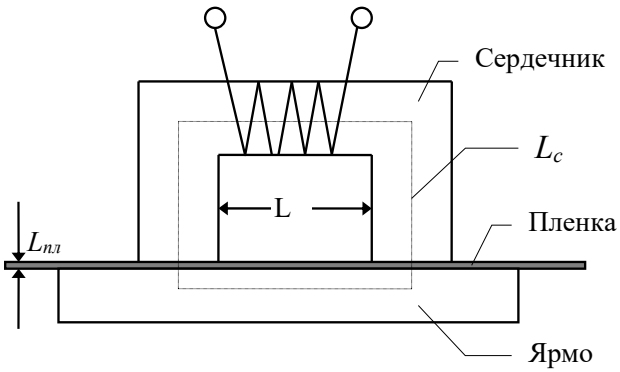


Рисунок 8.3 – Схема толщиномера

Относительная магнитная проницаемость для полимерной пленки равна единице. С учетом этого можно записать, что

$$\frac{e_0}{\mu_{ст}\mu_0} L_c + 2\frac{e_0}{\mu_0} L_{пл} = IW.$$

Из этого уравнения можем получить выражение для градуировочной зависимости толщиномера:

$$B_0(L_{пл}) = \frac{\mu_{ст}\mu_0 IW}{L + 2\mu_{ст} L_{пл}}.$$

Из этого выражения видно, что для повышения чувствительности преобразователя необходимо увеличивать число ампер-витков катушки, магнитную проницаемость сердечника и уменьшать размер сердечника.

8.2 Задачи для самостоятельного решения

8.2.1 Построить градуировочную характеристику для емкостного датчика содержания воды в бензине. Параметры датчика: пластины размером 10 × 10 см, толщина зазора между пластинами d = 1 мм. Диэлектрическая проницаемость бензина $\varepsilon_1 = 3$, а диэлектрическая проницаемость воды $\varepsilon_2 = 81$.

8.2.2 Записать выражение для градуировочной зависимости емкостного датчика воды в этиловом спирте, представляющим собой кювету в виде двух металлических пластинок площадью S и толщиной d, если диэлектрическая проницаемость воды равна 81 а спирта – 2,5.

8.2.3 Определить градуировочную характеристику емкостного преобразователя перемещений, представляющий собой плоский конденсатор из двух металлических пластин площадью S, расположенных на расстоянии d. Между пластинами перемещается диэлектрическая пластина толщиной d, соединенная с перемещающимся объектом контроля.

8.2.4 Определить градуировочную характеристику емкостного преобразователя поворота угла, представляющий собой плоский конденсатор из двух ме-

таллических пластин площадью *S*, в виде двух секторов с углом раскрыва 90°, расположенных на расстоянии *d*.

Контрольные вопросы

1 Какие первичные преобразователи применяются при магнитном неразрушающем контроле?

2 Какие преобразователи относятся к активным, а какие к пассивным?

3 На каком принципе основано действие индукционных преобразователей?

4 Поясните принцип действия гальваномагнитного преобразователя.

5 Поясните принцип действия магниторезистора.

6 На каком физическом принципе основано действие емкостного преобразователя?

7 Назовите информативные параметры емкостных преобразователей.

Список литературы

1 Источники и первичные преобразователи для приборов неразрушающего контроля / В. И. Борисов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 320 с.

2 **Бараночников, М. Л.** Приемники и детекторы излучений: справочник / М. Л. Бараночников. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 640 с.

3 Источники и приемники излучений / Г. Г. Ишанин [и др.]. – Санкт-Петербург: Политехника, 1991. – 290 с.

4 Ультразвуковой контроль : учебное пособие / Н. П. Алешин [и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – Москва: Спектр, 2011. – 224 с.

Приложение А
(справочное)

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

Длина волны, нм	$\Phi^{э}_{елотн}$	$\Phi^{2600}_{елотн}$	$\Phi^{3200}_{елотн}$	$S^{Ge}_{елотн}$	$S^{Si}_{елотн}$	$S^{ФСА}_{елотн}$
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
2600	0,22	0,28	0,16	–	–	0,33
2700	0,19	0,25	0,14	–	–	0,26
2800	0,18	0,23	0,13	–	–	0,20
2900	0,16	0,21	0,11	–	–	0,16
3000	0,14	0,19	0,1	–	–	0,13

Приложение Б
(справочное)

Таблица Б.1 – Значения функции видности V_λ от длины волны света

Длина волны, нм	Функция видности V_λ	Длина волны, нм	Функция видности V_λ	Длина волны, нм	Функция видности V_λ
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	–	–