

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР  
КИЕВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ 50-ЛЕТИЯ ВЕЛИКОЙ ОКТЯБРЬСКОЙ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ

Утверждено  
на заседании кафедры  
оптических приборов  
Протокол № 30 от 5 марта 1986 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО КУРСУ  
"ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ"

для студентов специальности  
"Оптическое и оптико-электронное приборостроение"

Киев КПИ 1986

Методические указания к практическим занятиям по курсу "Источники и приемники излучения". Для студентов специальности "Оптическое и оптико-электронное приборостроение" / Сост. С.Т.Коваль, И.С.Мельник. - Киев: ИПИ, 1986. - 84 с.

Методические указания  
к практическим занятиям по курсу  
"Источники и приемники излучения"  
для студентов специальности  
"Оптическое и оптико-электронное приборостроение"

Составители Сергей Тимофеевич Коваль  
Иван Степанович Мельник

Ответственный редактор А.С.Островский

Рецензенты А.И.Ванюрихин  
В.Г.Колобродов

Редактор Л.Б.Прудникова

Корректоры П.И.Гольд  
О.В.Тимошенко  
Л.Н.Сахнюк  
Н.Ф.Слонина

Подп. к печ. 08.09.86. Изд. № 1739. Формат 60×84/16.  
Бумага тип. № 3. Печать офсетная. Физ. печ. л. 5,25. Уч.-изд. л. 4,66.  
Усл. печ. л. 4,88. Тираж 300. Зак. № 5644. Бесплатно.

КПИ, 252056, Киев, проспект Победы, 37

Межвузовское полиграфическое предприятие,  
252151, Киев, ул. Вольнская, 60.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

### ОСНОВЫ ФОТОМЕТРИИ

Цель занятия - приобрести навыки определения основных фотометрических величин, закрепить знания лекционного материала.

Основные задачи:

- 1/ усвоить понятия, определения и единицы фотометрии;
- 2/ пересчитать световые параметры излучения в энергетические и наоборот;
- 3/ рассчитать параметры излучения с использованием известных других.

#### 1. Общие положения

Излучение - одна из форм существования материи в виде совокупности электромагнитных волн или фотонов. Фотометрия базируется преимущественно на понятии излучения, имеющего электромагнитную природу. Условно к оптическому излучению относятся электромагнитные волны с длинами волн  $\lambda$  от 0,01 до 1000 мкм. Область  $0,01 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,38 \text{ мкм}$  соответствует ультрафиолетовому /УФ/, область  $0,38 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,77 \text{ мкм}$  - видимому, область  $0,77 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 1000 \text{ мкм}$  - инфракрасному /ИК/ излучению. Излучение, образованное электромагнитными волнами с одинаковыми или весьма близкими длинами волн, называется монохроматическим. При этом принято говорить, что излучение сосредоточено в пределах узкого интервала шкалы длин волн. Сложное или интегральное излучение образовано совокупностью монохроматических.

Монохроматическое излучение характеризуется средней длиной волны  $\lambda$ , мкм, составляющих его в интервале  $\Delta\lambda$  электромагнитных колебаний и энергией  $Q$ , Дж, или мощностью  $\Phi$ , Вт. В фотометрии мощность излучения принято называть потоком излучения:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}, \text{ где } t - \text{ время.}$$

Длина волны и поток излучения - соответственно качественная и количественная характеристики монохроматического излучения. Интегральное излучение характеризуется распределением энергии или мощности монохроматических компонент по длинам волн. Графическое представление такого распределения называется спектром излучения. Спектр монохроматического излучения содержит единственную ординату /линию/  $\Phi_{\lambda}$ . Различают линейчатые, полосовые, сплошные и смешанные спектры интегрального излучения. Линейчатый спектр образован набором отдельно расположенных ординат  $\Phi_{\lambda_1}, \Phi_{\lambda_2}, \dots, \Phi_{\lambda_n}$ . Поток такого излучения

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \Phi_{\lambda_i}. \quad /1.1/$$

Для построения спектров остальных видов интегрального излучения используют величину, называемую спектральной плотностью потока излучения  $\varphi_{\lambda}$ , Вт·мкм<sup>-1</sup>:

$$\varphi_{\lambda} = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_{\lambda}}{\Delta\lambda} = \frac{d\Phi_{\lambda}}{d\lambda}, \quad /1.2/$$

где  $\Delta\Phi_{\lambda}$  - поток излучения с длиной волны  $\lambda$  в узком спектральном интервале  $\Delta\lambda$ .

Интегральный поток излучения

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda, \quad /1.3/$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - границы данного интервала для волн;  $\varphi(\lambda)$  - функция спектральной плотности потока излучения.

Спектр сплошного излучения представляется на графике кривой

$$\varphi_{\lambda} = \varphi(\lambda).$$

Световой поток является эффективной по отношению к человеческому глазу частью потока излучения. Одинаковые потоки различных монохроматических излучений внутри видимого диапазона вызывают неодинаковые световые ощущения. Излучения УФ и ИК диапазонов вообще не создают световой реакции. Реакцией глаза на монохроматический поток излучения  $\Phi_{\lambda}$  является ощущение восприятия монохроматического светового потока  $\Phi_{cl}$ .

Такая реакция оценивается величиной, именуемой спектральной чувствительностью или коэффициентом видности глаза  $V_{\lambda}$ . По физическому смыслу она является монохроматическим световым потоком, соответствующим потоку излучения 1 Вт той же длины волн. В соответствии с определением

$$V_{\lambda} = \frac{\Phi_{cl}}{\Phi_{\lambda}}. \quad /1.4/$$

За единицу светового потока принят люмен /лм/, таким образом, единица коэффициента видности - 1 лм·Вт<sup>-1</sup>. Спектральная чувствительность глаза максимальна для излучения с  $\lambda = 0,555$  мкм. При этом  $V_{\lambda M} = 683$  лм·Вт<sup>-1</sup>.

Относительная спектральная чувствительность определяется отношением

$$\dot{V}_{\lambda} = \frac{V_{\lambda}}{V_{\lambda M}}. \quad /1.5/$$

Кривая, построенная в соответствии с функцией  $\dot{V}_{\lambda} = \dot{V}(\lambda)$ , называется кривой относительной видности глаза. Наиболее удачная аналитическая запись функции  $\dot{V} / \lambda /$  - формула Гольдгаммера - Герцуна:

$$\dot{V}_{\lambda} = A \lambda^{-m} e^{-\frac{n}{\lambda}}, \quad /1.6/$$

где  $m = 182,1905$ ,  $n = 100,9370$ ,  $\lg A = 32,4107$ .

Монохроматический световой поток определяется из /1.4/ и /1.5/

$$\Phi_{cl} = 683 \dot{V}_{\lambda} \Phi_{\lambda}. \quad /1.7/$$

Световой поток излучателя:  
со сплошным спектром

$$\Phi_c = 683 \int_{0,38}^{0,77} \dot{V}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda; \quad /1.8/$$

с линейчатым спектром

$$\Phi_c = 683 \sum_{i=1}^n \dot{V}_{\lambda_i} \Phi_{\lambda_i}. \quad /1.9/$$

Важные понятия фотометрии - точечный источник излучения и телесный угол.

Точечный источник излучения - источник, поперечный размер которого мал по сравнению с расстоянием  $r$  до приемной площадки. Уже при отношении  $r : h = 10$  предположение о точечности источника оказывается практически справедливым.

Телесным углом называется часть пространства, ограниченная конической поверхностью, опирающейся на основание в общем случае произвольной формы. Телесный угол  $d\omega$  измеряется отношением площади  $dA$ , которую он вырезает на поверхности сферы с центром в его вершине, к квадрату радиуса  $r^2$  этой сферы:

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \quad /1.10/$$

Если нормаль к элементу поверхности  $dA$  составляет угол  $\alpha$  с осью бесконечно малого телесного угла  $d\omega$ , то

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \cos \alpha \quad /1.11/$$

Единица телесного угла - стерадиан /ср/. Это такой центральный угол, который на поверхности сферы с радиусом 1 м вырезает участок площадью 1 м<sup>2</sup>. Полный телесный угол равен  $4\pi$  ср, телесный угол, охватывающий полусферу, -  $2\pi$  ср.

Распределение излучения от точечного излучателя в пространстве характеризует сила излучения,  $I_\alpha$ , которая есть пространственная плотность излучения в пределах элементарного телесного угла в каком-либо направлении  $\alpha$ :

$$I_\alpha = \frac{d\Phi_\alpha}{d\omega} \quad /1.12/$$

где  $d\Phi_\alpha$  - элементарный поток излучения в направлении  $\alpha$ , заключенный в телесном угле  $d\omega$ .

При постоянной силе излучения по всем направлениям можно вместо /1.12/ записать

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

За единицу силы излучения ватт на стерадиан принята сила излучения такого источника, у которого в пределах телесного угла в 1 ср равномерно распространяется поток излучения в 1 Вт. Следует отметить, что /1.12/ относится к интегральному излучению, однако и в случаях монохроматического излучения или при описании спектральных плотностей силы излучения форма аналитической записи сохраняется. В соответствии с изложенным имеем:

для монохроматического излучения

$$I_{\lambda\alpha} = \frac{d\Phi_{\lambda\alpha}}{d\omega} \quad /1.13/$$

для спектральной плотности силы излучения

$$i_{\lambda\alpha} = \frac{d\Phi_{\lambda\alpha}}{d\omega} \quad /1.14/$$

Если речь идет о световом излучении, соотношение

$$I_{\alpha} = \frac{d\Phi_{\alpha}}{d\omega}$$

определяет силу света. Единица силы света - кандела /кд/.

Кандела - сила света, получаемая в перпендикулярном направлении с 1/600000 квадратного метра поверхности абсолютно черного тела /АЧТ/ при температуре затвердевания платины /2042 К/ и давлении 1 атм.

Кандела - основная фотометрическая единица метрической системы СИ.

Поверхностная плотность излучения или излучательность - величина, дающая значение плотности потока излучения для элементарной поверхности излучателя  $dA$ :

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad /1.15/$$

По смыслу излучательность - поток излучения, испускаемый площадкой с единичной площадью. Единица излучательности ватт на метр квадратный /Вт/м<sup>2</sup>/.

Световым аналогом излучательности является светимость или светность. Единица светимости люмен на метр квадратный /лм/м<sup>2</sup>/.

Облученность - величина, характеризующая распределение потока излучения по облучаемой поверхности, Вт/м<sup>2</sup>:

$$E = \frac{d\Phi}{dA_2} \quad /1.16/$$

где  $dA_2$  - элементарная площадь облучаемой поверхности.

Освещенность. За единицу освещенности принят люкс /лк/. Такую освещенность имеет поверхность площадью в 1 м<sup>2</sup> при равномерном распределении по ней светового потока в 1 лм, т.е. 1 лк = 1 лм·м<sup>-2</sup>.

Величина, наиболее полно характеризующая протяженный излучатель, т.е. учитывающая поверхностное и пространственное распределение излучения, - лучистость. Под лучистостью излучающей поверхности понимают отношение силы излучения участка поверхности в определенном направлении к площади его проекции на плоскость, перпендикулярную к выбранному направлению.

Аналогичная световая величина называется яркостью.

По определению лучистость

$$L_{\alpha} = \frac{dI_{\alpha}}{dA \cos \alpha} = \frac{d^2 \Phi_{\alpha}}{d\omega dA \cos \lambda} \quad /1.17/$$

Единица лучистости - Вт·ср<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>. Лучистость определяет поток излучения, испускаемый поверхностью в 1 м<sup>2</sup> внутри телесного угла в 1 ср под углом  $\alpha$  по отношению к поверхностной нормали.

За единицу яркости принят нт/вт/. Размерность нита - кд·м<sup>-2</sup>. Такой яркостью обладает плоская поверхность в 1 м<sup>2</sup>, которая в перпендикулярном направлении имеет силу света в 1 кд. Все перечисленные энергетические и световые величины относятся к непрерывному излучению.

Метрология импульсов излучения или света зависит от времени действия импульса и его формы. Поэтому наиболее употребляемыми являются следующие величины:

энергия импульса излучения, Дж:

$$Q = \int_0^{t_H} \Phi(t) dt; \quad /1.18/$$

количество облучения, Дж/м<sup>2</sup>:

$$H = \int_0^{t_H} E(t) dt, \quad /1.19/$$

где  $t_H$  - время действия импульса.

Аналогичные световые величины называются соответственно энергия светового импульса и экспозиция. Единица энергии светового импульса  $Q_c$  - люмен-секунда /лм·с/, а экспозиции - люкс-секунда /лк·с/.

Обращаясь в дальнейшем только к оптическому излучению, как более общему понятию, чем свет, приведем основные соотношения фотометрии.

1. Облученность поверхности, создаваемая точечным излучателем:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \quad /1.20/$$

где  $\alpha$  - угол между нормалью к поверхности и направлением на точечный излучатель.

2. Второе определение лучистости:

$$L_{\alpha} = \frac{dE_1}{d\omega_2}, \quad /1.21/$$

где  $E_1$  - облученность элемента поверхности, перпендикулярной к направлению на излучатель;  $\omega_2$  - телесный угол с вершиной в центре назван-

ного элемента поверхности, опирающийся на видимый из этого центра контур излучателя.

Данное соотношение правомочно, если излучатель - тело сложной объемной конфигурации, например, облако. Легко заметить, что входящие в /1.21/ параметры, относятся к облучаемой поверхности, а не к самому излучателю, что отличает его соотношение от /1.17/. Последующие соотношения относятся к излучателям, равнолучистым во всех направлениях. Такие излучатели называются ламбертовыми, для них  $L_{\alpha} = L = const$ .

3. В соответствии с законом Ламберта сила излучения равнолучистой поверхности

$$I_{\alpha} = I_0 \cos \alpha, \quad /1.22/$$

где  $I_0$  - сила излучения в перпендикулярном направлении.

4. Поток излучения, испускаемый в полусферу ламбертовой поверхностью:

$$\Phi = \pi L A, \quad /1.23/$$

5. Поверхностная плотность излучения ламбертовой поверхности связана с лучистостью

$$M = \pi L. \quad /1.24/$$

6. Баланс потоков излучения при взаимодействии излучения с веществом

$$\Phi = \Phi_{\alpha} + \Phi_{\tau} + \Phi_{\rho}, \quad /1.25/$$

где  $\Phi$  - падающий на вещество поток излучения;  $\Phi_{\alpha}$ ,  $\Phi_{\tau}$  и  $\Phi_{\rho}$  - соответственно поглощенный, пропущенный и отраженный поток излучения.

Вторая форма записи /1.25/

$$I = \alpha + \tau + \rho, \quad /1.26/$$

где  $\alpha$ ,  $\tau$ ,  $\rho$  - коэффициент соответственно поглощения, пропускания и отражения излучения. Данные коэффициенты находят делением слагаемых из /1.25/ на  $\Phi$ .

7. Поверхностная плотность излучения идеального и диффузного рассеивателя.

Идеальным рассеивателем называется несамоизлучающая поверхность, полностью и равномерно рассеивающая излучение по всем направлениям не-

зависимо от направления и длины волны падающих лучей.  
Для идеального рассеивателя

$$M = E, \quad /I.27/$$

где  $E$  - облученность рассеивателя, а лучистость сведена к облученности соотношением:

$$L = \frac{1}{\pi} E. \quad /I.28/$$

Диффузный рассеиватель характеризуется теми же особенностями, что и идеальный, за исключением того, что для него  $\rho < 1$ . При этом

$$M = \rho E \quad /I.29/$$

и

$$L = \frac{\rho}{\pi} E. \quad /I.30/$$

## 2. Решение примеров

Пример I.1. Из аргонового лазера выделено только два монохроматических излучения с  $\lambda_1 = 0,488$  мкм и  $\lambda_2 = 0,515$  мкм. Поток этих излучений  $\Phi_{\lambda_1} = 2$  Вт и  $\Phi_{\lambda_2} = 6$  Вт. Определить общий световой поток.

Решение. Спектр излучения является линейчатым, состоящим из двух линий.

Поэтому согласно /I.9/ световой поток

$$\Phi_c = 683 (\dot{V}_{\lambda_1} \Phi_{\lambda_1} + \dot{V}_{\lambda_2} \Phi_{\lambda_2}).$$

Неизвестные коэффициенты относительной видности  $\dot{V}_{\lambda}$  могут быть взяты из специальных таблиц /см., например, Гуревич М.М. Введение в фотометрию. 1968/. Из них находим  $\dot{V}_{\lambda_1} = 0,1925$  и  $\dot{V}_{\lambda_2} = 0,6082$ . В результате общий световой поток  $\Phi_c = 683 /0,1925 \cdot 2 + 0,6082 \cdot 6/ = 2755,3586$  лм. Подобные задачи можно решать с помощью формулы Гольдгаммера - Гершуна /I.6/, не обращаясь к таблицам. Воспользуемся этой формулой для построения кривой относительной видности глаза и последующего сравнения ее с кривой, определенной международным соглашением. Расчет значений будем вести с помощью программируемого микрокалькулятора. Общая программа для вычисления значений любой функции  $y$  при изменении аргумента  $x$  с постоянным шагом  $\Delta x$  для микрокалькулятора типа "Электроника МК-54" имеет вид

П2 [...] С/П ИП2 ИП3 + БПОО.

10

Многоточием обозначена программа для вычисления значения функции по значению аргумента, хранящемуся в регистре 2.

Инструкция пользования этой программой:

Г АВТ 0 П2  $\Delta x$  ПЗ В/0 С/П.

Индицируемое при этом значение  $y_1$  соответствует значению аргумента  $x_0 + \Delta x$ , где  $x_0 = 0$ . Последующие значения  $y_2, y_3, \dots, y_n$  находят при нажатии только клавиши С/П.

Если же необходимо начать вычисление функции для произвольного значения  $x_0$  аргумента, то его заносит в регистр X и нажимает клавиши В/0 и С/П. Последующие значения находят при нажатии клавиши С/П. Программа для вычисления  $\dot{V}_{\lambda}$  оставлена для предварительно прологарифмированной формулы /I.6/

П2 32,4107↑ ИП2 Flg 182,1905 x - ↑  
2,71828 Flg 100,937 x ИП2 : - /10<sup>x</sup> С/П  
ИП2 ИП3 + БПОО

Так как вычисления начинаются со значения  $\lambda = 0,38$  мкм с интервалом  $\Delta \lambda = 0,01$  мкм, то инструкция к программе имеет вид

Г АВТ 0 П2 0,02 ПЗ 0,38 В/0 С/П.

Для детального изучения поведения кривой вблизи максимума, соответствующего, как известно  $\lambda = 0,555$ , можно сократить исследуемый интервал значений  $\lambda$  и уменьшить  $\Delta \lambda$  до значения, например, 0,005. В этом случае в режиме вычисления по программе необходимо нажать следующие клавиши: 0,005 П 3 0,54 В/0 С/П и далее процедура вычисления повторяется нажатием только клавиши С/П. Результаты следует сводить в предварительно подготовленную таблицу.

На рис. I.1 показана кривая относительной видности, построенная по результатам расчета. Некоторое превышение значения  $\dot{V}_{\lambda M} = 1,0$  является следствием приближенности /I.6/, поэтому на завершающем этапе необходимо ординаты кривой уменьшить пропорционально с тем, чтобы обеспечить  $\dot{V}_{\lambda M} = 1,0$ . С учетом отмеченного контрольные расчеты при  $\lambda_1 = 0,488$  мкм и  $\lambda_2 = 0,515$  мкм дают значения  $\dot{V}_{\lambda_1} = 0,2169$  и  $\dot{V}_{\lambda_2} = 0,6091$ , которые близки к табличным. Время вычисления одного значения 18 с.

Пример I.2. Линза, имеющая диаметр  $D = 50$  мм, установлена так по отношению к точечному источнику излучения, что угол между оптической осью и направлением из центра линзы на источник  $\alpha = 60^\circ$ . Сила излучения источника  $I = 10$  Вт·ср<sup>-1</sup>, а удаление  $r = 10$  м. Найти поток излучения, прошедший линзу. Коэффициент пропускания  $\tau = 0,7$ .

**Решение.** Поток излучения, прошедший линзу:

$$\Phi_2 = \tau \Phi,$$

где  $\Phi$  - поток излучения, падающий на линзу, очевидно из /1.16/  
 $\Phi = EA_2$ , при этом  $A_2 = \pi D^2 / 4$ , а  $E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$ .

Окончательно имеем

$$\Phi = \tau \pi \frac{D^2 I}{4r^2} \cos \alpha = 0,7 \pi \frac{0,05^2 \cdot 10}{4 \cdot 10^2} 0,5 \approx 6,87 \cdot 10^{-5} \text{ Вт.}$$

**Примечание.** Решение задачи можно построить на другой логике, взяв за исходную формулу

$$\Phi = I \omega.$$

Учитывая, что  $\omega = \pi D^2 \cos \alpha / 4r^2$ , после подстановок приходим в конечном итоге к такому же результату.

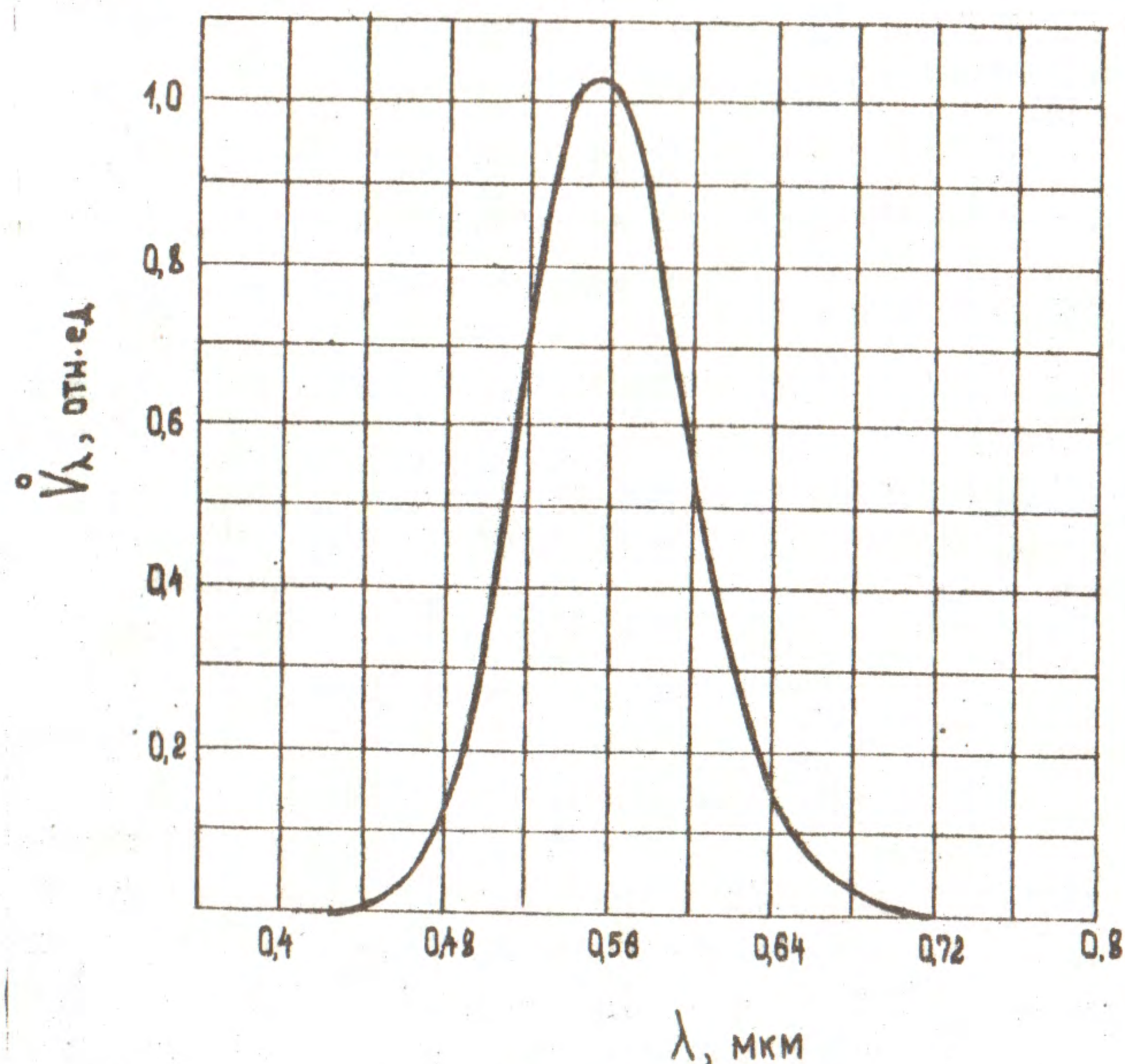


Рис. I.1

**Пример I.3.** Лампа накаливания, испускающая излучение одинаково по всем направлениям, освещает диффузный рассеиватель в виде плоской пластины из нейтрального светофильтра с матовой поверхностью. Полный световой поток лампы  $\Phi_c = 100$  лм, а коэффициент отражения  $\rho = 0,2$ . Удаление пластины от лампы  $r = 2$  м, а угол между нормалью и направлением

на лампу  $\alpha = 60^\circ$ . Найти яркость диффузного рассеивателя.

**Решение.** Яркость диффузного рассеивателя

$$L = \frac{\rho}{\pi} E,$$

где  $E$  - его освещенность, определяемая по формуле

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha.$$

Так как  $I = \frac{\Phi_c}{4\pi}$ , то после подстановок находим

$$L = \frac{\rho \Phi_c}{4\pi^2 r^2} \cos \alpha = \frac{0,2 \cdot 100}{4\pi^2 \cdot 2^2} 0,5 = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ лм/м}^2 \cdot \text{ср.}$$

**25.11** **Пример I.4.** Яркость полупроводникового светоизлучающего диода  $L = 20$  кд·м<sup>-2</sup>. Расходимость испускаемых лучей  $\beta = 60^\circ$  при этом индикатриса излучения симметрична относительно нормали к поверхности кристалла полупроводника. Полагая излучающую поверхность площадью  $A = 1$  мм<sup>2</sup> в пределах указанного угла ламбертовой расходимости, определить испускаемый световой поток.

**Решение.** Согласно /1.17/ световой поток

$$\Phi_c = LA \int \cos \alpha d\omega.$$

Можно показать, что

$$\omega = 2\pi(1 - \cos \alpha).$$

После дифференцирования имеем

$$d\omega = 2\pi \sin \alpha d\alpha.$$

В результате подстановки и интегрирования находим

$$\Phi_c = \pi LA \int_0^{\pi/6} \sin 2\alpha d\alpha = \frac{\pi}{4} LA = \frac{\pi}{4} 20 \cdot 10^{-6} = 1,57 \cdot 10^{-5} \text{ лм.}$$

3. Задание для самостоятельной работы

**Задача I.1.** Функция спектральной плоскости излучательности абсолютно черного тела /АЧТ/

$$m_\lambda = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2 \lambda^{-1} T^{-1}) - 1]^{-1},$$

где  $C_1 = 3,742 \cdot 10^8$  Вт·мкм<sup>4</sup>·м<sup>-2</sup>;  $C_2 = 1,439 \cdot 10^4$  мкм·К;

$T$  - температура АЧТ.

Полагая АЧТ ламбертовым излучателем, определить его спектральную плотность лучистости  $l_\lambda = l(\lambda)$ . Разработав по аналогии с примером I.1 программу для автоматизированного вычисления значений  $l_\lambda$ .

построить таблицу и графики сплошного спектра лучистости АЧТ для двух значений температуры  $T_a$  и  $T_b$ , приведенных в табл. I.1. Графики строить на миллиметровке для интервала  $\lambda$  от 0,4 до 16 мкм с шагом

$\Delta\lambda = 0,4$  мкм. Для уточнения положения максимума шаг  $\Delta\lambda$  рекомендуется уменьшить до 0,2 мкм.

Контрольный расчет по программе при  $T = 1000$  К и  $\lambda = 1$  мкм дает  $\ell_2 = 67,06$  Вт·м<sup>-2</sup>·мкм<sup>-1</sup>.

Таблица I.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_a$	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
$T_b$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600

Продолжение табл. I.1

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600
1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800
				25	26	2700	2800				
						2900	3000				

**Задача I.2.** Поток излучения с постоянным сплошным спектром в диапазоне длин волн от 0,4 до 0,75 мкм равен 0,35 Вт. Используя формулу /1.6/, определить световой поток, прошедший полосовой светофильтр, который полностью пропускает излучение с  $\lambda$  от  $\lambda_a$  до  $\lambda_b$ . Для автоматического вычисления на программируемой микроЭВМ записать исходную формулу, а также составить блок-схему алгоритма и программу численного интегрирования по формуле прямоугольников. Данные  $\lambda_a$  и  $\lambda_b$  приведены в табл. I.1.

Контрольный расчет по программе при  $\lambda_a = 0,6$  мкм,  $\lambda_b = 0,64$  мкм и числе интервалов  $n = 4$  дает  $\Phi_c = 9,62$  лм.

**Задача I.3.** Полагая в примере I.3 диффузный рассеиватель круглым диском с радиусом 5 см, найти его силу света и светимость.

Программа для определения светового потока в задаче I.2.

Численное интегрирование по формуле прямоугольников. Подынтегральная функция - формула Гольдгаммера - Гершуна в логарифмированном виде

$$\lg V_\lambda = 32,4107 - 182,1905 \lg \lambda - \frac{100,937}{\lambda} \lg e,$$

14

В/О F ПРТ ПО F O - F Вх == ИПО / : ПД 2 : - ПВ  
 Сх ПС ИПВ ИЦД ИЦД ПВ ПП ЗФ ИПС + ПС FLO  
 I4 ИЦД x 683 x ПВ С/П 32,4107 ↑ ИПВ Feg 182,1905  
 x - ↑ 2,7182818 Feg 100,937 x ИПВ : - F 10<sup>x</sup> В/О  
 Инструкция:  $\lambda_b \uparrow \lambda_a \uparrow n$  В/О С/П  
 Регистры: D-n; B- $\lambda_a$  и  $V_\lambda$ ; C- $\Sigma$ ; A- $\Delta$   
 Пример:  $\lambda_a = 0,6$  мкм;  $\lambda_b = 0,64$  мкм; число интервалов  $n = 4$ .  
 Время вычисления  $t = 79$  с. Полный световой поток -  $\Phi_c = 72,96$ .

$$\Phi_{c, 0,6-0,64} = 9,620753 \text{ лм.}$$

Формула интеграла

$$\Phi_c = \Delta \sum_{i=1}^n V_\lambda \left( \lambda_a - \frac{\Delta}{2} + i\Delta \right),$$

где  $\Delta = \frac{\lambda_b - \lambda_a}{n}$ .

Программа для расчета  $\ell_2$  в задаче I.1

В/О F ПРТ П2 ИП4 ИП2 x F I/x I,439  
 ВП 4 x F e<sup>x</sup> I - 3,742 ВП 8 == :  
 ИП5 5 В↑ ИП2 F x<sup>y</sup> F I/x ИП5 x F π : С/П ИП2  
 ИПЗ + БП 00

ИНСТРУКЦИЯ:

F АВТ Т x П4 0 1 x П2 0,4 x ПЗ В/О С/П

Контрольный расчет:

$$\ell_2 = 67,058924 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{мкм}}, \text{ при}$$

$$T = 1000 \text{ К } \Delta\lambda = 0,4 \quad \lambda = 1 \text{ мкм}$$

$$t = 11 \text{ с / для МК-54/}$$



ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Цель занятия - приобрести навыки применения законов теплового излучения для расчета излучательности реальных и абсолютно черных тел /АЧТ/.

Основные задачи:

- 1/ изучить законы теплового излучения АЧТ;
- 2/ освоить методы расчета  $m_\lambda$  и  $M$ ;
- 3/ овладеть принципами нахождения важнейших параметров излучения черных и нечерных температурных излучателей.

I. Общие положения

Основа расчета параметров теплового излучения - законы излучения АЧТ.

Абсолютно черным телом называется тело, поглощающее все падающие на него излучения любых длин волн. Спектр излучения АЧТ сплошной.

Спектральная плотность излучательности АЧТ описывается законом Планка:

$$\tilde{m}_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad /2.1/$$

где  $T$  - абсолютная температура, К;  $C_1 = 3,7415 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$ ;  
 $C_2 = 1,43879 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Здесь и далее символ  $\sim$  свидетельствует о том, что параметр относится к АЧТ. Зависимость  $\tilde{m}_\lambda = m(\lambda)$  на графике для разных значений  $T$  представляется семейством кривых, именуемых изотермами. Кривые  $\tilde{m}_T = m(T)$ , получаемые с использованием /2.1/, называются изохроматами.

Длина волны  $\lambda_M$ , которой соответствует максимальное значение  $\tilde{m}_\lambda$ , находится из закона смещения Вина:

$$\lambda_M = \frac{2897,8}{T} \quad /2.2/$$

Другая формулировка этого закона дает максимальное значение спектральной плотности излучательности в зависимости от температуры

$$\text{где } \tilde{m}_{\lambda M} = \frac{\sigma T^5}{\lambda_M^5} \quad /2.3/$$

Используя /2.1/ - /2.3/ можно получить формулу для нахождения относительной спектральной плотности:

$$\frac{\tilde{m}_\lambda}{\tilde{m}_{\lambda M}} = \frac{2,9082 \cdot 10^{19}}{z^5 (e^{\frac{z}{5}} - 1)} \quad /2.4/$$

где  $z = \lambda T$ . Чаще однако используют другую форму записи

$$\tilde{m}_\lambda = 142,32 x^{-5} / e^{4,9651/x} - 1 \quad /2.5/$$

где  $x = \lambda / \lambda_M$ .

Соотношение /2.5/ положено в основу таблиц значений  $\tilde{m}_\lambda = y_\lambda = y(x)$ , приведенных во многих монографиях по светотехнике и фотометрии. Кривая, построенная в соответствии с /2.4/ или /2.5/, называется единой изотермической кривой или изотермой.

При расчетах  $\tilde{m}_\lambda$  вместо формулы Планка в некоторых случаях можно использовать более простые приближенные формулы Вина и Рэлея - Джинса.

Формула Вина:

$$\tilde{m}_\lambda = C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} \quad /2.6/$$

позволяет вести расчеты с ошибкой не более 1 % при  $\lambda T < 3000 \text{ мкм} \cdot \text{К}$  и не более 10 % при  $\lambda T < 6000 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Формула Рэлея - Джинса:

$$\tilde{m}_\lambda = C_1 C_2^{-4} T \lambda^{-4} \quad /2.7/$$

дает такие же ошибки, когда  $\lambda T$  больше соответственно  $7,7 \cdot 10^5 \text{ мкм} \cdot \text{К}$  и  $7 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Излучательность АЧТ в заданном интервале длин волн от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$  находится интегрированием формулы Планка:

$$\tilde{M}_{12} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tilde{m}(\lambda) d\lambda \quad /2.8/$$

Полная излучательность /поверхностная плотность излучения/ определяется законом Стефана - Больцмана:

$$\tilde{M} = \sigma T^4 \quad /2.9/$$

где  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  постоянная Стефана - Больцмана

Поверхностная плотность числа фотонов, испускаемых АЧТ, находится из соотношения

$$N = \sigma' T^3 \quad /2.10/$$

где  $C' = 1,52041 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-3}$ , а длина волны, где значение спектральной плотности числа фотонов максимально, - из формулы

$$\lambda'_M = \frac{3669,73}{T} \quad /2.11/$$

В основе расчетов параметров теплового излучения реальных нечерных тел лежит закон Кирхгофа, устанавливающий связь с аналогичными параметрами излучения АЧТ:

$$m_\lambda = \varepsilon_{\lambda T} \tilde{m}_\lambda \quad /2.12/$$

где  $\varepsilon_\lambda$  - спектральный коэффициент теплового излучения реального тела.

При учете суммарного излучения закон Кирхгофа записывается в следующей форме:

$$M = \varepsilon_T \tilde{M} = \varepsilon_T C T^4 \quad /2.13/$$

где  $\varepsilon_T$  - интегральный коэффициент излучения реального тела.

В общем случае  $\varepsilon_{\lambda T}$  нечерных тел зависит от  $\lambda$  и  $T$ . Большинство металлов обладает селективной способностью излучения, вызванной тем, что их спектральный коэффициент излучения уменьшается с увеличением  $\lambda$ . По этой причине все металлы относятся к селективным излучателям. Если коэффициент  $\varepsilon_{\lambda T}$  реального тела не зависит от  $\lambda$ , такое тело называется серым или неселективным излучателем. Спектр излучения серого тела подобен спектру АЧТ.

## 2. Решение примеров

Пример 2.1. АЧТ нагрето до  $t^\circ = 100^\circ \text{С}$ . Во сколько раз изменится максимальная спектральная плотность излучательности и интегральная плотность излучения при увеличении температуры АЧТ на  $100^\circ$ .

Решение. Исходная абсолютная температура АЧТ  $T = 373 \text{ К}$ . После нагрева на  $100^\circ$  температура АЧТ увеличилась в  $473/373 \approx 1,268$  раз. В соответствии с /2.3/ и /2.9/ значение максимума спектральной плотности излучательности увеличилось в  $1,268^5 = 3,279$  раза, а интегральная излучательность - в  $1,268^4 = 2,586$  раза.

Пример 2.2. Определить интегральный поток излучения и лучистость АЧТ, нагретого до температуры  $T = 2500 \text{ К}$ . Площадь излучающей поверхности  $A = 0,01 \text{ м}^2$ . Считать АЧТ ламбертовым излучателем.

Решение. Поверхностная плотность излучения АЧТ согласно /2.9/  
 $M = C T^4 = 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot 2500^4 = 2,2147 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Поток излучения, испускаемый АЧТ:

$$\tilde{\Phi} = \tilde{M} A = 2,2147 \cdot 10^6 \cdot 10^{-2} = 22147 \text{ Вт.}$$

Лучистость АЧТ

$$L = \frac{1}{\pi} \tilde{M} = 7,05 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Пример 2.3. Нечерное тело, изготовленное из вольфрама, нагрето до температуры  $T = 500 \text{ К}$ . До такой же температуры нагрето АЧТ. Требуется построить спектры излучательности этих тел и установить, насколько не совпадают длины волн, соответствующие максимумам спектральной плотности излучательности. Цвет какого излучателя будет более "синий"?

Решение. Воспользуемся приближенной формулой Рубенса и Хагена [1], используемой для расчета спектрального коэффициента излучения чистых металлов:

$$\varepsilon_\lambda = 0,0221 \sqrt{\frac{\rho_0 T}{\lambda}} \quad /2.14/$$

где  $\rho_0$  - удельное сопротивление металла при  $T = 273 \text{ К}$ ;  $\lambda$  - длина волны, см. Для вольфрама  $\rho_0 = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , поэтому в данном случае имеем /здесь уже  $\lambda$  выражена в микрометрах/

$$\varepsilon_\lambda = 0,1094 \cdot \lambda^{-0,5}$$

Формулы для построения спектров излучательности абсолютно черного и вольфрамового тел, нагретых до  $T = 500 \text{ К}$ , имеют соответственно следующий вид:

$$\tilde{m}_\lambda = \frac{37415}{\lambda^5 (e^{28,7758/\lambda} - 1)} \quad /2.15/$$

и

$$m_\lambda = \frac{4093}{\lambda^{5,5} (e^{28,7758/\lambda} - 1)} \quad /2.16/$$

Программа автоматизированного расчета на микроЭВМ "Электроника МК-54" значений  $m_\lambda$  по /2.16/.

Адрес	Команда	Адрес	Команда
00	F ПРТ	26	F x
01	П	27	F I/X
02	F I/X	28	П 6
03-09	28,7758	29	X
10	X	30	C/П
11	F e^x	31	П I
12	I	32	П 2

Адрес	Команда	Адрес	Команда
13	-	33	+
14	F I/X	34	БП
15-18	4093	35	00
19	X	Инструкция:	
20	П 6		
21-23	5,5	F АВТ, $\lambda_0$ П1, $\Delta\lambda$ П2, В/0, С/П	
24	↑	Регистры:	
25	ИП I	1 $\lambda_0$ и $\lambda_i$	
		2 $\Delta\lambda$	

После выполнения операций по инструкции получаем первое значение  $m_{0,5}$ , если в регистр I введено значение  $\lambda_0 = 0$ .

Последующие последовательные значения  $m_\lambda$  для  $\lambda$  через 0,5 мкм получаются нажатием клавиши С/П.

Программа вычислений по первой формуле отличается тем, что вместо значения 4093 и 5,5 введены значения 37415 и 5. Графики функций /2.15/ и /2.16/ показаны на рис.2.1. Обращает на себя внимание то, что максимум излучения вольфрама смещен в коротковолновую область, поэтому излучение вольфрама содержит большую долю "синего" излучения. Положение максимума излучения АЧТ определяется из закона смещения Вина:

$$\lambda_M = \frac{2897,8}{T} = 5,796 \text{ мкм.}$$

Определение максимума излучения вольфрамового излучателя сводится к нахождению экстремума отношения /2.16/. Эта функция не имеет аналитического решения, поэтому воспользуемся методом последовательного приближения /методом итераций/, реализованным в виде приведенной программы автоматического определения максимума функции на языке микроЭВМ типа "Электроника МК-54" [2].

Адрес	Команда	Адрес	Команда
00	F ПРТ	14	ПО
01	ПО	15	ИП
02	-	16	27
03	П1	17	ИП 2
04	9	18	⇌
05	F 10 <sup>x</sup>	19	П2
06	П2	20	-
07	ИП I	21	F x > 0
08	В	22	06
	:	23	F x = 0

20

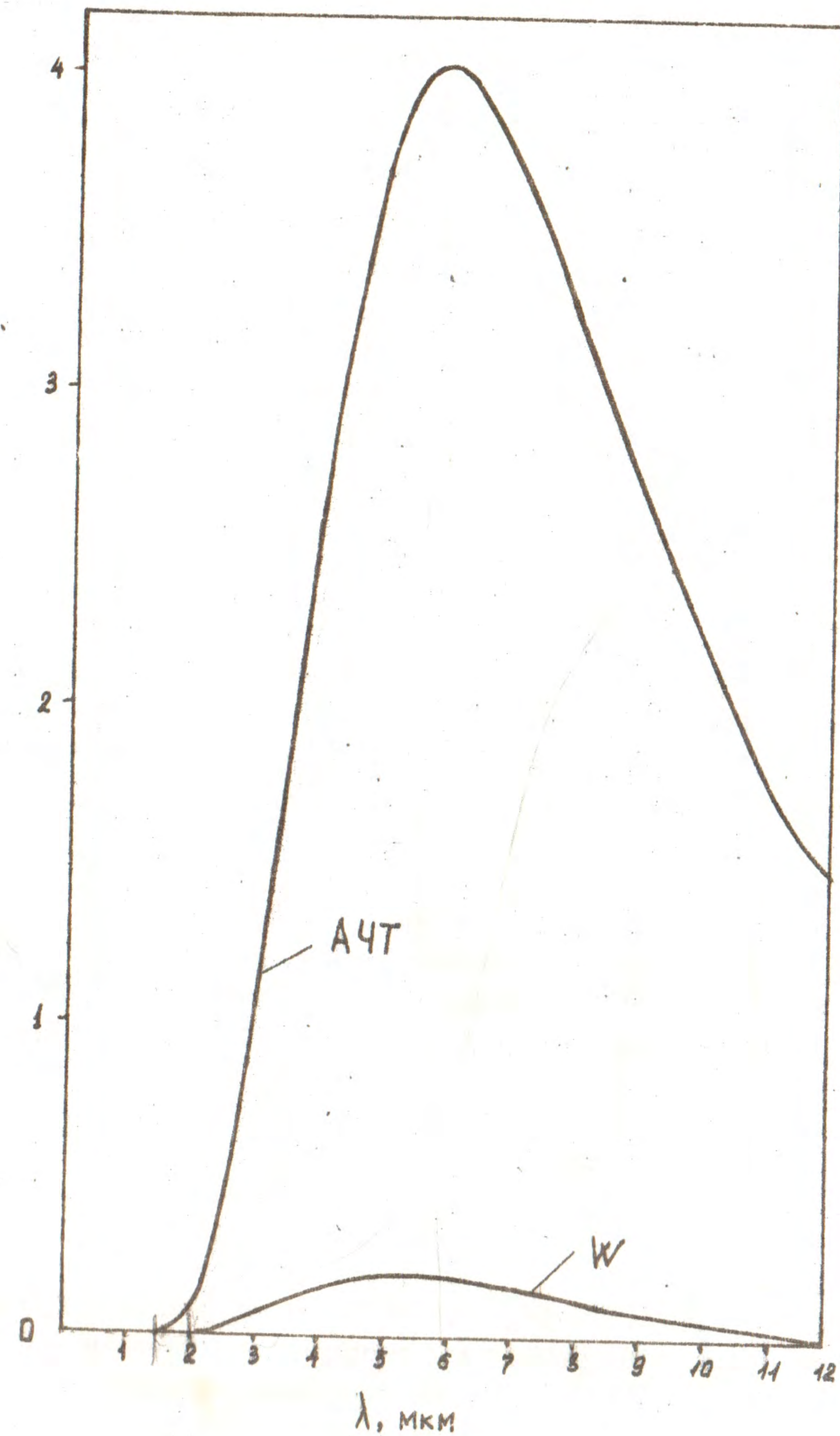


Рис.2.1

6\*

21

209

Адрес	Команда	Адрес	Команда
09	/ - /	24	II
10	III	25	ИП 0
11	ИПО	26	С/П
12	ИП I	27	F I/X
13	-	28-34	28,7758
35	X	50-52	5,5
36	$f e^x$	53	↑
37	I	54	ИПО
38	-	55	$F x^y$
39	F I/X	56	F I/X
40-47	4093,20 I	57	ИПЗ
48	X	58	X
49	ПЗ	59	/ - /
		60	V/O

В программе с 27-го адреса размещена подпрограмма вычисления по формуле /2.16/. Комментарии по первой части программы имеются в /2/. Программа запускается в соответствии со следующей инструкцией: F АВТ,  $\lambda_2$ , ↑,  $\lambda_1$ , V/O, С/П, где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - границы интервала, включающего максимум. Если взять  $\lambda_1 = 4$  мкм, а  $\lambda_2 = 6$  мкм, то в результате вычислений получаем  $\lambda_M \approx 5,255$  мкм. Время вычисления - не менее 10 мин. Сравнивая полученное значение  $\lambda_M$  со значением для АЧТ, находим что максимум излучения вольфрама смещен на 0,541 мкм.

**Пример 2.4.** Определить интегральную излучательность АЧТ, имеющего температуру  $T = 500$  К, в спектральном интервале длин волн от 0 до  $\lambda_M$ . Интегрирование выполнить на микроЭВМ по составной формуле Симпсона /формуле парабол/.

Найти, какую долю это излучение составляет в общем излучении.

**Решение.** Интегральная излучательность АЧТ определяется по формуле

$$\tilde{M}_{12} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tilde{m}(\lambda) d\lambda.$$

Численное интегрирование по методу Симпсона выполним с помощью микроЭВМ "Электроника МК-54". Приведем программу вычисления /2/. До адреса 40 записана общая программа численного интегрирования по составной формуле Симпсона. Остальная часть программы - подпрограмма вычисления  $\tilde{m}_\lambda$  по формуле /2.15/. Исходные данные для расчета следующие:

Адрес	Команда	Адрес	Команда
00	ПО	30	+
01	III	31	ПС
02	40	32	К ИП 0
03	ПС	33	ИП 0
04	ИП В	34	$F x \neq 0$
05	ИП А	35	22
06	ПВ	36	ИП В
07	-	37	ИП А
08	ИП 0	38	+
09	:	39	ПВ
10	ПА	40	ИП В
11	III	41	F I/X
12	40	42-48	28,7758
13	I	49	X
14	III	50	$f e^x$
15	28	51	I
16	4	52	-
17	III	53	F I/X
18	28	54-58	37415
19	2	59	X
20	БП	60	П6
21	14	61	5
22	ИП С	62	↑
23	3	63	ИП В
24	:	64	$F x^y$
25	ИП А	65	F I/X
26	X	66	ИП 6
27	С/П	67	X
28	X	68	V/O
29	ИПС		

Здесь  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  - соответственно нижний и верхний предел интегрирования;  $n$  - число разбиений интервала длин волн от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ .

Инструкция, приводящая программу в действие: F АВТ,  $\lambda_1$ , ПА,  $\lambda_2$ , ПВ,  $n$ , V/O, С/П.

В данном случае принято  $\lambda_2 = \lambda_M = 5,796$  мкм,  $\lambda_1 = 0,5$  мкм и  $n = 4$ . Вместо  $\lambda_1 = 0$  использовано значение  $\lambda_1 = 0,5$  мкм, чтобы исключить появление числа меньшего  $1 \cdot 10^{-99}$  и высвечивания сигнала ошибки ERROR.

В результате расчета получаем

$$\tilde{M}_{12} = 8,902 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Время счета около 50 с. Полное излучение нагретого АЧТ определяем по формуле /2.9/

$$\tilde{M} = 5,6697 \cdot 10^{-12} \cdot 500^4 = 3,544 \cdot 10^{-1} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Окончательно доля излучения, заключенная в коротковолновой от максимума излучения области спектра:

$$\tilde{M}_{12} = \tilde{M}_{12} / \tilde{M} \approx 0,25.$$

Таким образом, 3/4 энергии переносится излучением с длиной волны  $\lambda > \lambda_M$ .

### 3. Задание для самостоятельной работы

**Задача 2.1.** Серое тело, имеющее  $\epsilon = 0,4$ , нагрето до температуры  $T, K$ . Площадь излучающей поверхности  $A = 2 \text{ м}^2$ , а удаление от входного зрачка приемной оптической системы  $r = 5 \text{ км}$ .

Требуется:

а/ построить спектры облученности входного зрачка, создаваемой серым телом и АЧТ, нагретым до температуры  $T, K$  и  $T + 150/ K$ ;

б/ определить  $e_{\lambda M}$ ,  $\lambda_M$  и  $E$ ;

в/ для АЧТ, имеющего температуру  $T, K$ , построить спектры, получаемые по приближенным формулам Вина и Рэлея - Джинса, оценив при этом ошибку вычисления и границы применимости указанной формулы.

Контрольный расчет при  $T = 1500 \text{ K}$ .

АЧТ имеет  $\tilde{M}_{\lambda} = 5,5818 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$  и  $\tilde{e}_{\lambda} = 1,4214 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$  при  $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ .

Серое тело имеет при тех же условиях  $e_{\lambda} = 5,6857 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$ ,

$$e_{\lambda M} = 9,95 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1},$$

$$\lambda_M = 1,9319 \text{ мкм}, \quad E = 2,924 \cdot 10^{-7} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}.$$

**Задача 2.2.** Используя составную формулу Симпсона и формулу Гольдгаммера - Гершуна, вычислить полный световой поток, испускаемый АЧТ. Температура АЧТ -  $T, K$ , площадь -  $0,5 \text{ м}^2$ .

Контрольный расчет. При  $T = 1500 \text{ K}$  преобразованное подынтегральное выражение

$$\int_{\lambda} \tilde{M}_{\lambda} = \frac{9,6326 \cdot 10^{36}}{e^{\frac{100,937}{\lambda}} \lambda^{187,1905} (e^{\frac{9,5919}{\lambda}} - 1)}$$

является исходным для составления подпрограммы, помещаемой в ранее

приведенную программу для численного интегрирования с адреса 40. Особое внимание следует обратить на выбор нижнего предела интегрирования, так как при малом его значении может получиться столь малое значение подынтегральной функции, что на табло высветится сигнал *ERROR*. В данном случае взято:  $\lambda_1 = 0,44$ ,  $\lambda_2 = 0,75$  и  $n = 4$ . Ответ:

$\Phi_c = 10490,085 \text{ лм}$  /значение интеграла -  $3,0717672 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ /. Время счета около 125 с.

**Задача 2.3.** Построить график спектра светового потока, испускаемого АЧТ при начальных условиях, приведенных в задаче 2.2. С помощью микроЭВМ определить положение максимума функции  $\Phi_{\lambda} = \Phi(\lambda)$ . Привести на этом же графике кривые  $V_{\lambda} = V(\lambda)$  и  $\Phi_{\lambda} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{мкм}} \right] = \Phi(\lambda)$ .

Контрольный расчет. При  $T = 1500 \text{ K}$ ,  $\lambda_1 = 0,58 \text{ мкм}$  и  $\lambda_2 = 0,6 \text{ мкм}$  получаем  $\lambda_M = 0,59044 \text{ мкм}$ . Время счета около 10 мин.

Варианты значений  $T, K$  для задач 2.1-2.3 приведены далее:

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T, K	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

#### ТЕПЛОВЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Цель занятия - приобрести навыки расчета параметров излучения тепловых излучателей, наиболее часто встречающихся в практике оптического приборостроения.

Основные задачи:

1/ изучить основы методики и особенности расчета параметров излучения, испускаемого искусственными и естественными источниками теплового излучения;

2/ углубить знания о характере теплового излучения веществ, находящихся в различном агрегатном состоянии.

## 1. Общие положения

Любое вещество в газообразном, жидком или твердом состоянии, имеющее температуру выше абсолютного нуля, является температурным излучателем.

Излучательная способность реальных тел в отличие от АЧТ зависит от различных факторов, в том числе от химического состава, состояния поверхности, направления излучения, температуры и т.д. Общих закономерностей, справедливых для любых реальных тел в различных агрегатных состояниях, не существует. Однако можно сделать некоторые обобщения для отдельных групп тел: металлов с неокисленной поверхностью, диэлектриков и окислов на поверхности металлов, а также газов.

Во всех случаях в основе расчета излучательной способности нагретых тел лежат законы Кирхгофа /2.12/ и /2.13/.

Интегральный коэффициент излучения, как это следует из /2.12/ и /2.13/, может быть найден из следующего соотношения:

$$M = \int_0^{\infty} \epsilon_{\tau}(\lambda) \tilde{m}(\lambda) d\lambda = \epsilon_{\tau} \sigma T^4 \quad /3.1/$$

Если температура тела окружающей среды  $T_2$  больше абсолютного нуля, для излучателя с температурой  $T_1$  имеем

$$M = \epsilon_{\tau}' \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad /3.2/$$

где  $\epsilon_{\tau}'$  - среднее арифметическое значение  $\epsilon_{\tau}$  для температур  $T_1$  и  $T_2$ .

В связи с тем, что в общем случае  $\epsilon_{\lambda} = \epsilon(\lambda)$ , реальные излучатели являются селективными. Явная селективность излучения присуща неокисленным металлам и газам. Среди диэлектриков встречаются тела, именуемые серыми, коэффициент излучения которых постоянен в широком диапазоне длин волн, т.е.  $\epsilon_{\lambda} = \epsilon_{\tau} = const$ . Нагретая поверхность неокисленных металлов в инфракрасной области характеризуется уменьшением  $\epsilon_{\lambda}$  с увеличением  $\lambda$ , что уже отмечалось в предыдущем практическом занятии [см. соотношение /2.14/]. Интегральный коэффициент излучения таких металлов в направлении нормали может быть вычислен по одной из приведенных приближенных формул [3]:

$$\epsilon_{\tau} = 0,574 T \sqrt{\rho_{\tau}};$$

$$\epsilon_{\tau} = 1 - e^{-\beta T},$$

где  $\rho_{\tau}$  - удельное сопротивление металла при температуре  $T$ ;  $\beta$  - постоянная, зависящая от рода металла. Для вольфрама  $\beta = 1,47 \cdot 10^{-4}$ .

При температуре 1500 К и  $\rho_{\tau} = 40,36 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  вычисление по первой формуле приводит к значению  $\epsilon_{\tau} = 0,14$ , а по второй -  $\epsilon_{\tau} = 0,20$ , что более близко к экспериментальным значениям  $\epsilon_{\tau}$ .

Непрозрачные диэлектрики характеризуются увеличением  $\epsilon_{\lambda}$  с увеличением длины волны, при этом значения  $\epsilon_{\lambda}$  для ИК-области мало отличаются от 1,0. Как правило, белые окислы имеют низкий спектральный коэффициент излучения в видимой области, но в ИК-области его значения близки к 1. Цветные окислы обладают высоким спектральным коэффициентом излучения как в видимой, так и в ИК-областях.

Интегральный коэффициент излучения диэлектриков в отличие от металлов при увеличении температуры уменьшается, что объясняется увеличением доли коротковолновых слагаемых  $\epsilon_{\lambda}$  в полном коэффициенте излучения.

Интегральный коэффициент излучения окисленной поверхности металла зависит от химического состава окислов, их структуры, шероховатости поверхности. Так как металлические окислы преимущественно непрозрачны для ИК-излучения, то окисленные металлические поверхности излучают аналогично цветным диэлектрикам. Постепенный нагрев металла увеличивает толщину оксидной пленки и, следовательно, коэффициент  $\epsilon_{\tau}$ .

Существенной селективностью излучения характеризуются нагретые газы. Спектр их излучения в сильной степени зависит от состава, давления и температуры газа. При низком давлении в спектре излучения преимущественно в ИК-области наблюдаются колебательно-вращательные линии, обусловленные правилами квантования молекул газа. По мере увеличения давления линии спектра расширяются в полосы, при этом в соответствии с законом Кирхгофа полосы поглощения являются одновременно и полосами излучения. Наиболее интенсивные полосы излучения /поглощения/ в ИК-области образуют пары  $\text{H}_2\text{O}$  и газы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{O}_3$ . Данные по полосам поглощения отдельных газов и паров приведены, например в /4/. В отличие от нагретых чистых газов в пламени имеются малые твердые частицы - продукты сгорания. Будучи нагретыми до высокой температуры, они создают излучение со сплошным спектром в том числе и в видимой области. В результате спектр излучения пламени состоит из сплошного температурного спектра твердых частиц /чаще всего сажи/ и полосового спектра чистого нагретого газа или пара.

Все температурные излучатели можно условно разделить на естественные и искусственные. К естественным излучателям относятся: Солнце, Луна, звезды, планеты, небо, облака, полярное сияние, поверхность суши, воды и т.д. Среди искусственных температурных излучателей следует различать источники излучения, специально предназначенные для создания

потока излучения /АЧТ и световые эталоны, лампы накаливания, глобар, штифт Нернста, нагреватели, пламенные горелки и т.д./, а также созданные человеком объекты, не имеющие такого целевого назначения, естественный нагрев которых обусловлен условиями их эксплуатации /здания, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели, объекты военной техники и т.д./.

Возможна также классификация искусственных источников излучения по роду питающей их энергии. В соответствии с указанным признаком излучатели делятся на электрические и газовые. Причем электрические в свою очередь делятся на беспроводные /дуговые/ и проводниковые /с открытым телом накала и телом накала в стеклянной, керамической или металлической оболочке/, а газовые - на пламенные и беспламенные излучатели.

В общем случае расчет параметров излучения реального температурного источника требует учета многих факторов /температуры, спектрального коэффициента излучения, материала, агрегатного состояния, формы, состояния поверхности и т.д./.

На практике легко удается произвести лишь весьма приближенные расчеты, учитывающие коэффициент излучения и в редких случаях форму излучающего тела.

## 2. РЕШЕНИЕ ПРИМЕРОВ

**Пример 3.1.** Луч излучения был испущен стенкой клиновидной модели АЧТ в перпендикулярном к ней направлении /рис.3.1/. Считая стенки полости зеркальными с коэффициентом отражения  $\rho = 0,5$ , определить, после какого числа отражений  $K$  от стенок полости интегральный коэффициент излучения  $\epsilon_r'$  этой модели АЧТ будет больше  $\epsilon_r = 0,998$  и луч покинет полость параллельно одной из стенок. Какой при этом будет угол  $\alpha$  при вершине клина?

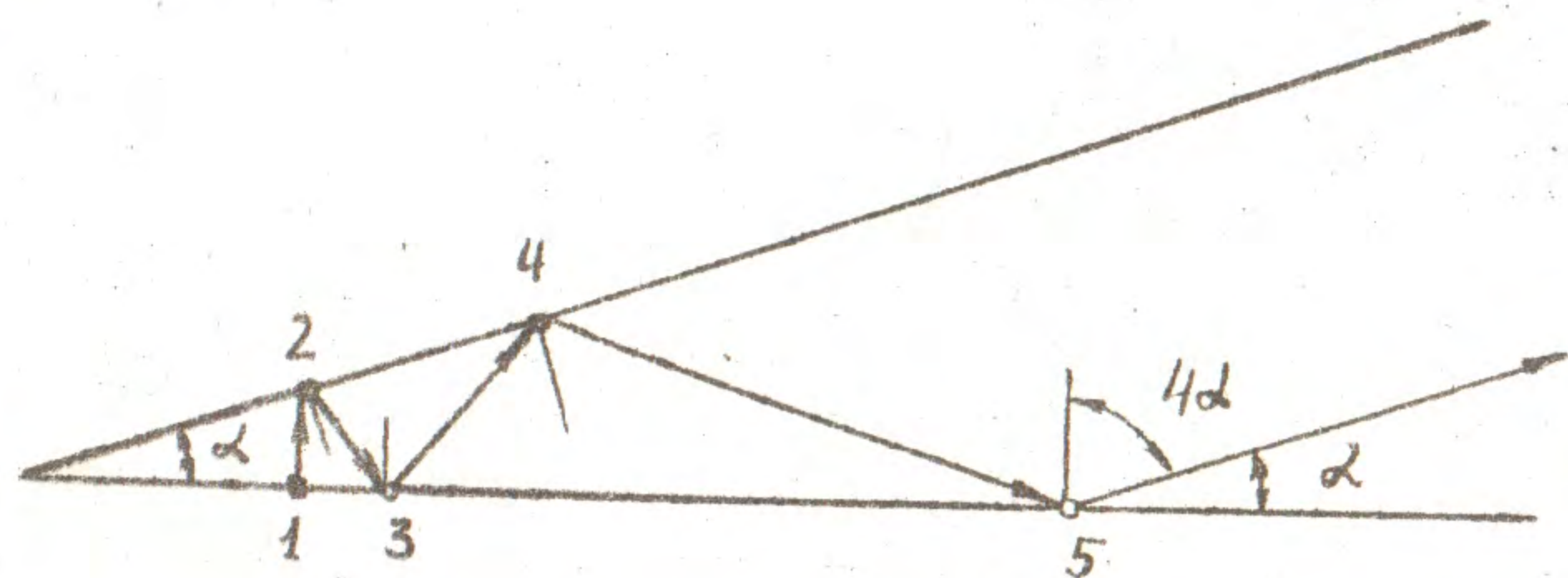


Рис.3.1

**Решение.** Если сила излучения точки 1 в перпендикулярном направлении равна  $I$ , то после отражения от точки 2 она будет

$$I_2 = I + \rho I,$$

а после отражения от точки 3

$$I_3 = I + \rho I + \rho^2 I.$$

Очевидно, после  $K$ -го отражения сила излучения составит

$$I_K = I (1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^{K-1}).$$

В скобках имеем сумму  $K$  членов геометрической прогрессии, поэтому

$$I_K = I \frac{1 - \rho^K}{1 - \rho}.$$

Если бы число отражений было бесконечно, то

$$I_\infty = I \frac{1}{1 - \rho}$$

и клиновидная полость была бы идеальным АЧТ.

Из закона Кирхгофа коэффициент излучения модели АЧТ

$$\epsilon_r' = \frac{I_K}{I_\infty} = 1 - \rho^K.$$

Учитывая условие задачи, записываем неравенство

$$\rho^K < \Delta \epsilon_r,$$

где  $\Delta \epsilon_r = 1 - \epsilon_r$ . Приведенное соотношение позволяет определить  $K$ .

Программа для решения этой задачи имеет вид

ИП1 I + П1 ↑ ИП2 Fx# ИП3 Fx<0 00 ИП1 С/П

Используя исходные данные задачи и инструкцию:

ОП1 ρ П2 Δε<sub>r</sub> ПЗ В/0 С/П /в нашем случае ρ = 0,5, а Δε<sub>r</sub> = 0,002/, получаем K = 9.

Определим теперь угол  $\alpha$ . Из геометрии рис.3.1 вытекает, что угол отражения равен  $K\alpha$ . Очевидно, чтобы вышедший луч был параллелен одной из стенок полости при  $K$ -м отражении, необходимо выполнение условия

$$K\alpha = \pi - \alpha.$$

В результате при  $K = 9$  получаем  $\alpha = \pi/10$ . Таким образом, модель АЧТ в виде клина с углом при вершине  $9^\circ$  и коэффициенте отражения 0,5 обеспечивает  $\epsilon_r' > 0,998$ .

**Примечание.** Введение операторов КИП ИП4 вместо первых четырех в приведенной программе иллюстрирует дополнительный прием программирования, сокращающий число операторов.

**Пример 3.2.** Определить облученность Земли, создаваемую Луной ночью

в полнолуние, если альbedo Луны, полагаемой ламбертовым излучателем, равно 0,07, расстояние до Земли  $4 \cdot 10^5$  км и облученность Луны Солнцем  $0,14 \text{ Вт/см}^2$ .

**Решение.** Излучательность Луны как диффузно рассеивающей поверхности

$$M = \rho E.$$

Ее лучистость одинакова по всем направлениям и определяется соотношением

$$L = \frac{M}{\pi} = \frac{\rho}{\pi} E.$$

Сила излучения видимой поверхности Луны, являющейся при полнолунии диском,

$$I = LA = L \frac{\pi D^2}{4},$$

где  $D$  - диаметр Луны,  $D = 3,5 \cdot 10^3$  км.

Используя закон квадратов расстояния, находим облученность Земли:

$$E_3 = \frac{I}{r^2} = \frac{\rho D^2 E}{4 r^2}.$$

После вычислений получаем

$$E_3 = \frac{0,07 / 3,5 \cdot 10^3 / 2 \cdot 1,4 \cdot 10^3}{4 / 4 \cdot 10^8 / 2} = 1,88 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

**Пример 3.3.** Глобар нагрет до температуры 1400 К. Используя известные из эксперимента значения  $\epsilon_\lambda$  для глобара [5], вычислениями по формуле Кирхгофа:  $m_\lambda = \epsilon_\lambda \tilde{m}_\lambda$ , найдены значения  $m_\lambda$ , которые представлены в таблице. Найти интегральный коэффициент излучения глобара, полагая, что излучение с  $\lambda > 14$  мкм пренебрежимо мало.

$\lambda$ , мкм	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
$\tilde{m}_\lambda$ , Вт/см <sup>2</sup> ·мкм	$9,4 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-1}$	2,20	3,53	4,4	4,865	4,86	4,62
$\lambda$ , мкм	2,75	3,0	3,25	3,5	3,75	4,0	4,25	4,5	4,75
$\tilde{m}_\lambda$ , Вт/см <sup>2</sup> ·мкм	4,26	3,9	3,48	3,09	2,69	2,43	2,13	1,89	1,7
$\lambda$ , мкм	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
$\tilde{m}_\lambda$ , Вт/см <sup>2</sup> ·мкм	0,24	0,19	0,15	0,12	0,097	0,077	0,07	0,063	0,056

$\lambda$ , мкм	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
$\tilde{m}_\lambda$ , Вт/см <sup>2</sup> ·мкм	1,5	1,17	0,92	0,73	0,58	0,47	0,38	0,31	0,26

$\lambda$ , мкм	9,5	10	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0
$\tilde{m}_\lambda$ , Вт/см <sup>2</sup> ·мкм	0,24	0,19	0,15	0,12	0,097	0,077	0,07	0,063	0,056	0,05

**Решение.** Воспользуемся программой для интегрирования таблично заданных функций методом Симпсона [2].

ПО С/П П9 С/П КИПО  $\Leftarrow$  4 x ИП9 + П9 С/П ↑  
ИП9 + + FLO 02 FВх ИП8 x 3 : С/П БП 00

Инструкция: шаг интегрирования  $\Delta \lambda$  П8, число интервалов  $n$ , В/О С/П и далее  $m_{\lambda_1}$  С/П,  $m_{\lambda_2}$  С/П,  $m_{\lambda_3}$  С/П и т.д. Следует при этом помнить, что данная программа справедлива только при четном  $n$ .

Излучательность глобара определяется по формуле

$$M_T = \sum_{i=1}^{18} m_{i,\lambda,T} \cdot 0,25 + \sum_{i=1}^{18} m_{i,\lambda,T} \cdot 0,5,$$

где  $m_{i,\lambda,T}$  - табличные значения спектральной излучательности глобара, а представление формулы двумя интегралами обусловлено различием шага  $\Delta \lambda$  задания функции  $m_T(\lambda)$  внутри выбранных спектральных диапазонов. Интегрирование на участке  $\lambda$  от 0,5 до 5,0 мкм с шагом 0,25 мкм при  $n = 18$  дает  $M_1 = 12,946$ . Интегрирование же на участке  $\lambda$  от 5,0 до 14,0 мкм при том же  $n$  с шагом 0,5 мкм дает  $M_2 = 3,317$ . Таким образом интегральная излучательность глобара в диапазоне  $\lambda \in [0,5; 14,0]$

$$M_T = M_1 + M_2 = 16,263 \text{ Вт/см}^2.$$

При той же температуре излучательность АЧТ составляет

$$\tilde{M}_T = \sigma T^4 = 5,673 \cdot 10^{-12} \cdot 1400^4 = 21,793.$$

Таким образом, интегральный коэффициент излучения глобара при  $T = 1400 \text{ К}$

$$\epsilon_T = M_T / \tilde{M}_T = 0,75.$$

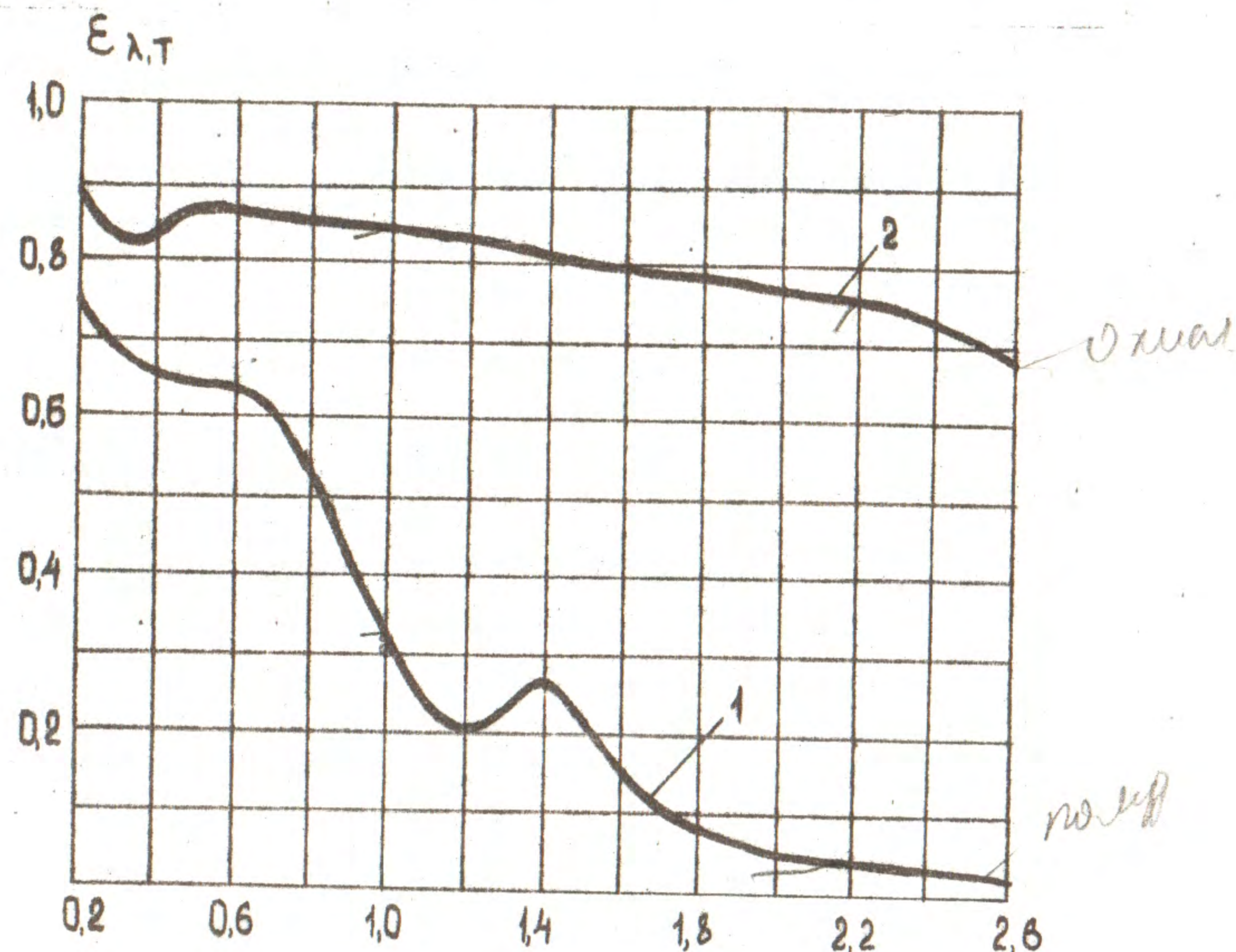


### 3. Задание для самостоятельной работы

**Задача 3.1.** Решить пример 3.2, учитывая дополнительно собственное излучение нагретой до  $T = 400$  К облучаемой Солнцем поверхности Луны. Считать поверхность Луны серым телом.

Ответ:  $E_3 = 1,0529 \cdot 10^{-3}$  Вт $\cdot$ м $^{-2}$ .

**Задача 3.2.** Используя программу для интегрирования таблично заданных функций, определить интегральную излучательность полированной и окисленной поверхностей чистого тантала при температуре 1400 К в спектральном диапазоне от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ . Функция  $\epsilon_\lambda = \epsilon(\lambda)$  показана на рис.3.2 кривыми 1 /полированная поверхность/ и 2 /окисленная поверхность/.



λ, мкм  
Рис.3.2

Показатель	Номер варианта													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
$\lambda_1$ , мкм	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8		
$\lambda_2$ , мкм	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	1,4	1,6	1,8	2,0		
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	0,4	0,4	0,4	1,2
	2,2	2,4	2,6	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	1,0	1,2	1,4	1,6	1,6

Контрольный расчет для варианта № 26. Составляем следующую таблицу для  $n = 4$ .

$\lambda$ , мкм	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$m_{\lambda T}$					
Вт/см $^2$ ·мкм/	2,88	3,73	4,53	5,24	5,82
$\epsilon_\lambda$	0,2	0,23	0,27	0,22	0,145
$m_{\lambda T}$					
Вт/см $^2$ ·мкм/	0,576	0,858	1,223	1,153	0,844

Интегрирование дает значение  $M_{1,2} = 0,397$  Вт $\cdot$ см $^{-2}$ .

**Задача 3.3.** Вакуумная лампа накаливания ОП4-4 имеет следующие технические данные: напряжение питания - 4 В, световой поток - 40 лм, срок службы - 100 ч, диаметр стеклянной колбы - 18 мм, температура спирали - 2800 К, температура колбы - 330 К. Колба - серое тело с  $\epsilon_r = 0,85$ , спектральный коэффициент пропускания которой

$$\tau_\lambda = \begin{cases} 1, & \text{при } 0,35 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 2,5 \text{ мкм;} \\ 0, & \text{при прочих } \lambda. \end{cases}$$

Определить поток излучения: а/ испускаемый спиралью, б/ испускаемый лампой; считая, что колба имеет сферическую форму, и пренебрегая потерями на цоколе. При расчете по формуле Стефана - Больцмана считать вольфрам серым телом с  $\epsilon_\lambda = \epsilon_r = 0,25$ . Чему равны световой поток и срок службы лампы при уменьшении напряжения питания на 0,4 В?

Рекомендации. Пользуясь /2.14/, а также формулами Планка и Гольд-

гаммера - Гершуна, определить светимость вольфрама. Интегрирование вести методом прямоугольников. Вычислив затем интегральную излучательность вольфрама, с помощью пропорциональных соотношений найти поток излучения спирали. Полный поток излучения лампы складывается из потока, прошедшего через колбу, и потока, испускаемого колбой.

Методика определения технических данных лампы при отличном от номинального напряжения питания приведена, например в [1, с.207].

Ответы: светимость спирали -  $1779,28 \text{ лм} \cdot \text{см}^2$ , интегральная излучательность спирали -  $87,2 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ , поток излучения спирали -  $1,96 \text{ Вт}$ , интегральная излучательность спирали с учетом пропускания колбы и прошедший поток излучения -  $66,19 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  и  $1,49 \text{ Вт}$ , полный поток излучения лампы -  $1,66 \text{ Вт}$ , световой поток -  $27,4 \text{ лм}$ ; срок службы -  $394,4 \text{ ч}$ .

### 3. Задание для самостоятельной работы

Задача 4.1. По аналогии с примером 4.3 выполнить необходимые вычисления для СИД, указанных в таблице. Необходимые данные по СИД приведены в [10].

Вариант	1	2	3	4	5	6
СИД	красн. ЗЛ102Д	красн. ЗЛ341А	зелен. ЗЛ341В	желт. ЗЛ341Д	красн. АЛ112А	красн. АЛ307А
7	8	9	10	11	12	
красн. АЛ307АМ	зелен. АЛ307В	желт. АЛ307Д	красн. АЛ316А	ИК, T = -60 °C АЛ106В	ИК, T = 25 °C АЛ106Д	
13	14	15	16	17	18	
ИК, T = 85 °C АЛ106Г	ИК, T = -60 °C АЛ107А	ИК, T = -60 °C АЛ107Б	ИК, T = 25 °C АЛ107А	ИК, T = 25 °C АЛ107Б	ИК, T = 80 °C АЛ107А	
19	20	21	22	23	24	25
ИК, T = 80 °C АЛ107Б	ИК, T = -60 °C АЛ118А	ИК, T = 25 °C АЛ118А	ИК, T = 85 °C АЛ118А	красн. АЛ310А	красн. АЛ310Б	ИК АЛ108А

Спектры излучений АЛ307А и АЛ316А аналогичны спектрам излучений ЗЛ341А и АЛ112А. Диаграммы направленности АЛ310 как у АЛ307, АЛ341 как у АЛ102 и, наконец, АЛ108 как у АЛ118.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

### ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Цель занятия - приобрести навыки расчета фотометрических величин в случаях использования в качестве излучателей люминофоров, газоразрядных ламп и полупроводниковых светодиодов.

Основные задачи:

- 1/ изучить законы люминесцентного излучения;
- 2/ рассчитать неизвестные фотометрические величины газоразрядных ламп по известным и паспортным данным;
- 3/ вычислить поток излучения светодиодов с учетом заданной диаграммы направленности.

### I. Общие положения

Люминесценцией называется излучение, избыточное над тепловым, при длительности его, равной или большей  $10^{-10} \text{ с}$ .

В отличие от отраженного, рассеянного или пропущенного веществом излучения, люминесцентное излучение появляется с запаздыванием по отношению к моменту начала возбуждения. Особенность люминесцентного излучения - селективность, зависящая от свойств вещества и условий возбуждения. В люминесцентных источниках излучения наиболее распространены электролюминесценция, катодолюминесценция и фотолюминесценция, возбуждаемые соответственно электрическим полем, пучком электронов и оптическим излучением. По длительности люминесценции различают флуоресценцию /короткое свечение/ и фосфоресценцию /длительное свечение/.

Наиболее рациональная классификация явлений люминесценций основана на характеристиках механизма элементарных процессов, в соответствии с которой различают резонансную, спонтанную, вынужденную и рекомбинационную люминесценцию.

Резонансная люминесценция наблюдается в атомных газах и парах металлов, у некоторых простых молекул, и иногда в более сложных систе-

мах. При такой люминесценции уровни переходов при возбуждении и излучении совпадают, а люминесцентное излучение имеет спонтанный характер.

Спонтанная люминесценция включает в себя чаще всего предварительный безызлучательный переход на нижний уровень, последующий переход с которого затем сопровождается излучением. Характерна для сложных молекул в парах и растворах и для примесных центров в твердых телах.

Вынужденная люминесценция наблюдается в системах с метастабильным уровнем, переход с которого в основное состояние или невозможен, или мало вероятен до тех пор, пока какая-либо внешняя причина не переведет молекулу в более возбужденное состояние, предоставив затем ей возможность вернуться в основное состояние.

Рекомбинационная люминесценция происходит при воссоединении частиц, разделенных при поглощении энергии. В газах рекомбинируют радикалы или ионы с образованием возбужденной молекулы или атома. В твердых кристаллических телах /полупроводниках/ люминесценция происходит при рекомбинации электронов и дырок. Кристаллы, люминесцирующие в видимой или ультрафиолетовой области, называются люминофорами или кристаллофосфорами.

Спектр люминесценции зависит от вещества, его агрегатного состояния, условий возбуждения, температуры, давления и многих других причин.

Люминесценция газов может быть обусловлена возбуждением атомов, молекул, а также комплексов атомов и молекул.

Одноатомный газ при низком давлении, когда влиянием соседних удаленных атомов можно пренебречь, испускает в результате возбуждения излучение, спектр которого линейчатый. Изменение энергетического состояния атома при его возбуждении объясняется переходом одного из внешних электронов на более высокий уровень или отрывом электрона с образованием положительно заряженного иона /ионизация/. Каждому газу присущ свой индивидуальный спектр люминесценции. Излучение молекулами газа - результат изменения энергии одного из трех возможных видов ее движения: вращения молекулы, колебания ядер, движения электронов. Ввиду того, что изменение энергетического состояния, отвечающего каждому из видов движения молекулы, имеет квантовый характер, спектр люминесценции изолированной молекулы состоит из отдельных линий и полос. Ротационный спектр в виде полос располагается в далекой ИК-области. Вибрационный и электронный спектры охватывают УФ, видимую и ближнюю ИК-области. Повышение давления газа приводит к наложению на линейчатый спектр отдельных полос или сплошного фона. Спектр возбужденного молекулярного газа становится особенно сложным, если дополнительно

подключается механизм рекомбинации свободных электронов и положительных ионов.

Люминесценция конденсированных сред /жидких или твердых/ характеризуется тем, что наличие взаимной связи между атомами или молекулами порождает полосовой или сплошной спектр. Расположение полос определяется химическим составом, концентрацией примесей и характером возбуждения. В большинстве случаев фотолюминесценции выполняется правило Стокса, в соответствии с которым длина волны возбуждающего излучения меньше люминесцентного. Имеются однако люминофоры, для которых правило Стокса не выполняется. Среди люминесцентных излучателей наиболее распространены газосветные и фотолюминесцентные лампы, а также люминесцентные диоды и конденсаторы.

Основным средством возбуждения газосветных ламп является газовый разряд. Спектр газосветных ламп зависит от природы газа или пара, его состояния, вида разряда /тлеющий, дуговой, искровой/ и от расположения участка излучения относительно электродов. При низких давлениях и плотностях тока спектр состоит исключительно из резонансных линий. Повышение плотности тока порождает высшие и побочные серии. Линии расширяются с повышением давления и появляются участки сплошного спектра. В качестве газов и паров металлов широко используются натрий, ртуть, неон, гелий, аргон, криптон, ксенон, углекислый газ. Для каждого газа поток излучения зависит от плотности возбужденных частиц в единице объема и от толщины излучающего слоя в направлении испускания. Лучистость газосветной лампы находится из соотношения

$$L = \frac{E_1}{\omega}, \quad /4.1/$$

где  $E_1$  - облученность в точке  $A$  плоскости, пересекаемой нормалью к элементу поверхности излучающего объема газа;  $\omega$  - телесный угол с вершиной в точке  $A$ , охватывающий названный элемент.

Приблизительно сила излучения цилиндрических газосветных ламп в направлении нормали к поверхности трубки

$$I_1 = D h L, \quad /4.2/$$

где  $D$  и  $h$  - внутренние диаметр и длина излучающего объема.

При сферическом объеме излучения

$$I_1 = \pi R^2 L, \quad /4.3/$$

где  $R$  - радиус излучающей сферы.

Завод-изготовитель газосветных ламп приводит, как правило, спектр излучения в относительных величинах и световой поток. Для практических целей необходимо также знать абсолютный спектр потока излучения, что требует вычисления максимального значения спектральной плотности потока излучения, Вт/мкм:

$$\varphi_M = \frac{\Phi_c}{683 \int_{44}^{75} V(\lambda) \dot{\varphi}(\lambda) d\lambda} \quad /4.4/$$

При линейчатом спектре

$$\varphi_M = \frac{\Phi_c}{683 \sum_{i=1}^n \Phi_{c \lambda i}} \quad /4.5/$$

В люминесцентных лампах /лампах дневного света/ используется явление фотолюминесценции в люминофоре, нанесенном на внутреннюю поверхность трубки, при возбуждении его УФ-излучением. В свою очередь УФ-излучение - следствие газового разряда в парах ртути, находящихся в трубке в смеси с аргоном под малым давлением. В качестве люминофоров используют обычно галофосфат калиция, активированный *Mn* и *Sb*. Меняя концентрацию активаторов, удается изменять спектральный состав излучения в широких пределах.

Преимущество люминесцентных ламп - высокая световая отдача и хорошая цветопередача. Световой поток составляет несколько тысяч люмен, а срок службы - около 15 тыс.ч. Экспериментально установлено [11], что сила света в направлении перпендикулярном к оси трубки связана со световым потоком простым соотношением:

$$\Phi \approx 9,25 I_1, \quad /4.6/$$

а средняя яркость, кд·м<sup>-2</sup>:

$$L = \frac{\Phi_c \cdot 10^4}{\kappa \cdot 9,25 D h}, \quad /4.7/$$

где  $\kappa$  - коэффициент, учитывающий неравномерное распределение яркости по длине лампы / $0,87 \leq \kappa \leq 0,92$ /.  
Световой поток

$$\Phi_c = \eta P, \quad /4.8/$$

где  $\eta$  - световая отдача лампы, лм·Вт<sup>-1</sup>;  $P$  - мощность лампы.

Катодолуминесцентные излучатели - электронно-лучевые трубки, используемые для отображения информации. Слой люминофора на экране преобразует кинетическую энергию электронов луча в энергию излучения в видимом диапазоне длин волн. Сила света возбужденного слоя люминофора в перпендикулярном направлении оценивается соотношением

$$I_1 = \eta P_2, \quad /4.9/$$

где  $\eta$  - световая отдача экрана, кд·Вт<sup>-1</sup>;  $P_2$  - мощность электронного пучка, Вт.

Световая отдача современных экранов достигает 15 кд·Вт<sup>-1</sup>.

Для определения яркости экрана используют следующую упрощенную формулу [6]:

$$L \approx A J U^n, \quad /4.10/$$

где  $A$  - коэффициент, зависящий от выбранного люминофора;  $J$  - плотность тока луча;  $U$  - ускоряющее напряжение трубки;  $n$  - показатель степени, определяемый экспериментально / $n = 1+3$ /.  
Спектр излучения экрана полосовой, зависящий от материала люминофора. Ширина полосы составляет несколько десятых долей микрометра. В качестве люминофоров обычно используют сульфиды цинка и кадмия, силикаты цинка и магния, окислы и окисульфиды редкоземельных элементов. Положение центра полосы люминесценции зависит от типа люминофора и активатора. Варьируя ими и их концентрациями, добиваются как изменения цвета свечения, так и времени затухания люминофора.

В настоящее время разработаны люминофоры с максимумом излучения в любой части видимого спектра. Как правило, фотометрические расчеты, связанные с экраном электронно-лучевых трубок, требуют определения освещенности изображения экрана, создаваемого проецирующей оптической системой:

$$E = \tau L \sin^2 \alpha', \quad /4.11/$$

где  $\tau$  - коэффициент светопропускания оптической системы;  $\alpha'$  - задний апертурный угол.

Электролюминесцентные конденсаторы /ЭЛК/, используемые как индикаторы, излучают под действием электрического поля, близкого к пробивному. Они используются для отображения символьной информации. Различают порошковые, пленочные и органические ЭЛК [7]. Светоизлучающий слой в порошковых ЭЛК - смесь с диэлектрической связкой порошкового люминофора *ZnS*, активированного *Pb*, *Mn*, *Cu*. При переменном напряжении

50 В и частоте 10 кГц начальная яркость таких конденсаторов составляет около  $100 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , а срок службы — свыше нескольких тысяч часов. В последнее время появились порошковые ЭЛК постоянного тока, мало чем уступающие ЭЛК переменного тока. В пленочных ЭЛК используется люминофор  $ZnS$ , активированный редкоземельными фтористыми соединениями  $178F_3$ ,  $SmF_3$ ,  $TmF_3$  и, влияющими на цвет свечения. Пленочные ЭЛК превосходят порошковые по яркости и контрасту свечения, поэтому им уделяется больше внимания. Весьма перспективны органические ЭЛК, однако они находятся еще в стадии исследований и совершенствования.

Общие свойства ЭЛК: наличие порогового предпробивного напряжения, начиная с которого возникает свечение; увеличение яркости с увеличением частоты и напряжения переменного напряжения; падение яркости со временем.

Среди электролюминесцентных излучателей наибольшее распространение получили светоизлучающие диоды (СИД), в которых излучение является следствием рекомбинации электронов и дырок при их инжекции под действием прямого напряжения на  $p-n$  переходе. Физика инжекционной электролюминесценции описана достаточно полно [8; 9]. СИД обладают следующими преимуществами: высокий КПД; квазимонохроматичность излучения; широта спектрального диапазона, перекрываемого различными светодиодами; направленность излучения; высокое быстродействие; малая энергоемкость; простота модуляции излучения изменением питающего прямого тока; линейность ватт-амперной характеристики; долговечность; малые габаритные размеры.

Основные области применения СИД: индикаторы включения и состояния аппаратуры, средства отображения информации на табло, а также источники излучения в оптронных парах и малогабаритных оптико-электронных приборах. Современные СИД изготавливаются на основе полупроводниковых соединений  $SiC$ ,  $GaAs$ ,  $GaN$ ,  $GaP$ ,  $GaAs_{1-x}Px$  и  $Ga_{1-x}Al_xAs$ . Полупроводниковый кристалл СИД обычно помещают внутрь пластмассового корпуса с линзой непосредственно над  $p-n$  переходом. Такая линза, контактирующая с кристаллом, — иммерсионная, увеличивающая видимый размер излучающей поверхности, критический угол, при котором наступает полное внутреннее отражение, а также уменьшающая френелевские потери на границе оптических сред. При этом получается острая диаграмма направленности излучения вдоль оси, облегчающая более полное использование излучения оптической системой. Внешение в материал линзы диспергента превращает ее в рассеивающий элемент, обеспечивающий широкую диаграмму направленности излучения.

Спектр инжекционной люминесценции СИД представляет собой узкую

полосу шириной в несколько сотых долей микрометра, положением максимума, определяемым полупроводниковым соединением. Такое излучение почти монохроматично /квазимонохроматично/. Относительные спектры излучения отечественных СИД приведены в [10]. Основные параметры СИД: осевая сила света  $I_c$ , кд, при заданном значении прямого тока  $I_{np}$ ; яркость  $L_c$ ,  $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , при том же токе; напряжение на светодиоде  $U_{np}$ , В при протекании прямого тока; длина волны  $\lambda_m$ , соответствующая максимуму спектра излучения; быстродействие  $\tau$ , с.

Характеристики СИД помимо относительного спектра излучения: излучательная /яркостная  $L_c = f(I_{np})$  или световая  $I_c = f(I_{np})$ ; вольт-амперная  $I = f(U)$ ; температурная  $I_c = f(T)$ ; диаграмма направленности излучения  $I_c = f(\alpha)$ , где  $\alpha$  — угол между направлением излучения и осью СИД.

Для арсенид-галлиевых диодов, излучающих в ИК-диапазоне, вместо силы света и яркости указывают мощность потока излучения  $\Phi$ . Зависимость силы света или других характеристик излучения СИД от прямого тока через  $p-n$  переход весьма близка к линейной. Что же касается вольт-амперной характеристики, то она такая же, как и для обычных диодов.

Температурная зависимость СИД проявляется в увеличении  $\lambda_m$  и уменьшении  $\Phi$  с увеличением  $T$ . Основные фотометрические расчеты при использовании СИД сводятся к вычислению светового потока в пределах определенного телесного угла по известной силе света  $I_c$  или яркости  $L_c$  и диаграмме направленности. Кроме того, может потребоваться определение потока излучения по найденному световому потоку и освещенности плоскости, удаленной на определенное расстояние.

Примеры таких расчетов так же, как и расчет электрической цепи питания СИД приведены в [9].

## 2. Решение примеров

Пример 4.1. Ксеноновая лампа сверхвысокого давления испускает световой поток  $\Phi_c = 20 \text{ кдм}$ . Спектр излучения показан на рис. 4.1. Произвести цифровку вертикальной оси в абсолютных значениях  $\varphi_\lambda$ ,  $\varphi_\lambda$ ,  $\text{Вт} \cdot \text{нм}^{-1}$ , и определить полный поток излучения.

Решение. Представим спектр излучения в виде таблицы, дополнив ее значениями  $V_\lambda$ .

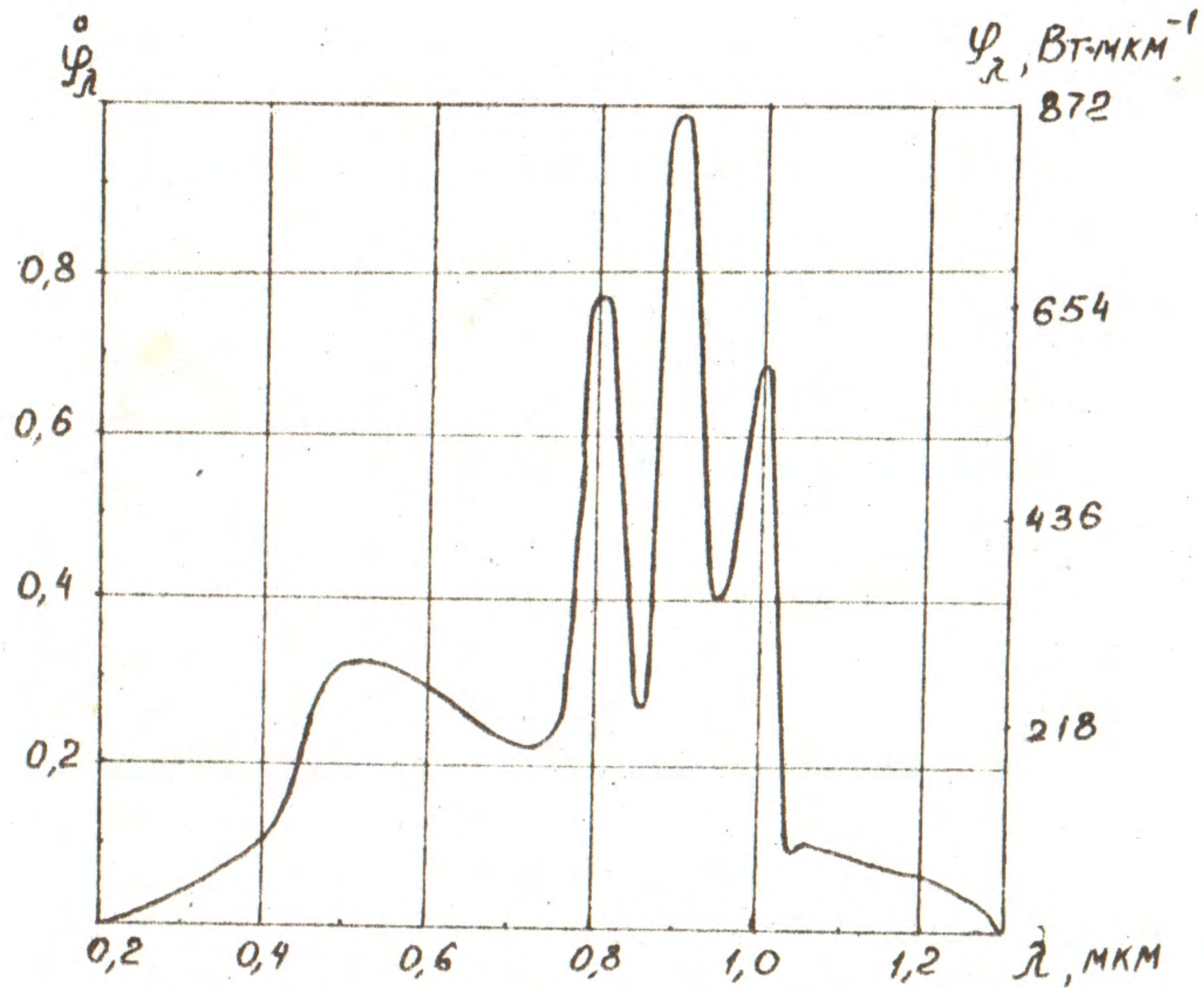


Рис.4.1

Воспользуемся соотношением /4.4/ для вычисления  $\varphi_M$ . Для этого предварительно определим значения  $\dot{V}_\lambda \varphi_\lambda$  для значений  $\lambda$ , взятых с интервалом  $\Delta\lambda = 0,05 \text{ мкм}$ , и занесем их в ту же таблицу. Проинтегрируем таблично заданную функцию  $V(\lambda) \cdot \varphi(\lambda)$  по  $\lambda$  в интервале значений от 0,4 до 0,75 мкм, воспользовавшись программой, приведенной в примере 3.3. В результате получим

$$\int_{0,4}^{0,8} \varphi(\lambda) \dot{V}(\lambda) d\lambda = 3,36 \cdot 10^{-2} \text{ мкм.}$$

Здесь для четности числа интервалов  $\Delta\lambda$  верхний предел интегрирования взят 0,8 мкм.

Определяем  $\varphi_M$

$$\varphi_M = \frac{20 \cdot 10^3}{683 \cdot 3,36 \cdot 10^{-2}} = 872 \text{ Вт}\cdot\text{мкм}^{-1}$$

и оцифровываем ось ординат на рис.4.1.

Используя соотношение  $\varphi_\lambda = \varphi_M \cdot \dot{\varphi}_\lambda$ , находим абсолютные значения спектра излучения и заносим их в таблицу. После чего, вновь об-

$\lambda, \text{ мкм}$	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
$\dot{\varphi}_\lambda$	0	0,01	0,035	0,07	0,12	0,24	0,33	0,32	0,3	0,26	0,23	0,22
$\dot{V}_\lambda$	0	0	0	0	$4 \cdot 10^{-4}$	0,038	0,323	0,995	0,631	0,107	0,004	$1 \cdot 10^{-4}$
$\dot{\varphi}_\lambda \cdot \dot{V}_\lambda$	0	0	0	0	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$	0,107	0,318	0,189	$2,78 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$9,43 \cdot 10^{-4}$
$\varphi_\lambda, \text{ Вт}\cdot\text{мкм}^{-1}$	0,8,72	30,52	61,04	104,64	209,28	287,76	279,04	261,6	226,72	200,56	191,84	

$\lambda, \text{ мкм}$	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
$\dot{\varphi}_\lambda$	0,75	0,27	1,0	0,4	0,7	0,12	0,09	0,08	0,065	0,055	0,05
$\dot{V}_\lambda$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\dot{\varphi}_\lambda \cdot \dot{V}_\lambda$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\varphi_\lambda, \text{ Вт}\cdot\text{мкм}^{-1}$	654	235,44	872	348,8	610,4	104,64	78,48	69,76	56,68	47,96	43,6

рашаясь к программе, находим поток излучения, испускаемый ксеноновой лампой:

$$\Phi = \int_{0,2}^{0,3} \varphi(\lambda) d\lambda = 224,8 \text{ Вт.}$$

**Пример 4.2.** Световой поток, испускаемый люминесцентной лампой ЛД40, составляет 2340 лм. Определить силу света и среднюю яркость в перпендикулярном направлении. Габаритные размеры лампы  $\varnothing 3 \times 100$  см.

**Решение.** Согласно /4.6/ сила света

$$I_1 \approx 2340/9,25 = 253 \text{ кд.}$$

Средняя яркость лампы на основании /4.7/ /при  $K = 0,92$ /

$$L = \frac{253 \cdot 10^4}{0,92 \cdot 3 \cdot 100} \approx 9200 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}.$$

**Пример 4.3.** Фосфидогаллиевый СИД типа ЗЛ102Д /или АЛ102Д/ имеет силу света 0,4 мкд и зеленый цвет свечения. Максимум спектра излучения /рис.4.2/ соответствует длине волны  $\lambda_M = 0,53$ . Диаграмма направленности излучения показана на рис.4.3. Требуется определить:

световую эффективность СИД;

спектр силы излучения в абсолютных величинах  $\text{Вт} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ; поток излучения, входящий в оптическую систему, если угол охвата конденсатора составляет  $30^\circ$ ;

долю излучения, используемую оптической системой.

**Решение.** Для определения световой эффективности СИД по формуле

$$\eta = \frac{683 \int_{0,4}^{0,8} \dot{V}(\lambda) i(\lambda) d\lambda}{\int_{0,4}^{0,8} i(\lambda) d\lambda}$$

необходимо вычисление двух интегралов. Используя кривую спектра излучения и значения  $\dot{V}_\lambda$ , взятые через 0,025 мкм, составим таблицу

$\lambda$ , мкм:	0,4	0,425	0,45	0,475	0,5	0,525	0,55	0,575	0,6
$i_\lambda$ :	0	0,14	0,33	0,56	0,81	0,99	0,85	0,59	0,30
$\dot{V}_\lambda$ :	$4 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	0,038	0,1126	0,3230	0,7932	0,9950	0,9154	0,6310
$i_\lambda \cdot \dot{V}_\lambda$ :	0	$1 \cdot 10^{-3}$	$12,5 \cdot 10^{-3}$	0,2616	0,7853	0,8458	0,5401	0,1893	0,0631

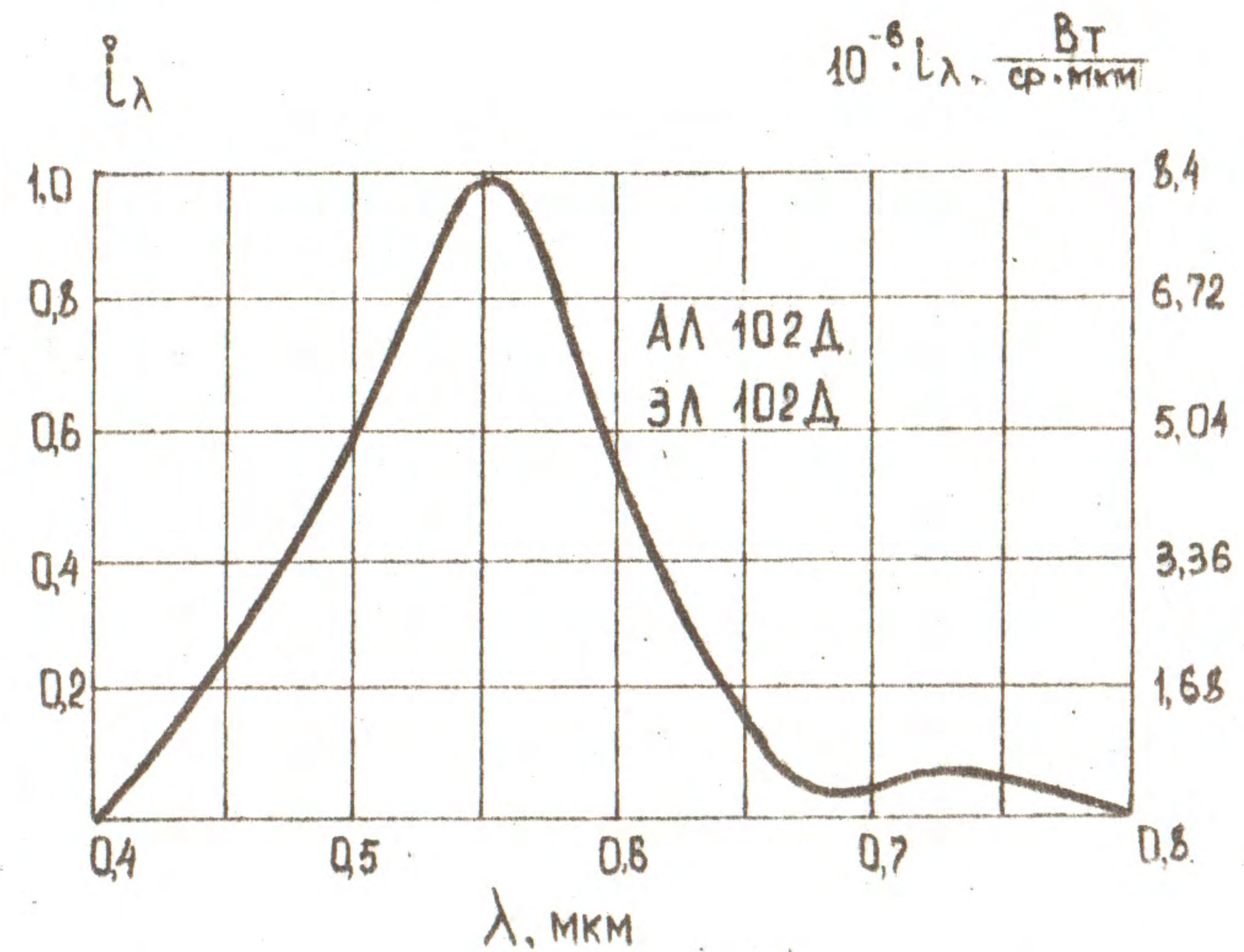


Рис.4.2

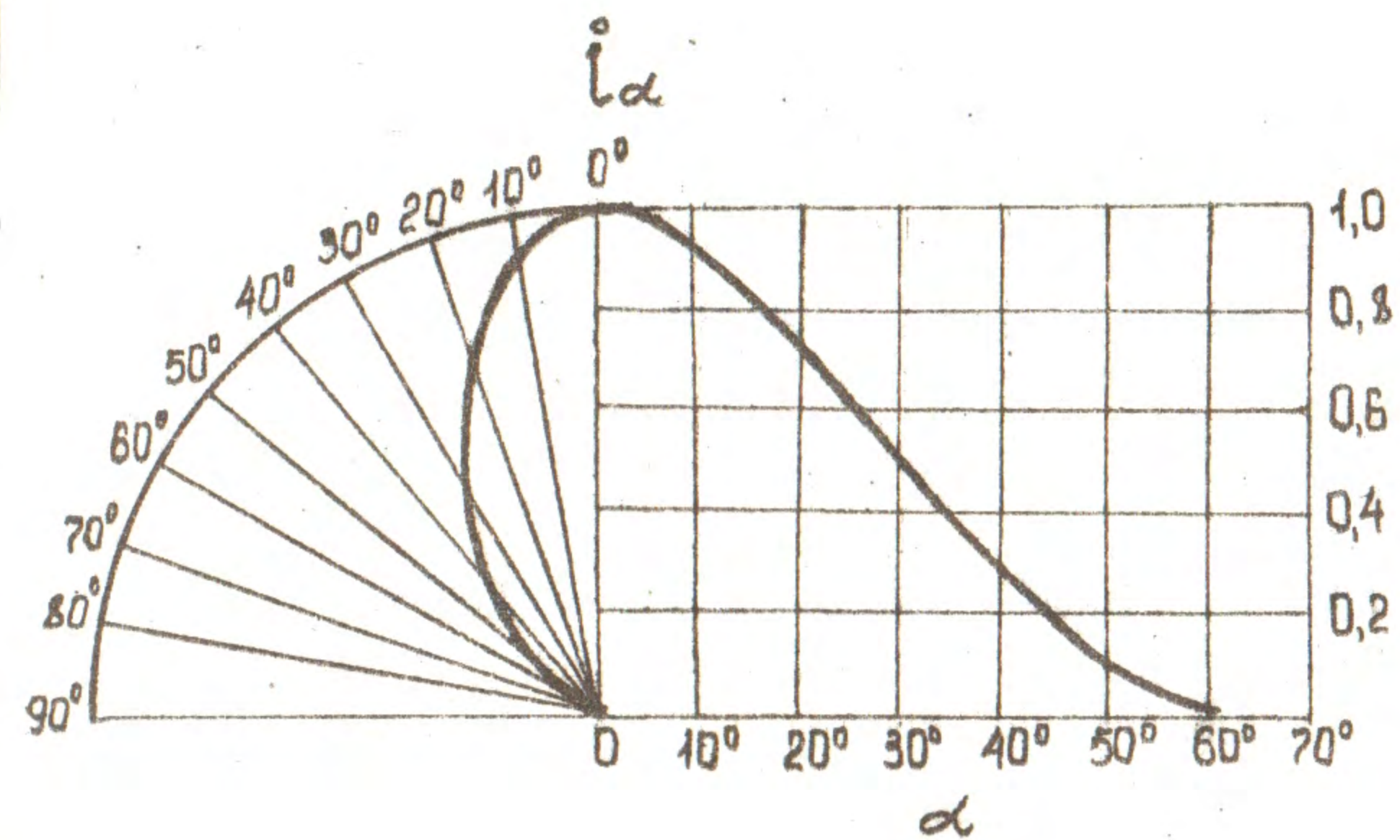


Рис.4.3

$\lambda, \text{мкм}$	0,625	0,65	0,675	0,7	0,725	0,75	0,775	0,8
$i_\lambda$	0,12	0,03	0,03	0,06	0,08	0,07	0,03	0
$V_\lambda$	0,3210	0,1070	0,0232	0,0041	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0	0
$i_\lambda V_\lambda$	0,0385	0,0032	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0

По аналогии с примером 4.1, используя стандартную программу для интегрирования по табличным данным, находим, что

$$\int_{0,4}^{0,8} i(\lambda) d\lambda = 0,126 \quad \text{и} \quad \int_{0,4}^{0,8} V(\lambda) i(\lambda) d\lambda = 0,070.$$

Световая эффективность

$$\eta = \frac{683 \cdot 0,07}{0,126} = 379,4 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

Так как полная сила света СИД

$$I_c = \int_{0,4}^{0,8} V(\lambda) i(\lambda) d\lambda = 683 i_M \int_{0,4}^{0,8} V(\lambda) i(\lambda) d\lambda,$$

то максимальное значение спектральной плотности силы излучения

$$i_M = \frac{I_c}{683 \int_{0,4}^{0,8} V(\lambda) i(\lambda) d\lambda} = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{683 \cdot 0,07} = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}.$$

С помощью полученного значения оцифровываем ось ординат на рис. 4.2.

Полная сила излучения СИД

$$I = \int_{0,4}^{0,8} i(\lambda) d\lambda = i_M \int_{0,4}^{0,8} i(\lambda) d\lambda = 8,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,126 = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

К этому же результату можно было сразу прийти, используя формулу

$$\eta = I_c / I, \quad \text{из которой следует}$$

$$I = \frac{I_c}{\eta} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{379,4} \approx 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Элементарный поток излучения, заключенный в элементарном телесном угле, составляющем угол  $d\omega$  с осью СИД,  $d\Phi_\alpha = I_\alpha d\omega$  или, так как  $d\omega = 2\pi \sin\alpha d\alpha$ , то  $d\Phi_\alpha = I_\alpha 2\pi \sin\alpha d\alpha$ .  
Полный поток, заключенный в телесном угле, которому соответствует плоский полуугол  $\alpha$ :

$$\Phi_\alpha = \int_0^\alpha I(\alpha) 2\pi \sin\alpha d\alpha = I_0 \int_0^\alpha i(\alpha) 2\pi \sin\alpha d\alpha,$$

где  $I_0$  и  $I(\alpha)$  - соответственно сила излучения в осевом направлении и относительная сила излучения в направлении  $\alpha$ .

Для вычисления  $\Phi_\alpha$  составим таблицу.

$\alpha$	$0^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$
$I_\alpha$	1	0,97	0,9	0,81	0,7	0,6	0,5	0,3	0,11	0
$\sin\alpha$	0	0,087	0,174	0,259	0,342	0,423	0,5	0,643	0,766	0,866
$I_\alpha \sin\alpha$	0	0,085	0,156	0,210	0,239	0,254	0,250	0,193	0,084	0

После интегрирования получаем

$$2\pi \int_0^{30^\circ} I(\alpha) \sin\alpha d\alpha = 2\pi \cdot 5,39 = 33,84$$

и окончательно находим, что поток излучения, поступающий в оптическую систему:

$$\Phi_\alpha = 1,05 \cdot 10^{-6} \cdot 33,84 = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}.$$

Полный поток, излучаемый СИД в пределах  $60^\circ$ :

$$\Phi = 1,05 \cdot 10^{-6} \cdot 59,19 = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}.$$

Используемая часть излучения составляет

$$\xi = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi} = 0,58.$$

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

#### ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИЕМНИКОВ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ /ПЛЭ/

Цель занятия - приобрести навыки расчета чувствительности ПЛЭ к излучению реальных ИЛЭ, закрепление знаний лекционного материала.

Основные задачи:

1/ повторить основные положения лекций по разделу "Чувствительность ПЛЭ";

2/ освоить методы пересчета чувствительности из световых единиц в энергетические и обратно при эталонном и реальном излучателях.

#### 1. Общие положения

Чувствительность ПЛЭ - одна из основных его характеристик. Различают спектральную, интегральную и вольтовую /токовую/ чувствительности.



Спектральная чувствительность - удельная реакция ПЛЭ на облучение его монохроматическим потоком излучения:

$$S_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda} \cdot [B/Вт \cdot мкм], [B/лм \cdot мкм] \text{ или}$$

$$S = \frac{i}{\Phi} [A/Вт \cdot мкм] [A/лм \cdot мкм], \quad /5.1/$$

где  $U$  или  $i$  - напряжение или ток в цепи ПЛЭ при падении на него монохроматического потока излучения  $\Phi_\lambda$ .

У селективных ПЛЭ величина  $S_\lambda$  зависит от  $\lambda$  и принимает наибольшее значение на какой-то определенной длине волны  $\lambda_m$ , называемой длиной волны максимальной чувствительности.

На практике чаще пользуются безразмерной функцией

$$\dot{S}_\lambda = \frac{S_\lambda}{S_{\lambda m}} \quad /5.2/$$

которую называют относительной спектральной чувствительностью /рис.5.1/. Значение  $\dot{S}_\lambda$  приводится в справочниках и паспортах ПЛЭ.

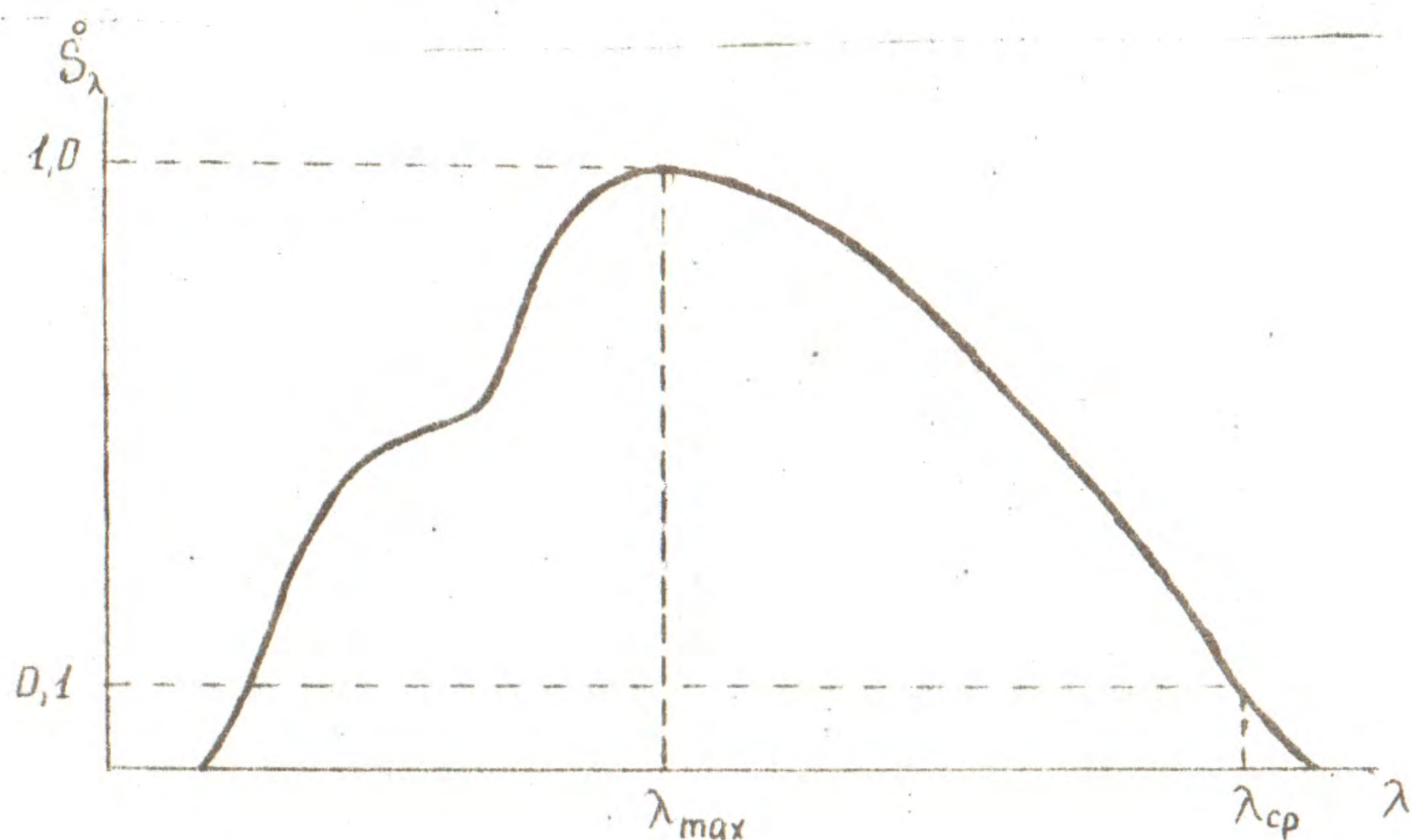


Рис.5.1

Длинноволновой и коротковолновой границами спектральной чувствительности ПЛЭ считают такие значения соответственно  $\lambda_2$  и  $\lambda_1$ , при которых спектральная чувствительность составляет 0,1 /в отдельных случаях 0,01/ от максимальной.

По графикам  $\dot{S}_\lambda$  можно судить лишь о пригодности данного ПЛЭ для

работы с данным излучателем, количественной же оценкой такой пригодности служит интегральная чувствительность ПЛЭ.

Интегральная чувствительность - реакция ПЛЭ на весь падающий на него /интегральный/ поток излучения. Она определяется как отношение сигнала, снимаемого с ПЛЭ, к величине падающего на ПЛЭ потока

$$S = \frac{U}{\Phi} [B/Вт (B/лм)] \text{ или } S = \frac{i}{\Phi} [A/Вт (A/лм)]. \quad /5.3/$$

Вольтовая и токовая чувствительности используются на практике в зависимости от типа и схемы включения ПЛЭ, обеспечивающей изменение тока или напряжения на выходе ПЛЭ.

Интегральная чувствительность связана с относительной соотношением

$$S = S_{\lambda m} \frac{\int_0^\infty \Phi_\lambda^\circ \dot{S}_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_\lambda^\circ d\lambda}, \quad /5.4/$$

где  $\Phi_\lambda^\circ = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_{\lambda m}}$  - относительный спектральный поток излучения, падающий на ПЛЭ.

Как видно из /5.4/, интегральная чувствительность ПЛЭ зависит от характеристик функции спектральной плотности лучистого потока  $\Phi_\lambda$  излучателя. Приводимые в паспортах ПЛЭ значения интегральной чувствительности измеряются по излучению эталонных источников. Такими источниками являются:

для видимой и ближней ИК-области спектра - источники типа А /вольфрамовая нить с температурой  $T = 2856$  К/, В / $T = 4800$  К/ и С / $T = 6500$  К/;

для средней и дальней ИК-области - АЧТ с температурами 373, 500, 573 и 1273 К.

Отношение двух интегралов в /5.4/

$$\xi = \frac{\int_0^\infty \Phi_\lambda^\circ \dot{S}_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_\lambda^\circ d\lambda} \quad /5.5/$$

называют коэффициентом использования потока, показывающим, какую долю общего потока, падающего на ПЛЭ, составляет эффективный для данного ПЛЭ поток.

Поскольку функции  $\dot{S}_\lambda$  не имеют аналитического выражения, а зада-

ются графически или таблично, коэффициенты использования вычисляют численным интегрированием. При графическом интегрировании на график в одинаковом масштабе наносят функции  $\Phi_\lambda$ ,  $S_\lambda$ , находят их произведение  $\Phi_\lambda S_\lambda$ , определяют соответствующие площади и вычисляют их отношение /рис.5.2/.

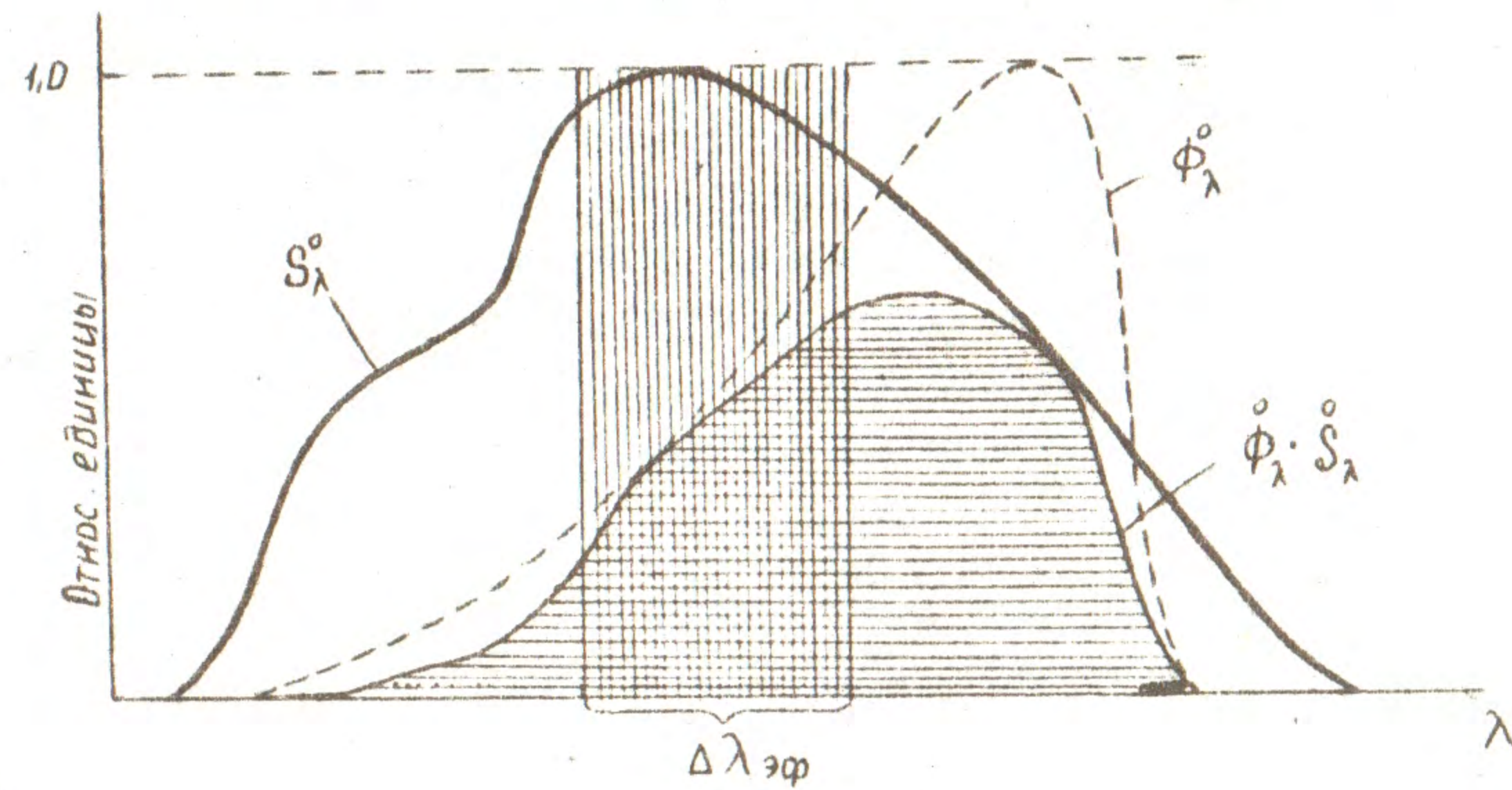


Рис.5.2

Иногда вместо  $\xi$  используют другую характеристику - эффективную ширину полос чувствительности ПЛЭ, под которой понимают ширину диапазона спектра, где сосредоточен весь эффективный для данного ПЛЭ поток с постоянной спектральной плотностью, равной  $\Phi_{\lambda m}$ , т.е.

$$\Delta\lambda_{\xi\phi} = \int_0^{\infty} \Phi_\lambda S_\lambda d\lambda \quad /5.6/$$

Так как для эталонного и реального излучателей в соответствии с /5.4/ имеют место соотношения:

$$S_g = S_{\lambda m} \xi_g;$$

$$S_p = S_{\lambda m} \xi_p,$$

то интегральная чувствительность ПЛЭ к излучению реального ПЛЭ определяется следующим соотношением:

$$S_p = S_g \frac{\xi_p}{\xi_g} \quad /5.7/$$

Таким образом для определения  $S_p$  необходимо знать, насколько

эффективно использует ПЛЭ излучение данного ИЛЭ по сравнению с эталонным ИЛЭ, по которому приемник калибровался. Если кривая  $\Phi_{\lambda p}$  не попадает в область спектральной чувствительности ПЛЭ,  $\xi_p = 0$  и  $S_p = 0$ , т.е. ПЛЭ не реагирует на такое излучение. Как правило  $\xi_p < \xi_g$ , однако возможны случаи, когда  $\xi_p > \xi_g$  и соответственно  $S_p > S_g$ , что свидетельствует о лучшем спектральном согласовании ПЛЭ с реальным ИЛЭ по сравнению с эталонным.

В энергетическом расчете ОЭП часто требуется пересчитать чувствительность ПЛЭ из световых единиц в энергетические и обратно. В таком случае необходимо использовать формулу

$$S = S_c \cdot 683 \eta, \quad /5.8/$$

где  $S$  и  $S_c$  - чувствительности ПЛЭ соответственно в энергетических и световых величинах;  $\eta$  - коэффициент использования глазом лучистого потока, который определяется аналогично  $\xi$  при условии, что в качестве  $S_\lambda$  используется кривая видности глаза  $V_\lambda$ . В табл.5.1 приведены значения  $\eta$  для АЧТ с  $T = 1200 \dots 50000$  К.

Таблица 5.1

T, К	$\eta$	T, К	$\eta$	T, К	$\eta$	T, К	$\eta$
1200	6.10/ /	2200	5.16/ /	3300	4.47/ /	6000	0,136
1300	2.00/-5/	2300	7.03/-3/	3400	4.95/-2/	7000	0,135
1400	5.00/-5/	2400	9.33/-3/	3500	5.57/-2/	8000	0,126
1500	1.42/-4/	2500	1.20/-2/	3750	6.82/-2/	9000	0,114
1600	2.82/-4/	2600	1.51/-2/	4000	8.10/-2/	10000	9.88/-2/
1700	4.77/-4/	2700	1.88/-2/	4250	9.24/-2/	12000	8.90/-2/
1800	6.00/-4/	2850	2.43/2-/	4500	0,1.03	15000	5,83/-2/
1900	1.58/-3/	3000	3.09/-2/	4750	0,1.11	20000	3,06/-2/
2000	2.45/-3/	3100	3.52/-2/	5000	0,119	30000	1.18/-2/
2100	3.63/-3/	3200	4.04/-2/	5500	0,130	50000	3,58/-3/

Из /5.7/и/5.8/ следуют основные формулы для пересчета чувствительности ПЛЭ:

$$S_p = S_g^c \cdot 683 \eta_g \frac{\xi_p}{\xi_g}; \quad /5.9/$$

$$S_p^c = S_g^c \frac{\eta_g}{\eta_p} \frac{\xi_p}{\xi_g}; \quad /5.10/$$

$$S_p^c = \frac{S_p}{683 \cdot \xi_p} \cdot \frac{\xi_p}{\xi_p}, \quad /5.11/$$

где  $S_p$ ,  $S_{pT}$  - чувствительности к лучистому потоку реального и эталонного ИЛЭ;  $S_p^c$ ,  $S_{pT}^c$  - чувствительности к световому потоку реального и эталонного ИЛЭ.

## 2. Решение примеров

**Пример 5.1.** Интегральная чувствительность фотодиода ФД-18К к эталонному источнику типа А составляет 50 мА/Вт. Определить интегральную чувствительность фотодиода в световых величинах к излучению АЧТ с  $T = 1500$  К /коэффициенты использования  $\xi_p = 0,128$ ,  $\xi_p = 0,023$ /. Изменится ли  $S_p$ , если излучатель будет не черным, а серым с коэффициентом серости  $\epsilon$ ?

**Решение.** По табл.5.1 для  $T = 1500$  К находим  $\eta_p = 1,42 \cdot 10^{-4}$ . Подставляя полученное значение, а также значения коэффициентов  $\xi_p$  и  $\xi_p$  в формулу /5.11/, определяем

$$S_p^c = \frac{50 \cdot 0,023}{683 \cdot 1,42 \cdot 10^{-4} \cdot 0,128} = 92,6 \text{ мА/лм.}$$

Переход от АЧТ к серому излучателю с постоянным коэффициентом серости по всему спектральному диапазону не связан с изменением спектра /уменьшается лишь общий поток/, поэтому ни  $S_p^c$ , ни  $S_p$  не изменяются.

**Пример 5.2.** Определить эффективную ширину полосы чувствительности фотодиода ФД-19КК, установленного непосредственно перед светодиодом АЛ-107Б. Рассчитать необходимый ток питания светодиода для получения сигнала на выходе ФД-19КК, равного 2,2 мВ. Чувствительность ФД-19КК - 150 мВ/Вт /источник типа А/,  $\xi_p = 0,128$ . Зависимость мощности излучения АЛ-107Б от тока линейна /при  $i_{пит} = 100$  мА,  $\Phi = 10$  мВт/. Графики  $S_\lambda$  и  $\Phi_\lambda$  изображены на рис.5.3.

**Решение.** В соответствии с формулой /5.6/ необходимо определить

$$\Delta \lambda_{\Phi} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda S_\lambda d\lambda.$$

Из графиков на рис.5.3 определяем пределы интегрирования:

$\lambda = 0,92 \dots 1,15$  мкм /за пределами этого диапазона одна из функций, в данном случае  $\Phi_\lambda$ , принимает нулевые значения/.

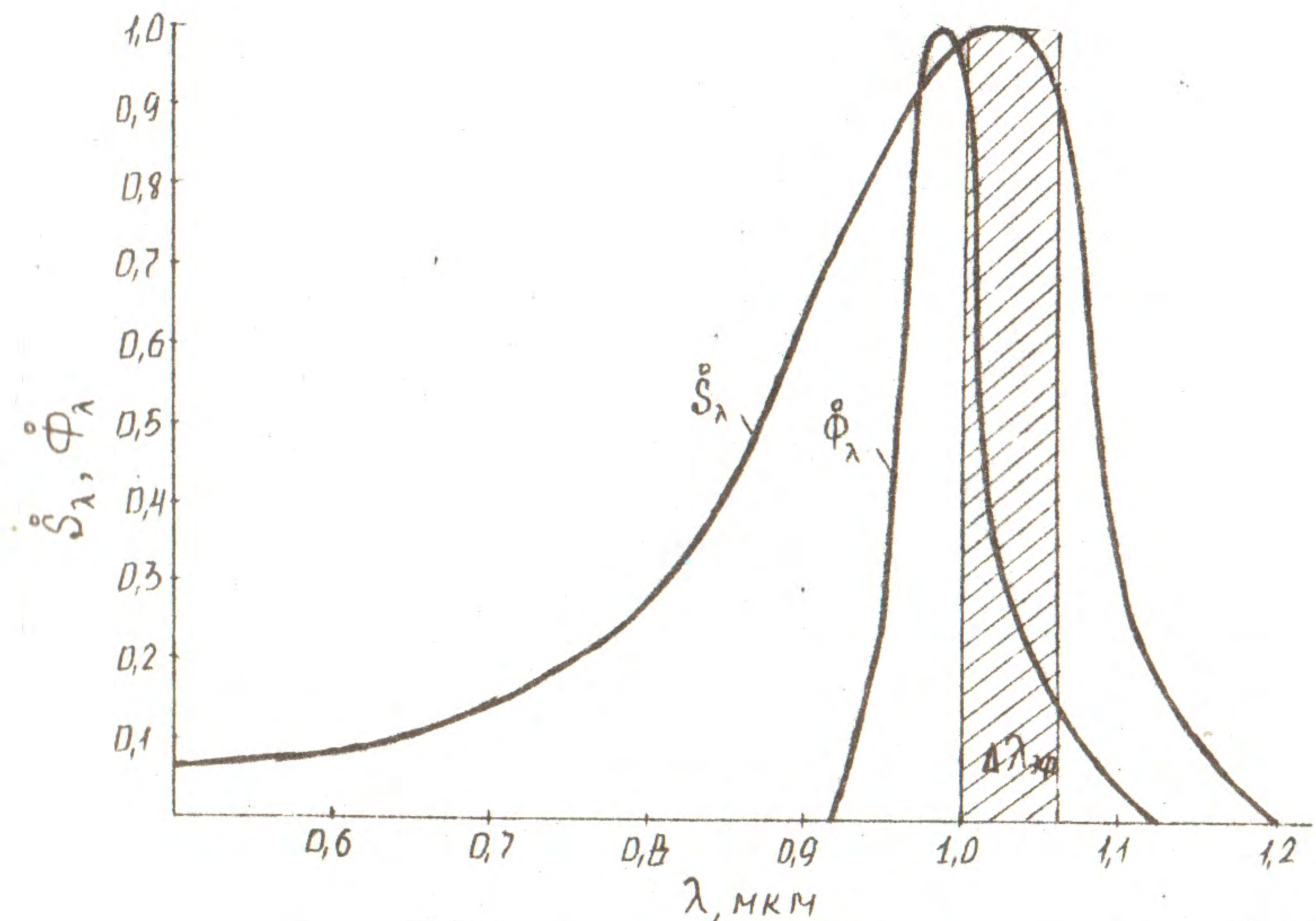


Рис.5.3

Разбиваем указанный диапазон на интервалы с шагом  $\Delta \lambda = 0,02$  мкм и по графикам  $S_\lambda$  и  $\Phi_\lambda$  составляем табл.5.2 значений  $S(\lambda_i)$  и  $\Phi(\lambda_i)$ , где  $\lambda_i = \lambda_n + \Delta \lambda_i$ .

Таблица 5.2

$\lambda_i$	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10	1,12
$\Phi(\lambda_i)$	0,15	0,55	1,00	0,93	0,36	0,23	0,10	0,08	0,03	0,01
$S(\lambda_i)$	0,81	0,89	0,95	0,99	1,00	0,99	0,91	0,60	0,30	0,19

Проводим численное интегрирование табулированных функций с постоянным шагом аргумента по формуле Симпсона. Программа для вычислений на микрокалькуляторах "Электроника БЗ-34", МК-54, МК-56 имеет вид

```

ПО С/П П9 С/П КИПО ХУ 4 Х ИП9 +
П9 С/П П9 ИП9 + + FLO 02 F1X ИП8
Х З : С/П БП 00

```

Инструкция:  $\Delta \lambda = 0,02$  в регистр 8, после чего выполнить операции IO .

/число интервалов в разбиении/ в регистр X, C/П, 0,15 x 0,81, B/0 C/П и т.д.

Получим результат  $\Delta\lambda_{\varphi} = 0,063$  мкм. Время счета, включая набор данных? - не более 2,5 мин.

Определяем чувствительность ПЛЭ к реальному излучателю /АЛ-107Б/:

$$S_p = S_s \frac{\xi_p}{\xi_s}$$

Для вычисления  $\xi_p$  находим  $\int_0^{\Delta\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda$ , для чего вновь обращаемся к программе численного интегрирования табулированных функций по методу Симпсона, а данные получаем из табл.5.2.

Находим

$$\int_0^{\Delta\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda = 0,067,$$

таким образом

$$\xi_p = \frac{\int_0^{\Delta\lambda} \Phi_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\Delta\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda} = \frac{0,063}{0,067} = 0,937.$$

Коэффициент использования излучения светодиода АЛ-107Б фотодиодом ФД-19КК оказался больше эталонного коэффициента использования. Это свидетельствует о лучшем спектральном согласовании ФД-19КК с АЛ-107Б по сравнению с АЧТ с  $T = 2856$  К /см.рис.5.3/.

Находим

$$S_p = 150 \cdot \frac{0,937}{0,128} = 1100 \text{ мВ/Вт.}$$

Для получения сигнала с ПЛЭ величиной  $I = 2,2$  мВ поток ИЛЭ должен составлять

$$\Phi = \frac{I}{S_p} = \frac{2,2 \cdot 10^{-3}}{1100} = 2 \text{ мВт.}$$

Учитывая линейную зависимость лучистого потока светодиода АЛ-107Б от силы тока питания  $i_{пит}$ , из условия  $i = 100$  мА  $\rightarrow \Phi = 10$  мВт находим, что для излучения потока величиной 2 мВт ток в цепи светодиода должен составлять  $i_{пит} = \frac{2}{10} 100 = 20$  мА.

### 3. Задание для самостоятельной работы

**Пример 5.3.** Определить, какой из двух ПЛЭ более предпочтителен с точки зрения лучшего спектрального согласования ИЛЭ и ПЛЭ, учитывая поглощение излучения оптической средой.

Данные для расчета: тип ПЛЭ указан в номере варианта /табл.5.3/, данный ПЛЭ сравнить с ПЛЭ последующего варианта. ИЛЭ-АЧТ - температурой, определяемой по формуле

$$T = 1100 + 100 \cdot \text{номер варианта}$$

Графики спектральных коэффициентов пропускания среды показаны на рис.5.4 /кривые I, II, III/, вид кривой по вариантам указан в табл.5.2.

**Рекомендации.** 1. При выборе ПЛЭ учесть различие не только относительных спектральных чувствительностей  $S_{\lambda}$ , но и различие интегральных чувствительностей сравниваемых ПЛЭ.

2. Оптическая среда учитывается умножением спектрального коэффициента пропускания  $\tau_{\lambda}$  на значение  $\Phi_{\lambda}$ .

3. Интегральная вольтовая и токовая чувствительности связаны соотношением  $S_{\lambda} = S_i R$ , сопротивление  $R$  принять равным 1 мОм.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

### ШУМЫ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель занятия - приобрести навыки расчета шумов ПЛЭ и их статистических характеристик, закрепление знаний лекционного материала.

Основные задачи:

- 1/ повторить теоретический материал: типы шумов ПЛЭ, их статистические характеристики, особенности расчета шумов отдельных типов ПЛЭ;
- 2/ ознакомиться с методикой расчета основных шумовых параметров ПЛЭ;
- 3/ приобрести навыки оценки уровня шумов ПЛЭ в конкретных ОЭП.

### 1. Общие положения

Шумы ПЛЭ ограничивают возможность обнаружения ими малых потоков излучения. Шумами называют хаотические сигналы /флуктуации/ со случайными амплитудой, частотой и фазой, возникающие в цепи включения ПЛЭ. Поскольку шум на практике представляет собой стационарный центрированный случайный процесс с нормальным законом плотности вероятности, то для оценки их достаточно ограничиться рамками корреляционной теории. В соответствии с этой теорией для полного описания случайного процесса достаточно определить автокорреляционную функцию  $K(\tau)$  или спектр Винера - Хинчина  $W(f)$ . Эти две характеристики связаны между собой парой преобразований Фурье:

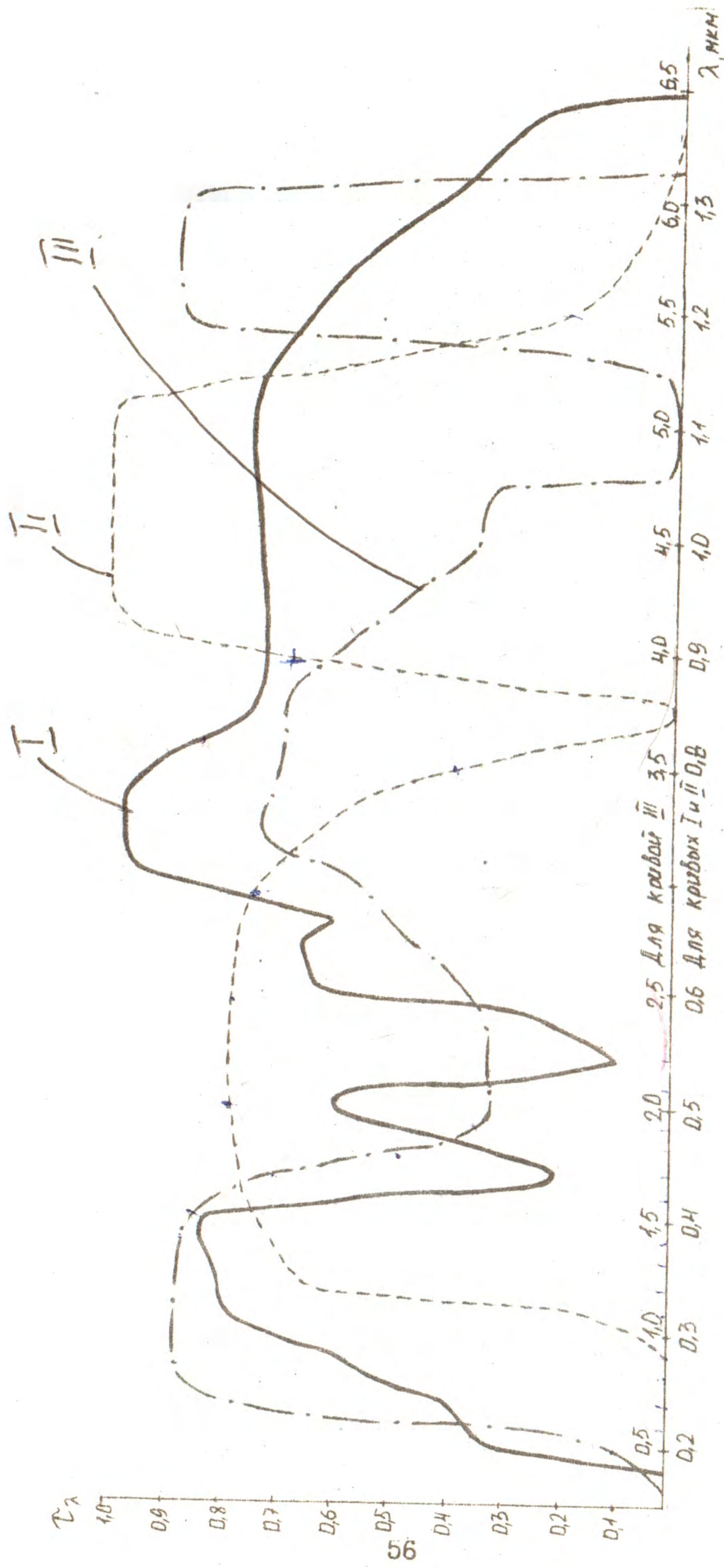


Рис. 5.4

Таблица 5.3

Номер образца	λ, мкм Тип ФП	Относительная спектральная чувствительность ПЛЭ S <sub>λ</sub>										Интегралы												
		0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	Чувствительность S <sub>эт</sub>	τλ	
1	C-1	0,15	0,78	0,94	0,60	0,42	0,38	0,42	0,54	0,64	0,78	0,88	0,96	1,00	0,97	0,80	0,56	0,23	0,16	0,07	0,02	25	мкА/Вт	III
2	C-7	-	0,10	0,72	0,84	0,85	1,00	0,92	0,80	0,58	0,20	0,08	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	45	мкА/Вт	II
3	C-15	0,42	0,47	0,80	1,00	0,82	0,73	0,48	0,18	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	мкА/лм	I
4	ФД(GaAs)	-	0,02	0,08	0,12	0,20	0,30	0,40	0,55	0,71	0,89	0,95	1,00	0,74	0,52	0,02	-	-	-	-	-	15	мА/лм	I
5	ФД-26К	-	-	-	0,06	0,08	0,08	0,09	0,11	0,14	0,20	0,28	0,42	0,65	0,83	1,00	0,98	0,30	0,10	0,05	80	мА/Вт	III	
6	ФСК-1	0,32	0,40	0,45	0,52	0,80	1,00	0,61	0,63	0,49	0,38	0,30	0,22	0,14	0,06	-	-	-	-	-	25	мА/лм	II	
7	ФС-К4	0,20	0,36	0,44	0,47	0,67	0,82	0,92	1,00	0,63	0,50	0,37	0,28	0,20	0,13	0,04	-	-	-	-	120	мА/Вт	I	
8	ФПФ-13	-	-	-	0,03	0,06	0,11	0,29	0,81	1,00	0,73	0,22	0,08	0,01	-	-	-	-	-	-	63	мА/лм	I	
9	ФСД-1	-	-	-	-	-	0,02	0,24	0,50	0,75	0,90	1,00	0,97	0,81	0,62	0,45	0,28	0,10	0,05	-	40	мА/Вт	II	
10	СФ3-1	-	-	-	-	-	-	0,04	0,08	0,13	0,24	0,39	0,84	0,98	0,52	0,21	0,12	0,07	0,02	0,01	-	3,6	мА/лм	I
λ, мкм		0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50								
11	C-10	0,49	0,38	1,00	0,86	0,72	0,64	0,38	0,30	0,18	0,10	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	мА/Вт	I
12	C-14	0,17	0,28	0,46	0,73	0,94	1,00	0,95	0,77	0,45	0,28	0,17	0,11	0,05	0,01	-	-	-	-	-	-	40	мА/Вт	II
λ, мкм		0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58			
13	ФСК-М1	0,10	0,23	0,28	0,32	0,35	0,38	0,41	0,45	0,49	0,57	0,80	1,00	0,81	0,30	0,14	0,05	-	-	-	-	10	мА/лм	I
14	ФСК-М2	-	-	-	-	-	0,02	0,05	0,10	0,12	0,18	0,27	0,51	0,98	0,92	0,31	0,14	0,07	0,02	-	-	12	мА/лм	II

Окончание табл. 5.3

14	№	ФСК-М2	λ, МКМ																S	τ <sub>2</sub>			
			0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40			3,60	3,80	4,00
15	PBS(295K)	0,02	0,08	0,15	0,19	0,24	0,38	0,53	0,72	0,91	0,97	1,00	0,99	0,65	0,42	0,27	0,16	0,09	0,02	-	-	120 $\frac{MB}{BT}$	I
16	PBS(195K)	-	0,03	0,06	0,09	0,11	0,18	0,26	0,41	0,56	0,77	1,00	0,83	0,62	0,70	0,43	0,18	0,07	0,03	-	-	420 $\frac{MB}{BT}$	II
17	PBS(300K)	-	-	-	-	0,01	0,09	0,36	0,75	0,89	1,00	0,86	0,59	0,44	0,31	0,23	0,13	0,06	0,02	-	-	55 $\frac{MB}{BT}$	III
18	λ, МКМ	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	-	-	-
19	ФД-3А	0,13	0,38	0,44	0,51	0,59	0,66	0,72	0,79	0,86	0,91	0,99	0,70	0,35	0,15	0,04	0,02	-	-	-	-	17 $\frac{MA}{AM}$	II
20	ФД-7	0,10	0,31	0,38	0,45	0,52	0,59	0,65	0,71	0,79	0,87	0,93	0,91	0,45	0,20	0,05	0,03	-	-	-	-	1,5 $\frac{MA}{AM}$	I
21	ФД-4	0,04	0,08	0,33	0,40	0,47	0,58	0,67	0,70	0,73	0,76	0,90	1,00	0,61	0,12	0,03	0,01	-	-	-	-	2,0 $\frac{MA}{AM}$	II
22	λ, МКМ	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	3,60	3,90	4,20	4,50	4,80	5,10	5,40	5,70	6,00	6,30	-	-
23	InSB(195K)	0,02	0,17	0,23	0,28	0,31	0,33	0,37	0,40	0,45	0,52	0,60	0,73	0,81	0,90	0,97	1,00	0,94	0,65	0,34	0,10	320 $\frac{MB}{BT}$	II
24	InSB(295K)	-	0,03	0,08	0,13	0,31	0,43	0,60	0,69	0,80	0,88	0,96	1,00	0,98	0,75	0,52	0,41	0,28	0,19	0,08	0,02	65 $\frac{MB}{BT}$	III
25	PBS(77K)	-	0,04	0,07	0,12	0,20	0,21	0,22	0,26	0,31	0,38	0,43	0,50	0,57	0,62	0,70	0,91	0,99	0,52	0,15	0,04	140 $\frac{MB}{BT}$	II
26	InAs(77K)	-	0,01	0,28	0,53	0,68	0,76	0,81	0,85	0,86	0,91	0,94	0,96	1,00	0,98	0,94	0,84	0,78	0,42	0,03	-	200 $\frac{MB}{BT}$	III

$$W(f) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau; \quad /6.1/$$

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} W(f) e^{j2\pi f\tau} df, \quad /6.2/$$

известной под названием теоремы Винера - Хинчина.

Спектр  $W(f)$  характеризует распределение мощности шума по частотам. Если  $W(f)$  во всем диапазоне частот не зависит от частоты, такой шум называют "белым".

Квадрат действующего значения шума /его дисперсия/ равен значению функции  $K(\tau)$  при  $\tau=0$ :

$$\sigma^2 = \overline{u_w^2} = K(0). \quad /6.3/$$

С другой стороны, согласно /6.2/ можно записать

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} W(f) df, \quad /6.4/$$

т.е. для определения дисперсии шума необходимо просуммировать элементарные мощности шума на узком интервале частот  $\Delta f$  по всему частотному диапазону.

Из /6.4/ видно, что практически получить белый шум не представляется возможным, так как в этом случае потребовался бы источник шума бесконечно большой мощности. Поэтому из-за ограничения частотного диапазона шум считают белым, принимая во внимание только диапазон частот данного ОЭП.

При расчетах ОЭП часто пользуются понятием "эквивалентная полоса шума"  $\Delta f_{\text{экв}}$ , под которой понимается диапазон частот, в пределах которого данный шум эквивалентен по мощности белому шуму со спектральной мощностью, равной спектру мощности реального шума на низких частотах  $W_0$  /рис.6.1/:

$$\int_0^{\infty} W(f) df = W_0 \Delta f_{\text{экв}} \quad \text{откуда} \quad \Delta f_{\text{экв}} = \frac{\int_0^{\infty} W(f) df}{W_0}. \quad /6.5/$$

Количественной мерой оценки уровня шума является также коэффициент шума или шум-фактор, учитывающий прирост шумов на выходе данного тракта прибора по отношению к шумам на его входе.

Если  $P_{шплэ}$  - мощность шумов ПЛЭ, а  $P_{шч}$  - мощность шумов усилителя со входной цепью, то коэффициент шума определяется как

$$F = \frac{P_{шплэ} + P_{шч}}{P_{шплэ}} = 1 + \frac{P_{шч}}{P_{шплэ}} \quad /6.6/$$

При  $F=2$  считают, что имеет место согласование шумов, так как в этом случае  $P_{шплэ} = P_{шч}$ .

В ОЭП в целом шумы оцениваются отношением сигнал/шум, которое, как правило, задается в техническом задании на разрабатываемый прибор.

Шумы ПЛЭ можно разделить на две группы: внутренние и внешние. Внутренними шумами называются процессы, происходящие в самом ПЛЭ. К ним относятся:

1. Тепловой шум /шум Джонсона/ - вызывается хаотическим тепловым движением носителей заряда, в результате чего в любой момент времени концентрация носителей заряда в различных участках оказывается различной и образуется очень малая ЭДС. Дисперсия теплового шума выражается формулой Найквиста:

$$\bar{u}_T^2 = 4kTR\Delta f, \quad /6.7/$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура ПЛЭ;  $R$  - сопротивление ПЛЭ при данной  $T$ ;  $\Delta f$  - рабочая полоса частот.

2. Генерационно-рекомбинационный шум вызывается случайным отклонением скоростей генерации и рекомбинации носителей заряда от среднего значения. Наблюдается в полупроводниковых ПЛЭ. Дисперсия такого шума

$$\bar{u}_{гр}^2 = \frac{4i_\phi^2 R^2 \tau \Delta f}{N[1+(2\pi f\tau)^2]}, \quad /6.8/$$

где  $i_\phi$  - среднее значение фототока;  $\tau$  - время жизни носителей;  $N$  - общее число носителей.

Величина  $\bar{u}_{гр}^2$  постоянна до частот  $f < \frac{1}{2\pi\tau}$ , на более высоких частотах шум уменьшается.

3. Дробовый шум связан с флуктуациями числа электронов, эммитируемых фотокатодом, или числа носителей, проходящих через  $p-n$  переход. Дисперсия такого шума определяется по формуле Шоттки:

$$\bar{u}_{гр}^2 = 2eiR^2\Delta f, \quad /6.9/$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд электрона;  $i$  - суммарный ток /тепловой + фототок/.

4. Избыточный или токовый шум /шум  $\frac{1}{f}$ /. В отличие от указанных ранее шумов этот шум не является неустранимым, он зависит, в частности, от качества обработки и чистоты полупроводника. Для малой полосы пропускания  $\Delta f$  дисперсия шума  $\frac{1}{f}$  описывается выражением

$$\bar{u}_u^2 = A \frac{i_\phi^2 R^2}{f^\alpha} \Delta f, \quad /6.10/$$

где  $A = 10^{-11} \dots 10^{-13}$  постоянная для данного ПЛЭ величина;  $\alpha = 1,0 \dots 1,5$  - показатель степени.

Обычно с частот  $f = 500 \dots 1000$  Гц шум  $\frac{1}{f}$  становится значительно меньше других.

К внешним шумам ПЛЭ относятся:

1. Фотонный /радиационный/ шум, вызванный характером потока оптического излучения, падающего на ПЛЭ. Такой шум является принципиально неустранимым. Дисперсия фотонного шума для тепловых ПЛЭ может быть приближенно оценена по формуле

$$\bar{u}_\phi^2 = 8kS_1\beta A_1 T^5 \Delta f, \quad /6.11/$$

где  $k, \beta$  - постоянная соответственно Больцмана и Стефана - Больцмана;  $S_1$  - интегральная чувствительность к ИЛЭ с температурой  $T$ ;  $A_1$  - площадь излучающей поверхности ИЛЭ.

2. Температурный шум, возникающий при флуктуации температуры ПЛЭ вследствие статистической природы теплового обмена с окружающей средой. По аналогии с фотонным, дисперсию температурного шума оценивают формулой

$$\bar{u}_{темл}^2 = 8kS_2\beta A_2 T_2^5 \Delta f, \quad /6.12/$$

где  $S_2$  - чувствительность ПЛЭ к излучению АЧТ с температурой  $T_2$ , равной собственной температуре ПЛЭ;  $A_2$  - площадь поверхности ПЛЭ.

3. Микрофонный шум вызывается внешним механическим воздействием /удары, вибрации и т.п./ на ОЭП при эксплуатации прибора. Устраняется применением вибростойких радиоэлементов, амортизацией предусилителя, заливкой монтажа компаундом и т.д.

При расчете результирующего уровня шума исходят из предположения о статистической независимости всех шумов и складывают дисперсию отдельных шумов

$$\bar{u}_{ш}^2 = \bar{u}_r^2 + \bar{u}_{rp}^2 + \bar{u}_{gp}^2 + \bar{u}_u^2 + \bar{u}_\phi^2 + \bar{u}_{темл}^2 \quad /6.13/$$

Для различных типов ПЛЭ характерно преобладание одного-двух видов шумов над остальными. Поэтому, если специально не требуется оценивать значения других шумов ПЛЭ, при расчете шумов учитываются только основные.

Для вакуумных ПЛЭ основными шумами являются: тепловой на нагрузочном сопротивлении и дробовый. Для ФЭУ дисперсия дробового шума после определения в /6.9/ тока  $i$  может быть записана в виде

$$I \bar{u}_{gp}^2 = 2e i_{фк} \Delta f M^2 (1+B),$$

/6.14/

где  $i_{фк}$  - темновой ток фотокатода;  $M$  - коэффициент усиления ФЭУ ( $M = S_{ФЭУ} / S_{фк}$ ), где  $S_{ФЭУ}$  и  $S_{фк}$  - интегральные чувствительности соответственно ФЭУ и фотокатода;  $B$  - параметр, учитывающий дробовый эффект на диодах ФЭУ / $B = 1,5 \dots 3,0$ /.

Для фоторезисторов наиболее характерны тепловые, токовые и генерационно-рекомбинационные шумы. Поэтому для решения вопроса о том, какими шумами можно пренебречь, необходимо знать их спектральное распределение. Типичная зависимость  $\sqrt{\bar{u}_{ш}^2}$  от  $f$  для фоторезисторов показана на рис.6.2. До  $f_1 = 1 \text{ кГц}$  преобладает токовый шум, для  $1,0 \text{ кГц} < f < 10 \text{ кГц}$  - генерационно-рекомбинационный, а выше - тепловые и фотонные шумы. Последние необходимо учитывать при использовании глубокоохлаждаемых фоторезисторов. Для расчета шумов по формулам /6.7/-/6.9/ принимают  $R = R_T$ , где  $R_T$  - тепловое сопротивление фоторезистора.

Аналогично определяются шумы фотодиодов и фоторезисторов. В формулах /6.7/-/6.9/ необходимо принять  $R = R_g$ , где  $R_g$  - сопротивление основного полупроводника /базы/. В гальваническом режиме для фотодиодов принимают  $\bar{u}_u^2 = 0$ . Сопротивление базы очень зависит от температуры. В табл.6.1 приведены значения коэффициентов, позволяющих ориентировочно оценить степень уменьшения  $R_g$  для кремниевых и германиевых фотодиодов при повышении температуры.

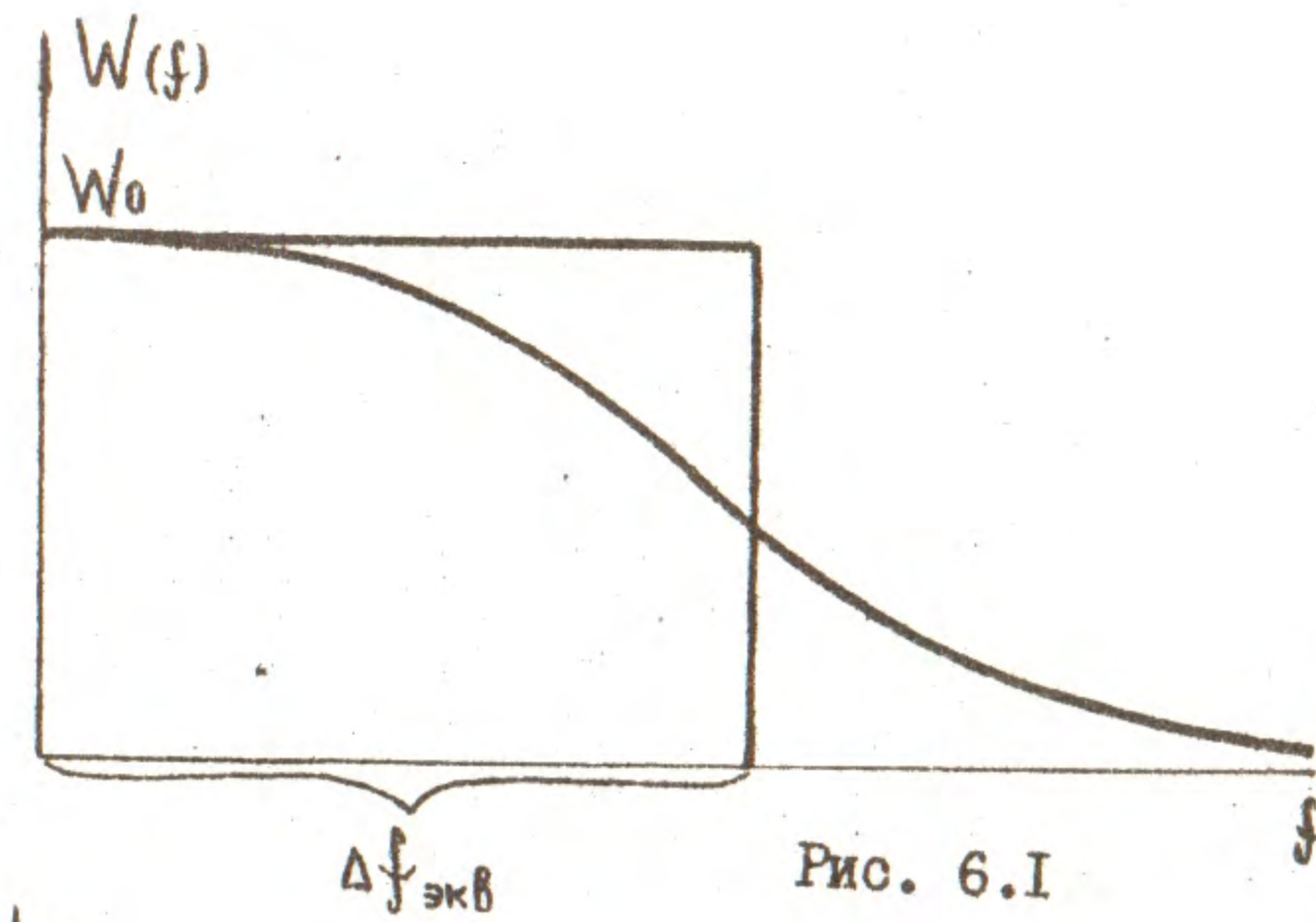


Рис. 6.1

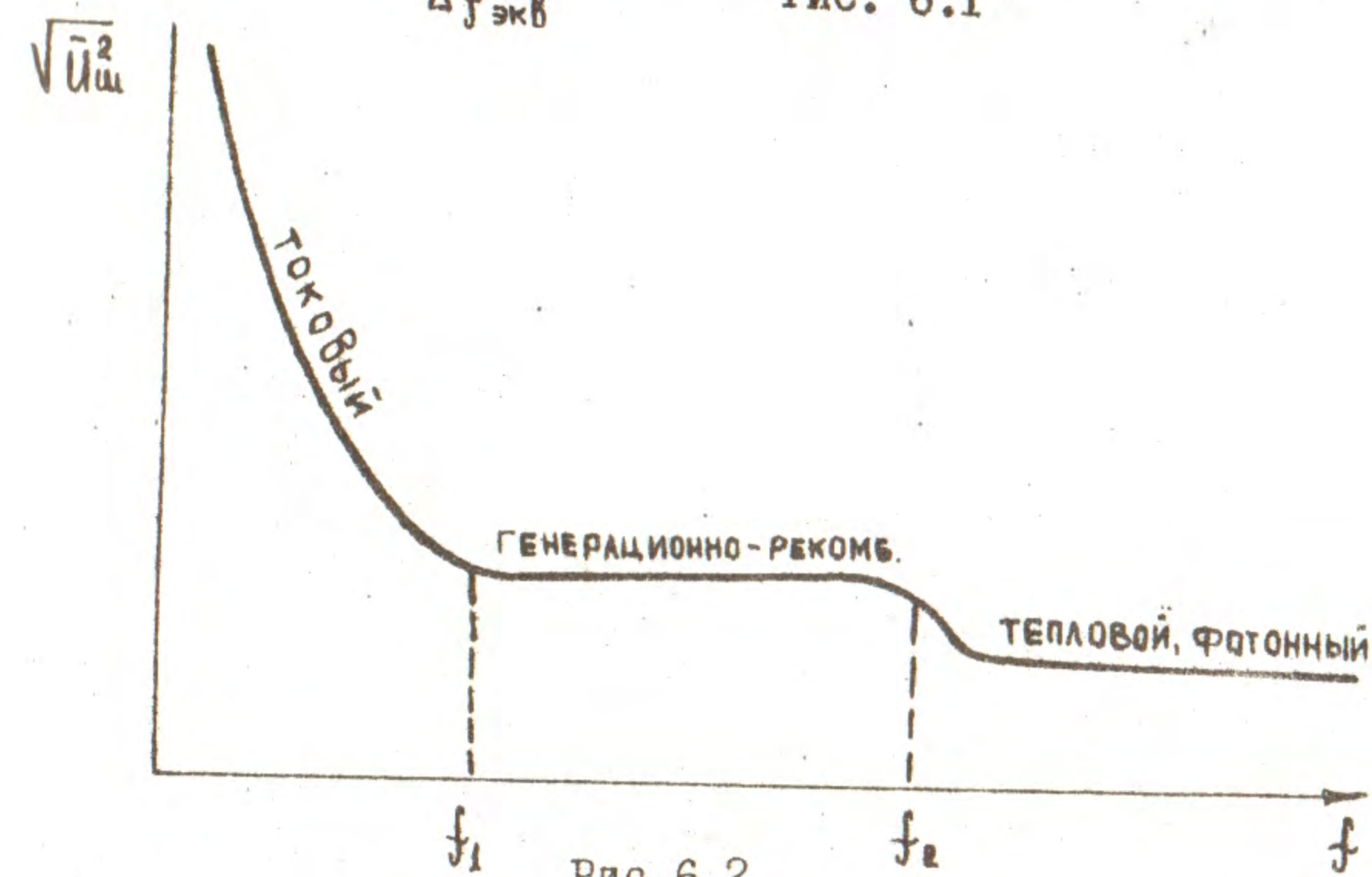


Рис. 6.2

Таблица 6.1

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	20	30	40	50
Ge	1,0	0,74	0,55	0,22	0,10	0,06	0,03
Si	1,0	0,84	0,72	0,46	0,30	0,21	0,15

## 2. Решение примеров

**Пример 6.1.** Определить эквивалентную шумовую полосу пропускания параллельной RC-цепочки, установленной на выходе ПЛЭ, для теплового шума.

**Решение.** Активная составляющая общего сопротивления RC-цепочки

$$R(f) = \frac{R}{1 + (2\pi fRC)^2}$$

Спектральная плотность теплового шума  $W(f) = 4kTR(f)$ ,

находим его дисперсию по /6.4/:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty W(f) df = 4kT \int_0^\infty R(f) df = 4kTR \int_0^\infty \frac{df}{1 + (2\pi fRC)^2} = \frac{4kTR}{4RC}$$



Сравнивая полученное выражение с зависимостью /6.7/

$$\sigma^2 = 4kTR\Delta f,$$

находим для RC-цепочки

$$\Delta f_{3\phi} = \frac{1}{4RC} = \frac{1}{4\tau}.$$

**Пример 6.2.** Рассчитать среднеквадратичное значение тока теплового шума фотодиода ФД-ЮГ при комнатной температуре  $T = 293$  К/ и при температуре  $T = 313$  К, если известно, что сопротивление базы при  $T = 293$  К равно  $3 \cdot 10^5$  Ом. Диапазон рабочих частот ОЭП: нижний предел -  $f_H = 400$  Гц, верхний предел -  $f_B = 5000$  Гц.

**Решение.** Из формулы /6.7/ находим

$$\sqrt{i_T^2} = \frac{\sqrt{\bar{u}_T^2}}{R_B} = \sqrt{\frac{4kT}{R_B} \Delta f}, \quad \Delta f = f_B - f_H.$$

При  $T = 293$  К

$$\sqrt{i_T^2} = \left[ \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 / (5000 - 400)}{3 \cdot 10^5} \right]^{1/2} = 1,57 \cdot 10^{-11} \text{ А.}$$

При  $T = 313$  К сопротивление базы уменьшилось /см. табл. 6.1/ в  $\frac{0,22}{0,06} = 3,67$  раза и составляет  $R_B' = 3 \cdot 10^5 / 3,67 = 8,2 \cdot 10^4$  Ом.

Следовательно,

$$\sqrt{i_T^2} = \left[ \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 313 / (5000 - 400)}{8,2 \cdot 10^4} \right]^{1/2} = 3,11 \cdot 10^{-11} \text{ А.}$$

При нагреве германиевого фотодиода ФД-ЮГ от 20 до 40 °С тепловые шумы увеличились почти в 2 раза. Для кремниевого фотодиода ФД-ЭК, имеющего сопротивление базы при  $T = 293$  К  $R_B = 1$  МОм, при тех же условиях получим увеличение теплового шума в 1,53 раза.

**Пример 6.3.** На ПЛЭ падает полезный поток  $5 \cdot 10^{-6}$  Вт и шумовой поток /фотонный шум, рассеяние в среде и т.п./, который составляет  $8 \cdot 10^{-7}$  Вт. Определить коэффициент шума ПЛЭ, если известно, что суммарный шум на выходе ПЛЭ равен 1,6 мкВ, и интегральная чувствительность ПЛЭ к излучению данного ИЛЭ равна 350 мВ/Вт.

**Решение.** Считая, что в указанных диапазонах потоков ПЛЭ имеет линейную световую характеристику, определим отношения сигнал/шум по мощности на входе ПЛЭ

$$\left( \frac{C}{\Psi} \right)_{вх} = \left( \frac{\Phi_{пол}}{\Phi_{ш}} \right)^2 = \left[ \frac{5 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-7}} \right]^2 = 39,06.$$

Полезный сигнал на выходе ПЛЭ

$$U_{пол} = S \Phi_{пол} = 350 \cdot 10^{+3} \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 1,75 \text{ мкВ.}$$

При уровне шумов 1,60 мкВ отношение сигнал/шум по мощности на выходе ПЛЭ

$$\left( \frac{C}{\Psi} \right)_{вых} = \frac{U_{пол}^2}{U_{ш}^2} = \left( \frac{1,75}{1,60} \right)^2 = 1,18.$$

С другой стороны, сигнал/шум по мощности на выходе ПЛЭ можно представить

$$\left( \frac{C}{\Psi} \right)_{вых} = \frac{P_{с\text{вых}}}{P_{ш\text{вых}} + P_{ш\text{доп}}},$$

где  $P_{ш\text{доп}}$  - дополнительная мощность шума /мощность шумов, вносимых самим ПЛЭ/. Учитывая, что

$$\frac{P_{с\text{вых}}}{P_{ш\text{вых}}} = \frac{P_{с\text{вх}}}{P_{ш\text{вх}}} = \left( \frac{C}{\Psi} \right)_{вх}, \text{ получаем}$$

$$\frac{1}{\left( \frac{C}{\Psi} \right)_{вых}} = \frac{P_{ш\text{вх}} + P_{ш\text{доп}}}{P_{ш\text{вх}}} = \frac{1}{\left( \frac{C}{\Psi} \right)_{вх}} \left[ 1 + \frac{P_{ш\text{доп}}}{P_{ш\text{вх}}} \right].$$

Согласно /6.6/ можно записать

$$F = 1 + \frac{P_{ш\text{доп}}}{P_{ш\text{вх}}},$$

поэтому коэффициент шума можно определить в виде отношения

$$F = \frac{\left( \frac{C}{\Psi} \right)_{вх}}{\left( \frac{C}{\Psi} \right)_{вых}} = \frac{39,06}{1,18} = 32,88 \text{ или } 1,5 \text{ дБ.}$$

3. Задание для самостоятельной работы

**Задача 6.1.** По исходным данным примера 5.3 провести выбор ПЛЭ по максимуму отношения сигнал/шум. Размер изучаемой площадки АЧТ-ЮхЮ м, удаление от ПЛЭ - 500 м, коэффициент серости излучателя  $\xi = 0,80$ . Данные для расчета шумов приведены в табл. 6.2.

Частотный диапазон ОЭП:  $f_H = 100$  Гц,  $f_B = 20000$  Гц. В вариантах, помеченных звездочкой, рассчитать фотонный и температурный шумы.

Таблица 6.2

Номер варианта	Исходные данные для расчета шумов ПЛЭ	Размеры площадки ПЛЭ, мм
1	$M = 10^6$ , $B = 1,5$ , $i_{фк} = 5 \cdot 10^{-8}$ А,	* $\alpha = 39$
2	$M = 0,5 \cdot 10^6$ , $B = 2,5$ , $i_{фк} = 1 \cdot 10^{-8}$ А,	* $\alpha = 22$
3	$M = 0,3 \cdot 10^6$ , $B = 3,0$ , $i_{фк} = 5 \cdot 10^{-7}$ А,	* $\alpha = 80$
4	$R_{\delta} = 10^6$ Ом, $A = 10^{-13}$ , $\alpha = 1,0$	1,5x1,5
5	$R_{\delta} = 8 \cdot 10^5$ Ом, $A = 5 \cdot 10^{-12}$ , $\alpha = 1,5$ , $U = 10$ В,	1x1
6	$R_{темн} = 3 \cdot 10^6$ Ом, $A = 10^{-11}$ , $\alpha = 1,2$ , $U = 10$ В,	4,5x4,5
7	$R_{темн} = 2 \cdot 10^6$ Ом, $A = 5 \cdot 10^{-11}$ , $\alpha = 1,3$ , $U_{плт} = 220$ В,	3,5x3,5
8	$R_{темн} = 10^6$ Ом, $A = 10^{-12}$ , $\alpha = 1,4$ , $U_{плт} = 50$ В,	2x2
9	$R_{темн} = 2 \cdot 10^6$ Ом, $A = 10^{-13}$ , $\alpha = 1,5$ , $U_{плт} = 30$ В	3x3
10	$R_{темн} = 3 \cdot 10^7$ Ом, $A = 5 \cdot 10^{-13}$ , $\alpha = 1,5$ , $U_{плт} = 15$ В	2,8x5
11	$M = 10^6$ , $B = 2,0$ , $i_{фк} = 5 \cdot 10^{-9}$ А	* $\alpha = 52$
12	$M = 0,5 \cdot 10^6$ , $B = 2,5$ , $i_{фк} = 1 \cdot 10^8$ А	* $\alpha = 80$
13	$R_{темн} = 10^7$ Ом, $A = 10^{-11}$ , $\alpha = 1,0$ , $U_{плт} = 60$ В	4x4
14	$R_{темн} = 2 \cdot 10^7$ Ом, $A = 5 \cdot 10^{-12}$ , $\alpha = 1,2$ , $U_{плт} = 100$ В	5x4
15	$R_{темн} = 2,5 \cdot 10^6$ , $A = 5 \cdot 10^{-13}$ , $\alpha = 1,1$ , $U_{плт} = 50$ В	* 2x2
16	$R_{темн} = 1,5 \cdot 10^6$ , $A = 10^{-12}$ , $\alpha = 1,4$ , $U_{плт} = 100$ В	* 1,5x1,5
17	$R_{темн} = 0,8 \cdot 10^6$ , $A = 10^{-11}$ , $\alpha = 1,5$ , $U_{плт} = 45$ В	* 3x3
18	$R_{\delta} = 10^6$ Ом, $A = 10^{-13}$ , $\alpha = 1,2$ , $U_{плт} = 10$ В	1x1
19	$R_{\delta} = 5 \cdot 10^5$ Ом, $A = 5 \cdot 10^{-13}$ , $\alpha = 1,0$ , $U_{плт} = 10$ В	3x3
20	$R_{\delta} = 10^6$ Ом, $A = 10^{-12}$ , $\alpha = 1,4$ , $U_{плт} = 27$ В	5x5
21	$R_{\delta} = 4 \cdot 10^5$ Ом, $A = 5 \cdot 10^{-12}$ , $\alpha = 1,3$ , $U_{плт} = 20$ В	2x2
22	$R_{темн} = 10^4$ Ом, $A = 5 \cdot 10^{-11}$ , $\alpha = 1,0$ , $U_{плт} = 50$ В	* 1,5x1,5
23	$R_{темн} = 2 \cdot 10^3$ Ом, $A = 5 \cdot 10^{-12}$ , $\alpha = 1,3$ , $U_{плт} = 100$ В	* 2x2
24	$R_{темн} = 4 \cdot 10^3$ Ом, $A = 10^{-13}$ , $\alpha = 1,5$ , $U_{плт} = 120$ В	* 1x1
25	$R_{темн} = 5 \cdot 10^6$ Ом, $A = 10^{-11}$ , $\alpha = 1,2$ , $U_{плт} = 100$ В	* 2x2
26	$R_{темн} = 4 \cdot 10^3$ Ом, $A = 10^{-12}$ , $\alpha = 1,4$ , $U_{плт} = 50$ В	* 1x1

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

## ПОРОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЭ

Цель занятия - приобрести навыки расчета порогового потока и пороговой чувствительности ПЛЭ, закрепить знания лекционного материала.

## Основные задачи:

- 1/ повторить основные пороговые характеристики ПЛЭ: пороговый поток, пороговая чувствительность, обнаружительная способность.
- 2/ ознакомиться с методикой расчета пороговых характеристик ПЛЭ и учета их влияния на точностные и энергетические параметры ОЭП.

## I. Общие положения

Минимальная мощность излучения, которая еще может быть обнаружена данным ПЛЭ, называется порогом чувствительности  $\Phi_n$  (Вт) или пороговой чувствительностью ПЛЭ. Эта мощность, воздействуя на приемник, вызывает появление сигнала  $U_n$ , превышающего среднеквадратичное значение шума  $\sqrt{\bar{u}_ш^2}$  в определенное число раз  $\mu$ , обеспечивающее уверенное обнаружение сигнала.

Так как

$$U_n = S \Phi_n, \quad /7.1/$$

где  $S$  - чувствительность ПЛЭ, зависящая в общем случае от длины волны падающего излучения  $\lambda$  и частоты модуляции потока  $f$ , а по определению

$$U_n = \mu \sqrt{\bar{u}_ш^2} = \mu \sqrt{W(f) \Delta f}, \quad /7.2/$$

где  $W(f)$  - спектральная плотность шума;  $\Delta f$  - шумовая полоса пропускания, то

$$\Phi_n = \frac{\mu \sqrt{W(f) \Delta f}}{S}. \quad /7.3/$$

Коэффициент  $\mu$  /отношение сигнал/шум/ может быть различным, в зависимости от способа измерения и вида полезного сигнала ПЛЭ.

Для того чтобы исключить неопределенность в выборе  $\mu$ , обычно полагают  $\mu = 1$ . В этом случае порог чувствительности называют поро-

говым потоком ПЛЭ в заданной полосе частот  $\Phi_n$ . В соответствии с ГОСТ 19852-74 он определяется как среднеквадратичное значение действующего на фотоприемник синусоидально-модулированного потока излучения, при котором среднеквадратичное значение фотосигнала равно среднеквадратичному значению шума в заданной полосе частот.

Так как пороговый поток представляет собой мощность, эквивалентную мощности шума, его также называют эквивалентной мощностью шума /ЭМШ, в иностранной литературе - *NEP* от *Noise Equivalent Power*.

Поскольку величина  $\Phi_n$  зависит от ширины полосы пропускания  $\Delta f$ , то для сравнения пороговых потоков принимают  $\Delta f = 1$  Гц:

$$\Phi_{n1} = \frac{\Phi_n}{\sqrt{\Delta f}}, \quad /7.4/$$

где  $\Phi_{n1}$  - пороговый поток в единичной полосе частот, Вт/Гц<sup>-1/2</sup>. Кроме того, величина  $\Phi_n$  для большинства ПЛЭ прямо пропорциональна корню квадратному из площади чувствительного слоя ПЛЭ  $A$ /см<sup>2</sup>, поэтому  $\Phi_n$  нормируют также и по  $\sqrt{A}$ , Вт/см·Гц<sup>1/2</sup>:

$$\Phi_n^* = \frac{\Phi_{n1}}{\sqrt{A}} = \frac{\Phi_n}{\sqrt{A \Delta f}}. \quad /7.5/$$

Величину  $\Phi_n^*$  называют удельным пороговым потоком ПЛЭ. Так как улучшение характеристики ПЛЭ связано с уменьшением  $\Phi_n$ , то для сравнения ПЛЭ часто оказывается более удобным использование величин, обратных  $\Phi_n$ . Такая характеристика ПЛЭ называется обнаружительной способностью *|detectivity|*, Вт<sup>-1</sup>:

$$D = \frac{1}{\Phi_n}. \quad /7.6/$$

Более широкое распространение, особенно для ПЛЭ среднего и дальнего диапазона ИК-излучения, получила удельная обнаружительная способность, Вт<sup>-1</sup>·см·Гц<sup>1/2</sup>:

$$D^* = \frac{1}{\Phi_n^*} = \frac{S \sqrt{A \Delta f}}{\sqrt{A_w^2}}. \quad /7.7/$$

Длина волны  $\lambda$  обычно выбирается соответствующей максимуму спектральной чувствительности ПЛЭ  $\lambda_m$ . Если пороговый поток определяется не для монохроматического излучения, а по отношению к излучению АЧТ, то он называется интегральным. Соотношения между спектральным  $\Phi_{n\lambda}$

и интегральным  $\Phi_n$  пороговыми потоками определяется коэффициентом использования потока излучения  $\xi_p$  данным ПЛЭ и его относительной спектральной чувствительностью  $\xi_\lambda$ :

$$\xi \Phi_n = \xi_\lambda \Phi_{n\lambda}. \quad /7.8/$$

При расчете  $\Phi_n$  от реального излучателя по аналогии с расчетом  $S_p$  необходимо определить коэффициенты использования  $\xi_p$  и  $\xi_\lambda$  от реального и эталонного излучателей:

$$\Phi_{np} = \Phi_{n\lambda} \frac{\xi_\lambda}{\xi_p}, \quad /7.9/$$

где  $\Phi_{n\lambda}$  - пороговый поток по эталонному ИЛЭ.

Для пересчета  $\Phi_n$  из световых единиц в энергетические и наоборот необходимо пересчитать интегральные чувствительности ПЛЭ из одних величин в другие или воспользоваться зависимостями:

$$\Phi_{np} = \frac{\Phi_{n\lambda}^c \xi_\lambda}{683 \eta_\lambda \xi_p}, \quad /7.10/$$

$$\Phi_{np}^c = \Phi_\lambda^c \frac{\xi_\lambda \eta_p}{\xi_p \eta_\lambda}, \quad /7.11/$$

$$\Phi_{np}^c = \frac{\Phi_\lambda \xi_p}{683 \eta_p \xi_\lambda}, \quad /7.12/$$

где  $\eta_\lambda$ ,  $\eta_p$  - коэффициенты использования глазом лучистого потока соответственно эталонного и реального излучателя.

## 2. Решение примеров

**Пример 7.1.** По данным примера 5.2 построить график спектральной пороговой чувствительности фотодиода ФД-19КК, работающего совместно со светодиодом АЛ-107Б, если известно  $D^* = 5 \cdot 10^{10}$  см·Гц/Вт, размер площадки  $4 \times 1$  мм<sup>2</sup>, полоса частот  $\Delta f = 100$  Гц.

Решение. По формулам /7.5/ и /7.6/ находим

$$\Phi_n = \frac{\sqrt{\Delta f}}{D^*} = \frac{10^{-1} \cdot 4 \cdot 100}{5 \cdot 10^{10}} = 0,4 \cdot 10^{-10} \text{ Вт.}$$

Для построения графика  $\Phi_{\lambda n}(\lambda)$  используем формулу /7.8/  $\Phi_{\lambda n} = \Phi_n \cdot R_p / S_\lambda$  и значения  $R_p$  и  $S_\lambda$  из примера 5.2.

График спектральной пороговой чувствительности фотодиода ФД-19КК показан на рис.7.1.

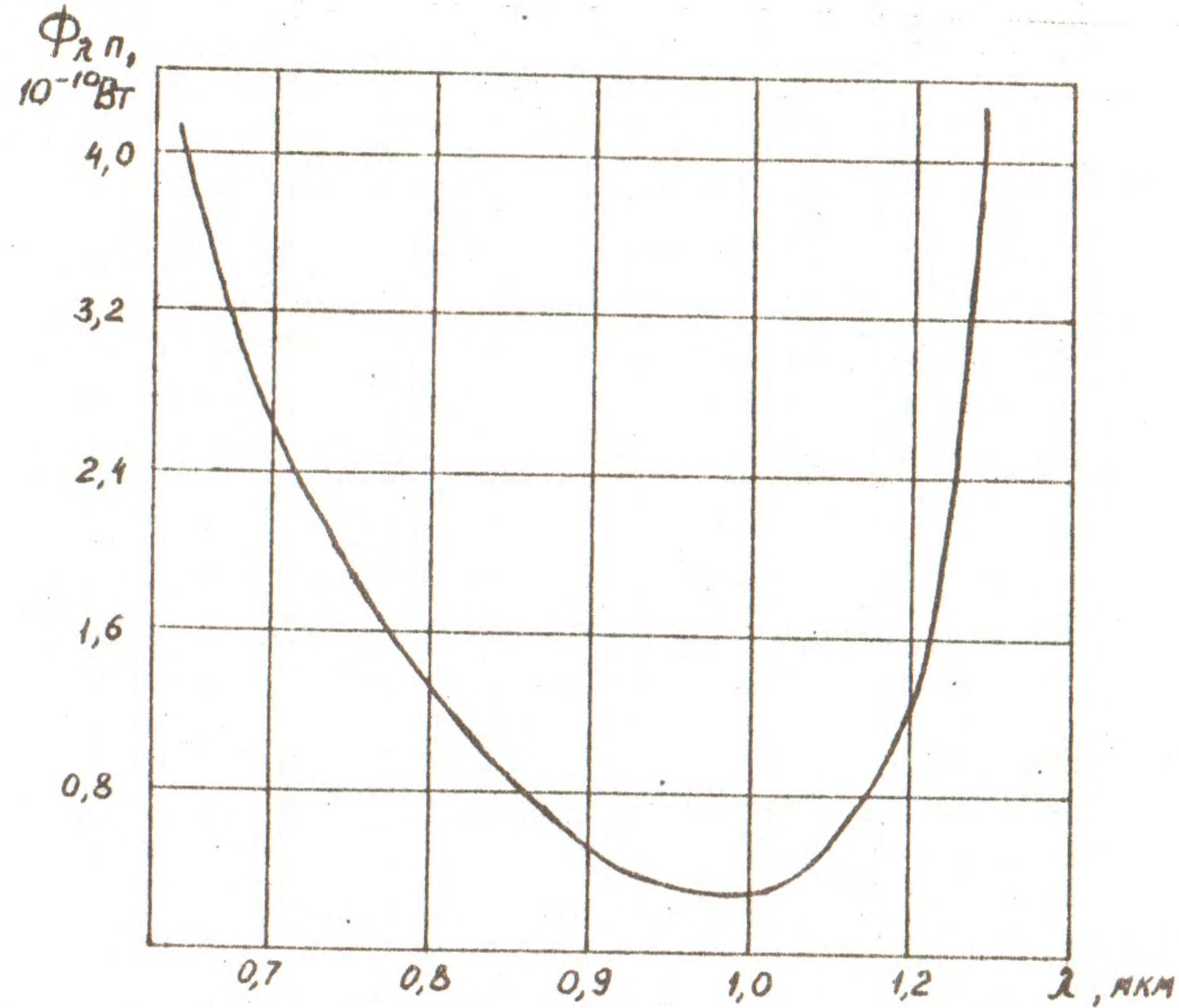


Рис.7.1

Пример 7.2. На рис.7.2,а изображена упрощенная схема фотоэлектрического автоколлиматора. Определить угловое разрешение автоколлиматора исходя из следующих условий:

- ИЛЭ - светодиод АЛ-107А /  $\Phi = 1 \text{ мВт} / 1/2 \text{ -1}$ ;
- ПЛЭ - фотодиод ФД-155К /  $D^* = 5 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ;
- диаметр чувствительной площадки  $d = 4 \text{ мм}$ ;
- фокусное расстояние объектива  $f' = 25 \text{ мм}$ ;
- коэффициент отражения контролируемой поверхности  $\rho = 0,55$ ;
- КПД осветителя  $\zeta_k = 0,05$ ;

коэффициент пропускания объектива  $\zeta_o = 0,90$ ;  
 полоса пропускания электронной системы  $\Delta f = 100 \text{ Гц}$ ;  
 диаметр изображения диафрагмы в плоскости ПЛЭ  $d_n = 4 \text{ мм}$ .

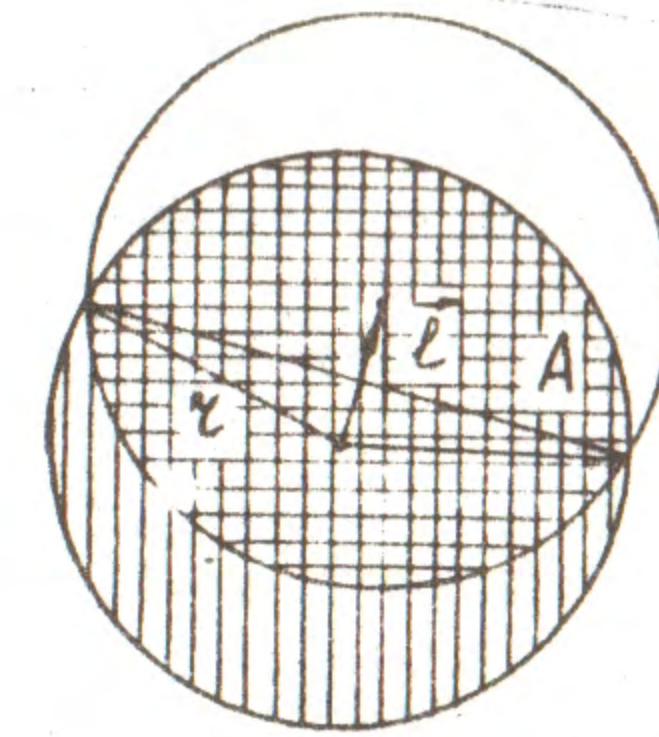
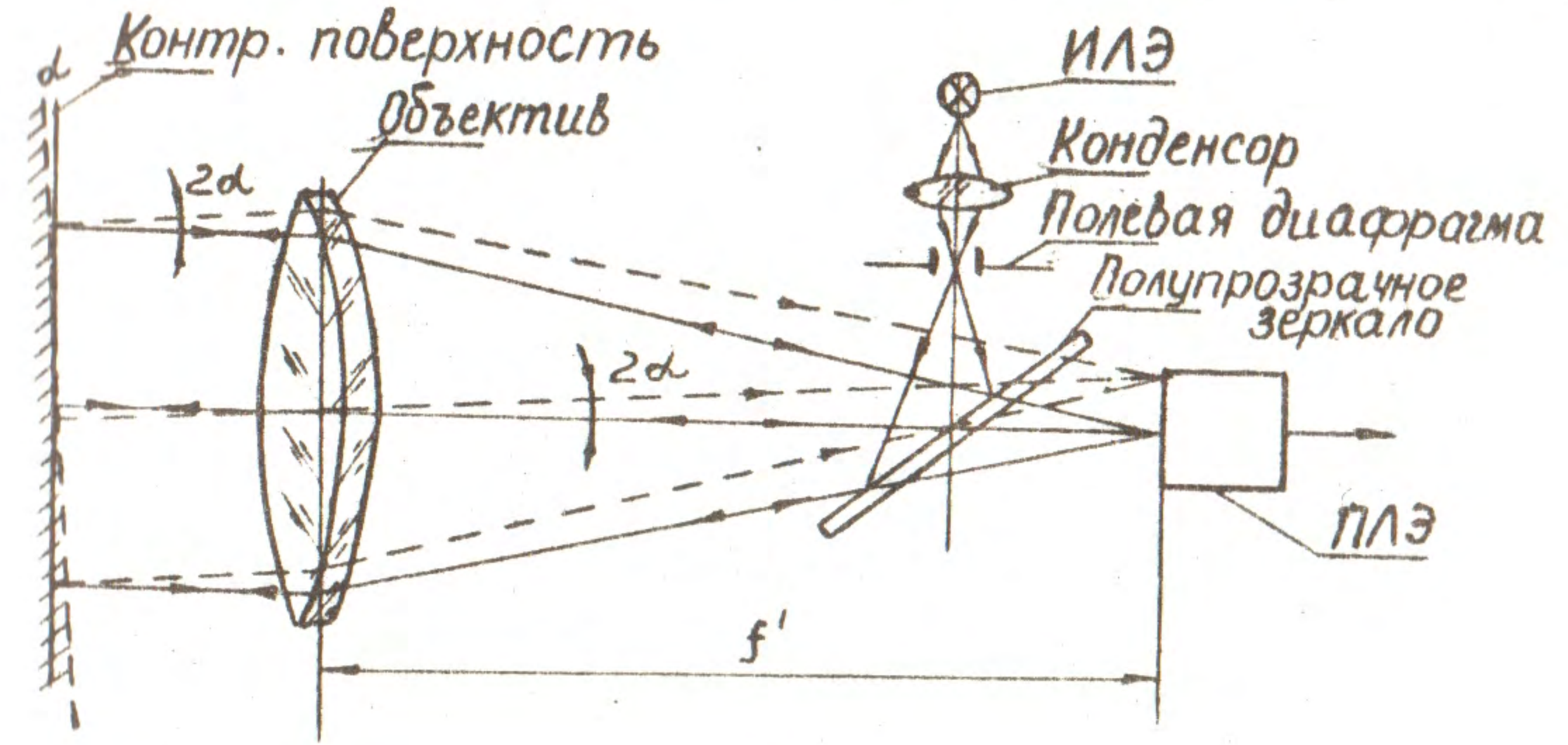


Рис.7.2

Решение. Из рис.7.2,а видно, что поворот контролируемой поверхности на угол  $\alpha$  приводит к смещению изображения диафрагмы в плоскости ПЛЭ на величину  $l \approx 2\alpha f'$ .

Так как в исходном состоянии /поверхность расположена перпендикулярно к оси автоколлиматора/ изображение диафрагмы точно совпадает с чувствительной площадкой ПЛЭ, смещение изображения на величину  $l$  приведет к изменению величины падающего на ПЛЭ потока из-за того, что часть площадки ПЛЭ окажется незасвеченной /рис.7.2,б/. Определим площадь части чувствительной площадки ПЛЭ, на которую падает излучение. Из рис.7.2,б можно получить

$$A(l) = 2r^2 \alpha \cos \frac{l}{2r} - \frac{l}{2} \sqrt{4r^2 - l^2},$$

где  $r$  - радиус площадки ПЛЭ,  $r = \frac{d_n}{2} = 2 \text{ мм}$ .

Раскладывая в ряд по  $\ell$  функцию  $A(\ell)$  и ограничиваясь двумя первыми членами разложения, находим

$$A(\ell) \approx \pi \varepsilon^2 - \frac{1}{2} \varepsilon \ell.$$

Таким образом, изменение лучистого потока, падающего на ПЛЭ, вызванное угловым смещением контролируемой поверхности:

$$\Delta \Phi = \frac{E \varepsilon \ell}{2},$$

где  $E$  - облученность ПЛЭ,  $E = \frac{\varepsilon \Phi}{\pi \varepsilon^2}$ ;  $\varepsilon$  - суммарный коэффициент пропускания автоколлиматора. /7.13/

Потери излучения в автоколлиматоре составят /без учета потерь на поглощение в полупрозрачном зеркале/:

$$\varepsilon = \varepsilon_k \varepsilon_0^2 \rho \cdot 0,5^2 = 0,05 \cdot 0,9^2 \cdot 0,55 \cdot 0,25 = 5,5 \cdot 10^{-3}.$$

Очевидно, что наименьшее  $\ell$ , а следовательно и  $\alpha$ , может быть зарегистрировано в том случае, если

$$\Delta \Phi = \Phi_n.$$

На основании /7.5/, /7.6/ и /7.13/ записываем

$$\frac{\varepsilon \Phi \varepsilon 2 f' \alpha}{2 \pi \varepsilon^2} = \frac{\sqrt{A \Delta f}}{D^*} = \frac{\varepsilon \sqrt{\pi \Delta f}}{D^*},$$

откуда

$$\alpha = \frac{\pi \varepsilon^2 \sqrt{\pi \Delta f}}{\varepsilon \Phi f' D^*} = \frac{3,14 \cdot 2^2 \cdot 3,14 \cdot 100}{5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 5 \cdot 10^{-11}} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ рад} = 0,66 \text{ угл. с.}$$

### 3. Задание для самостоятельной работы

**Задача 7.1.** По данным примеров 5.3 и 6.5 определить  $\Phi_n$  и построить график спектрального порогового потока ПЛЭ, оказавшегося лучшим после расчета шумов и пересчета чувствительности.

**Задача 7.2.** Для контроля положения диска-носителя в оптико-механическом запоминающем устройстве разрабатывается оптронный коаксиальный датчик перемещения /рис.7.3/.

Определить линейное разрешение датчика и диапазон регистрируемых перемещений исходя из условий, приведенных в табл.7.1. Индикатриса излучения ИЛЭ

$$I(\varphi) = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где  $I_0$  - осевая сила излучения;  $\varphi$  - угол между осью симметрии тела излучения и направлением, в котором измеряется сила излучения  $I$ . Излучатель - кристалл  $GaAs$ , приемник - пленка  $Si$ . Кривые  $\Phi_\lambda$  и  $S_\lambda$  изображены на рис.5.3. Контролируемая поверхность зеркальная, коэффициент отражения  $\rho = 0,85$ .

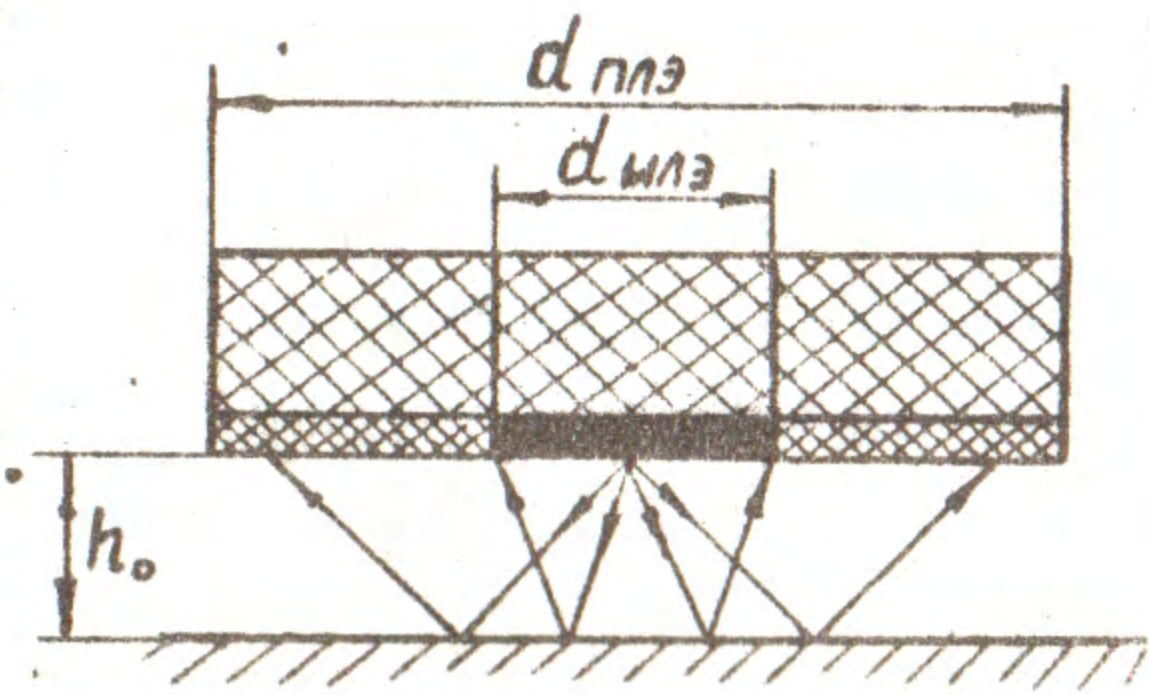


Рис.7.3

Рабочий диапазон определяется следующим условием: крутизна выходной характеристики датчика на границе диапазона в  $m$  раз меньше крутизны в исходном состоянии  $/h = h_0/$ . Выходная характеристика датчика - зависимость сигнала на выходе ПЛЭ /потока, падающего на ПЛЭ/ от зазора  $h$ .

Контрольный расчет для 26-го варианта:

$$\Delta h = 0,66 \text{ мкм}; \text{ рабочий диапазон } h = 2,0 \text{ мм.}$$

Таблица 7.1

Номер вариан-та	$d_{плэ}, \text{ мм}$	$d_{плэ}, \text{ мм}$	$h_0, \text{ мм}$	$\Phi_{плэ}, \text{ мВт}$	$\Phi_n^*, \text{ Вт}$	$n$	$m$
та	мм	мм	мм	мВт	см. П. 6.10 <sup>10</sup>		
1	0,5	3,0	0,5	1,0	0,5	2	10
2	0,6	3,1	0,6	2,0	0,8	3	20
3	0,7	3,2	0,7	3,0	0,6	4	15
4	0,8	3,3	0,8	4,0	0,9	5	10
5	0,9	3,4	0,9	5,0	1,2	6	20
6	1,0	3,5	1,0	1,0	1,5	7	25
7	1,1	3,6	0,5	2,0	2,0	8	25
8	1,2	3,7	0,6	3,0	0,4	2	10
9	1,3	3,8	0,7	4,0	0,7	3	15
10	1,4	3,9	0,8	5,0	0,8	4	20
11	1,5	4,0	0,9	1,0	1,2	5	20
12	1,6	3,0	1,0	2,0	1,0	6	30
13	1,7	3,1	1,1	3,0	2,5	7	30
14	1,8	3,2	1,2	4,0	3,0	8	40
15	1,9	3,3	1,3	5,0	0,4	2	10
16	2,0	3,4	1,4	1,0	0,9	3	25

Г	2	3	4	5	6	7	8
17	1,9	3,5	1,5	2,0	1,8	4	15
18	1,8	3,6	0,5	3,0	1,7	5	5
19	1,7	3,7	0,6	4,0	0,3	6	10
20	1,6	3,8	0,7	1,0	0,5	7	20
21	1,5	3,9	0,8	2,0	0,4	8	30
22	1,4	4,0	0,9	3,0	1,8	2	20
23	1,3	3,0	1,0	4,0	1,3	3	25
24	1,2	3,1	1,1	5,0	2,4	4	40
25	1,1	3,2	1,2	6,0	2,2	5	10
26	2,0	4,0	0	5,0	2,0	2	20

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 8

#### ИНЕРЦИОННОСТЬ ПЛЭ

Цель занятия – приобрести навыки учета инерционных свойств приемников излучения, расчета выходного сигнала ПЛЭ и искажения его формы, закрепить знания лекционного материала.

#### Основные задачи:

- 1/ повторить теоретический материал: постоянная времени ПЛЭ, частотная характеристика ПЛЭ, искажение сигнала в ПЛЭ, расширение частотного диапазона фотоэлектрической цепи;
- 2/ ознакомиться с методами определения постоянной времени ПЛЭ, построить частотные характеристики ПЛЭ;
- 3/ решить примеры и задачи.

#### 1. Общие положения

При мгновенном увеличении /уменьшении/ лучистого потока, падающего на ПЛЭ, выходной сигнал ПЛЭ достигает значения, соответствующего установившейся силе потока не сразу, а через некоторый промежуток времени, называемый временем нарастания /спада/ сигнала.

Для большинства ПЛЭ /фоторезисторы, фотодиоды, вакуумные фотоэлементы/ время нарастания и время спада близки настолько, что их считают одинаковыми и равными постоянной времени ПЛЭ. Для таких ПЛЭ, как электронно-оптические преобразователи, время нарастания сигнала составляет  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с, а время спада – от нескольких секунд до нескольких часов. В этом случае при учете динамических свойств ПЛЭ рассматривают постоянные времени нарастания  $\tau_n$  и спада  $\tau_c$ .

Под постоянной времени ПЛЭ понимают промежуток времени от момента изменения лучистого потока до момента времени, когда сигнал ПЛЭ принимает значение в  $e$  раз меньше исходного.

Кроме постоянной времени инерционность ПЛЭ численно оценивается по граничной частоте пропускания /частота среза/ ПЛЭ, определяемой из частотной характеристики приемника излучения. Частотная характеристика /ЧХ/ ПЛЭ – зависимость относительной чувствительности ПЛЭ от частоты модуляции потока излучения.

Постоянная времени  $\tau$  и граничная частота  $f_0$  связаны между собой соотношением

$$2\pi f_0 \tau = 1.$$

/8.1/

Наиболее простой эквивалент ПЛЭ с точки зрения его ЧХ – апериодическое звено. Амплитудно-частотная характеристика такого звена

$$K(f) = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi f \tau)^2}}$$

/8.2/

При  $f = \frac{1}{2\pi\tau}$   $K(f) = \frac{1}{\sqrt{2}}$ , а так как при этом согласно /8.1/  $f = f_0$ , то из последнего следует, что граничная частота – это частота, при которой амплитуда сигнала уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению со значением на низкой частоте.

Постоянная времени ПЛЭ зависит от режима включения ПЛЭ и условий его работы. Так фотодиоды в диодном режиме включения оказываются на порядок более быстродействующими по сравнению с фотодиодами, работающими в гальваническом режиме. Граничная частота пропускания в свою очередь тем выше, чем больше облученность ПЛЭ. Влияние фона на быстродействие ПЛЭ неоднозначно: при подсвете ПЛЭ фоном, спектральный диапазон которого находится в сине-зеленой и ультрафиолетовой областях спектра постоянная времени ПЛЭ уменьшается, и наоборот, если спектральный диапазон фона находится в красной и ИК-областях спектра – постоянная времени ПЛЭ увеличивается.

Наибольшим быстродействием отличаются вакуумные ПЛЭ /фотоэлементы, ФЭУ, ФЭК и т.п./, постоянная времени которых составляет  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с, быстродействующими являются германиевые фотодиоды /  $\tau = 10^{-6} \dots 10^{-7}$  с/, а для кремниевых фотодиодов  $\tau = 10^{-5} \dots 10^{-6}$  с. Весьма инерционны большинство фоторезисторов /  $\tau = 10^{-3} \dots 10^{-4}$  с/, особенно охлаждаемых

до температуры жидкого азота и ниже  $\tau = 10^{-2}$  с, а также тепловые ПЛЭ, для которых  $\tau = 10^{-1} \dots 10^{-2}$  с.

Для обеспечения необходимого быстродействия ПЛЭ в фотоэлектрическую цепь включают дифференцирующее звено /рис.8.1/.

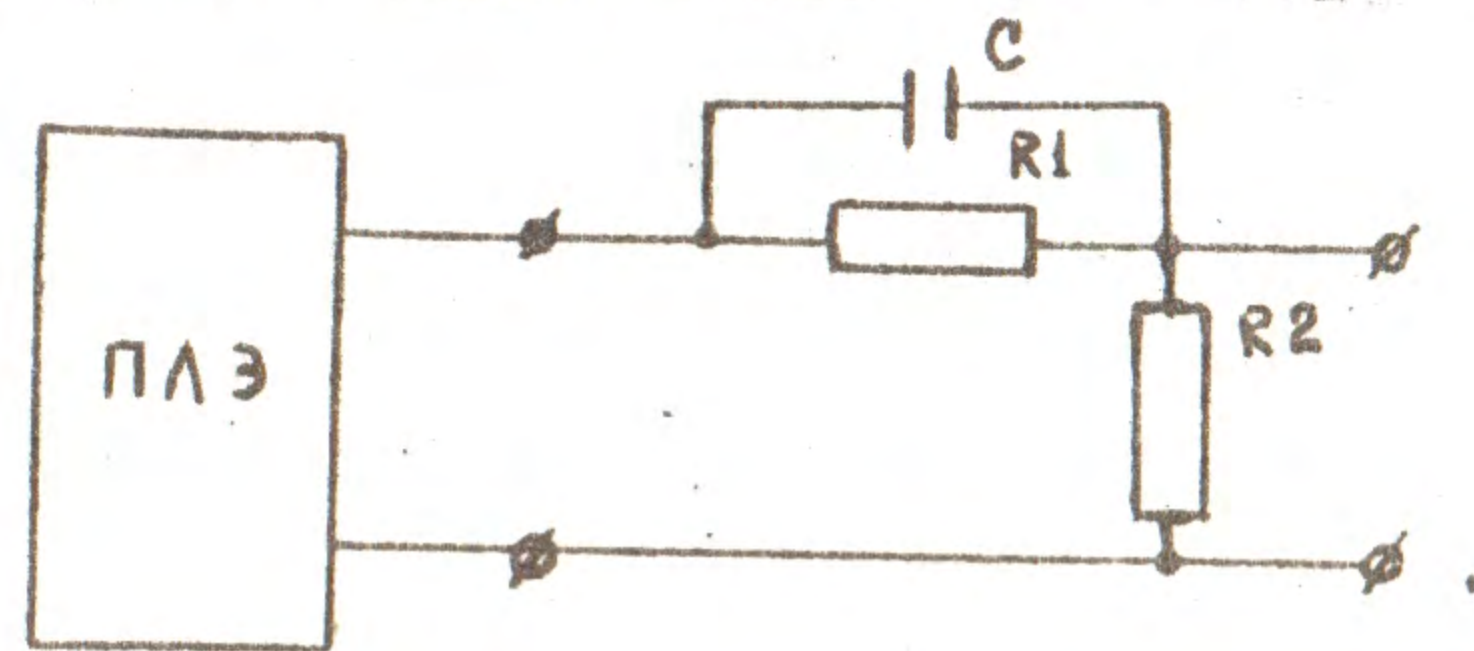


Рис.8.1

Если выбрать постоянную времени такого звена  $\tau_g = R, C$ , равной постоянной времени ПЛЭ  $\tau$ , то результирующая амплитудно-частотная характеристика системы "ПЛЭ + дифференцирующее звено" запишется в виде

$$K_z(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f \tau}{a}\right)^2}} \cdot \frac{1}{a}, \text{ где } a = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad /8.3/$$

Такая АЧХ соответствует апериодическому звену с постоянной времени, меньшей по сравнению с  $\tau$  в  $a$  раз. Уменьшение в  $a$  раз коэффициента передачи на всем частотном диапазоне можно скомпенсировать увеличением общего коэффициента усиления электронного тракта.

Как любая динамическая линейная система ПЛЭ характеризуется импульсной реакцией /функцией веса/  $\omega(t)$  - реакцией ПЛЭ при падении на него лучистого потока, описываемого  $\delta$ -функцией и переходной функцией  $h(t)$  реакцией ПЛЭ на единичный ступенчатый скачок потока излучения.

Между функциями  $\omega(t)$  и  $h(t)$  имеется однозначная связь:

$$\omega(t) = \frac{dh(t)}{dt}; \quad h(t) = \int_{-\infty}^t \omega(t) dt. \quad /8.4/$$

По значению функции веса или переходной функции найти реакцию  $u(t)$  ПЛЭ на любой лучистый поток, описываемый функцией  $\Phi(t)$ . Такая реакция определяется интегралом свертки

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t-\tau) \Phi(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t') \Phi(t-t') dt' \quad /8.5/$$

Фурье-преобразование функции  $\omega(t)$ :

$$W(f) = F\{\omega(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) \exp(-j2\pi f t) dt \quad /8.6/$$

называется амплитудно-фазовой частотой передаточной функции ПЛЭ. Такую функцию целесообразно использовать при гармоническом анализе сигнала ПЛЭ, его фильтрации и т.д. Выходной сигнал ПЛЭ в частотном представлении записывается в виде

$$u(f) = W(f) \Phi(f), \quad /8.7/$$

где

$$\Phi(f) = F\{\Phi(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t) \exp(-j\alpha \pi f t) dt - \quad /8.8/$$

Фурье-образ падающего лучистого потока.

Для получения сигнала ПЛЭ  $u(t)$  необходимо выполнить обратное Фурье-преобразование:

$$u(t) = F^{-1}\{u(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} u(f) \exp(j\alpha \pi f t) df. \quad /8.9/$$

Для исследования динамики ПЛЭ и фотоэлектрической цепи часто применяется преобразование Лапласа:

$$u(p) = W(p) \Phi(p), \quad /8.10/$$

где

$$W(p) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) \exp(-pt) dt; \quad \Phi(p) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t) \exp(-pt) dt. \quad /8.11/$$

Сигнал ПЛЭ  $u(t)$  получают из  $u(p)$  по таблицам операционного исчисления.

## 2. Решение примеров

**Пример 8.1.** На ПЛЭ падает импульс лучистого потока длительностью  $t_u = 1$  мкс и  $\Phi_0 = 1$  Вт. Определить вид сигнала на выходе ПЛЭ, считая, что ПЛЭ представляет собой апериодическое звено с постоянной времени  $\tau = 2$  мкс. Как изменится максимальное значение сигнала ПЛЭ при уменьшении /увеличении/ длительности импульса в 2 раза? Интегральная чувствительность ПЛЭ составляет  $S = 10$  мВ/Вт.

Решение. Входное воздействие - прямоугольный импульс потока излучения можно представить в виде двух единичных скачков: первый из которых происходит в момент времени  $t = 0$ , а второй /обратный полярности/ - в момент  $t = t_u$  /рис.8.2/.

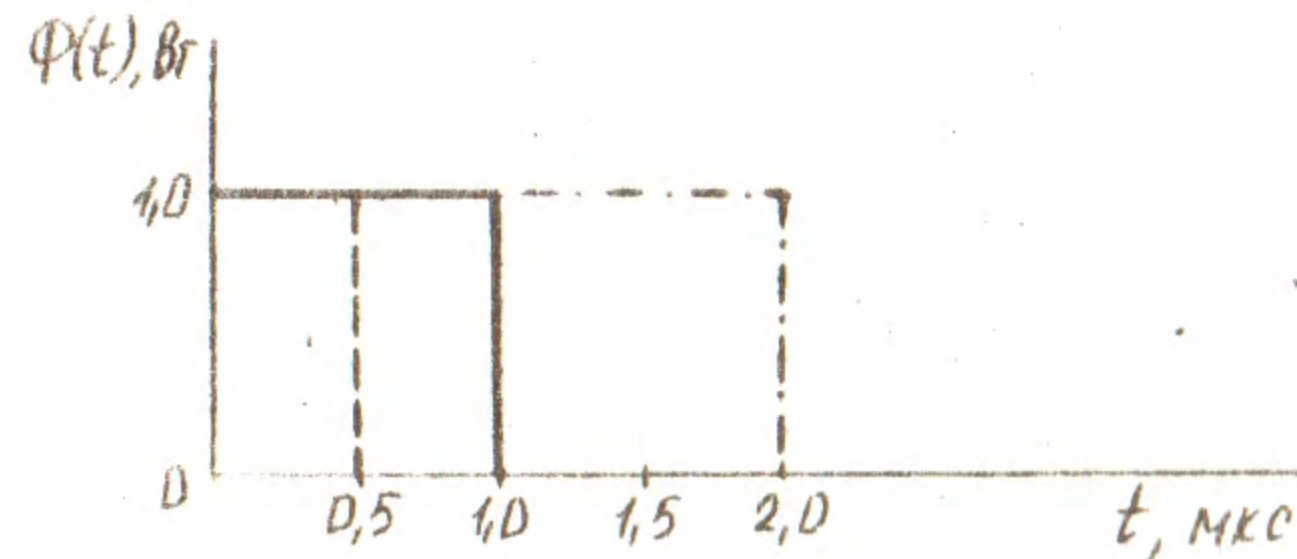


Рис.8.2

Преобразование Лапласа единичного скачка:

$$\Phi(p) = \frac{\Phi_0}{p}$$

Для апериодического звена с учетом зависимости  $u = S\Phi$  имеем

$$W(p) = \frac{S}{1+p\tau}$$

Таким образом, изображение выходного сигнала согласно /8.10/

$$U(p) = \Phi(p)W(p) = \frac{\Phi_0 S}{p(1+p\tau)}$$

По таблицам операционного исчисления находим

$$u(t) = \Phi_0 S (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad /8.12/$$

При  $t = t_u$  на вход апериодического звена действует единичный скачок обратной полярности. Изображение его записывается в виде

$$\Phi(p) = \frac{\Phi_0}{p} (1 - e^{-pt_u}),$$

а изображение сигнала для  $t > t_u$

$$U(p) = \frac{\Phi_0 S (1 - e^{-pt_u})}{p(1+p\tau)}$$

Поэтому с момента прекращения действия лучистого потока на ПЛЭ сигнал его будет изменяться по закону

$$u(t) = \Phi_0 S e^{-\frac{(t-t_u)}{\tau}} \quad /8.13/$$

Последняя запись была бы верной при условии, что до момента  $t = t_u$  сигнал ПЛЭ был равен  $\Phi_0 S$ , что в свою очередь было бы возможным при условии достаточно большой по сравнению с  $\tau$  длительностью импульса [см. /8.12/], где при  $t = t_u \gg \tau$   $u(t) \rightarrow \Phi_0 S$ .

Вследствие инерционности ПЛЭ сигнал ПЛЭ не успевает достичь номинального своего значения, равного  $\Phi_0 S$ , а начинает убывать со значения

$$u_m = \Phi_0 S (1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}}),$$

поэтому /8.13/ следует записать в виде

$$u(t) = u_{max} e^{-\frac{(t-t_u)}{\tau}} = \Phi_0 S (1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}}) e^{-\frac{(t-t_u)}{\tau}} \quad /8.14/$$

Графики выходных сигналов ПЛЭ, построенные по соотношениям /8.12/ и /8.14/, показаны на рис.8.3. Обращает на себя внимание существенное искажение формы сигнала ПЛЭ по сравнению с входным воздействием. Уменьшение длительности импульса лучистого потока приводит к "размазыванию" импульса сигнала ПЛЭ, к уменьшению максимального его значения.

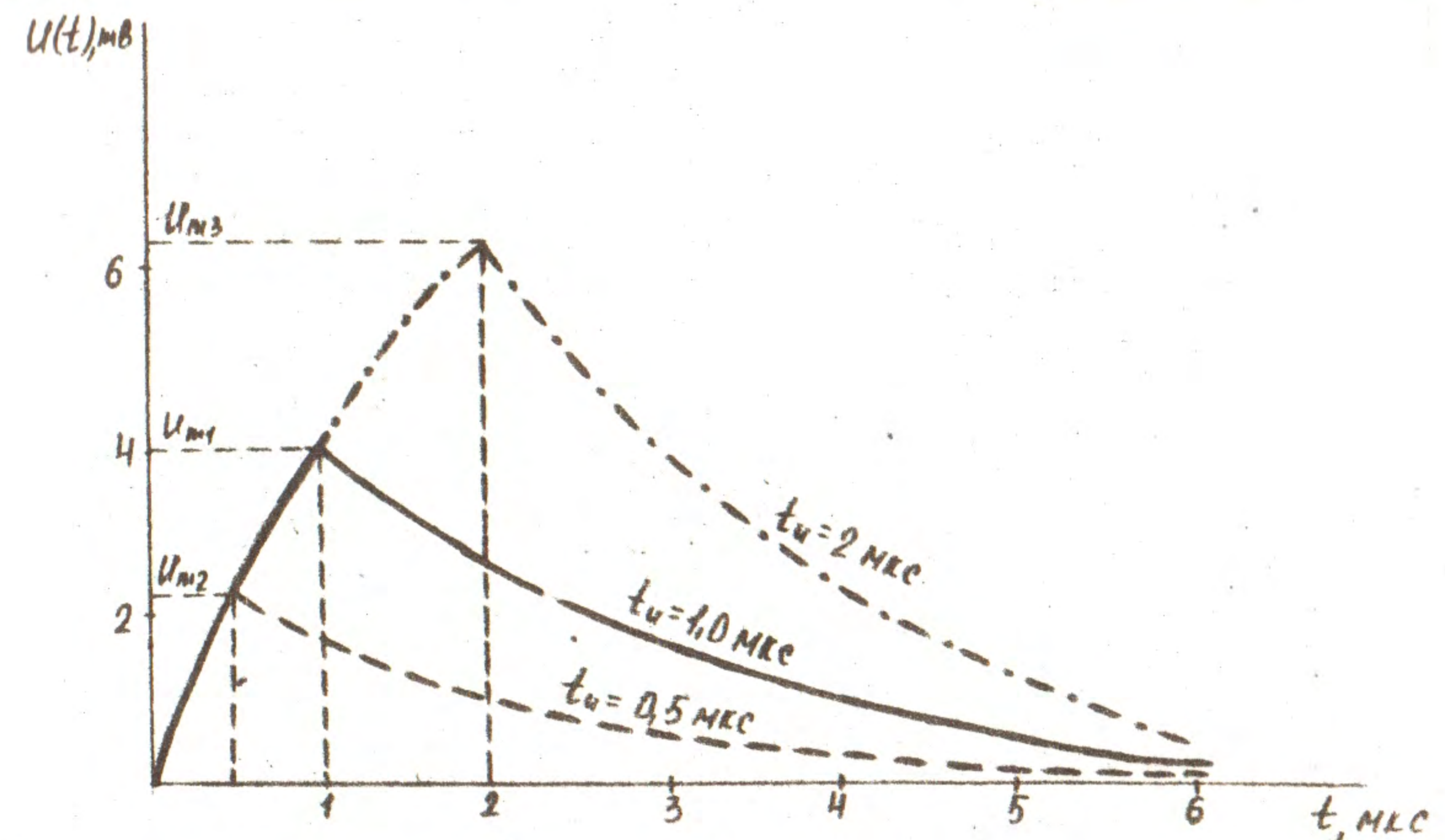


Рис.8.3

Из /8.12/ и /8.14/ находим

$$\frac{u_{m2}}{u_{m1}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{u2}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_{u1}}{\tau}}} = 0,564;$$

$$\frac{u_{m3}}{u_{m1}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{u3}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_{u1}}{\tau}}} = 1,615.$$



Пример 8.2. Поток, падающий на ПЛЭ, описывается функцией

$$\Phi_1(t) = \begin{cases} \Phi_0 e^{-\frac{t}{\tau_\Phi}} & \text{при } t \geq 0; \\ 0 & \text{при } t < 0, \end{cases}$$

где  $\tau_\Phi$  - постоянная времени ПЛЭ.

Известно, что этот поток вызывает появление сигнала на выходе ПЛЭ

$$U_1(t) = S \Phi_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\Phi}}),$$

где  $S$  - интегральная чувствительность ПЛЭ.

Определить вид сигнала ПЛЭ при падении на него лучистого потока, изменяющегося по закону:

$$\Phi_2(t) = \begin{cases} \Phi_0 \frac{t}{t_u} & \text{при } 0 \leq t \leq t_u; \\ 0 & \text{при } t = t_u, t < 0. \end{cases}$$

Решение. Записываем  $\Phi_1$  и  $U_1$  в операторной форме:

$$\Phi_1(p) = \Phi_0 \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{\tau_\Phi}} e^{-pt} dt = \Phi_0 \tau_\Phi \frac{1}{1+p\tau_\Phi};$$

$$U_1(p) = \Phi_0 S \int_0^{\infty} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\Phi}}) e^{-pt} dt = \Phi_0 S \frac{1}{p(1+p\tau_\Phi)}.$$

Таким образом, передаточная функция ПЛЭ имеет вид

$$W(p) = \frac{U_1(p)}{\Phi_1(p)} = \frac{S}{\tau_\Phi} \frac{1}{p},$$

т.е. ПЛЭ представляет собой интегрирующее звено. Учитывая это, сигнал на выходе ПЛЭ можно определить, не обращаясь к таблицам операционного источника:

$$U_2(t) = \frac{S}{\tau_\Phi} \int_{-\infty}^t \Phi_2(t) dt = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \frac{S \Phi_0 t^2}{2 \tau_\Phi t_u} & \text{при } 0 \leq t \leq t_u; \\ \frac{S \Phi_0 t_u}{2 \tau_\Phi} & \text{при } t > t_u. \end{cases}$$

Графики сигналов изображены на рис.8.4.

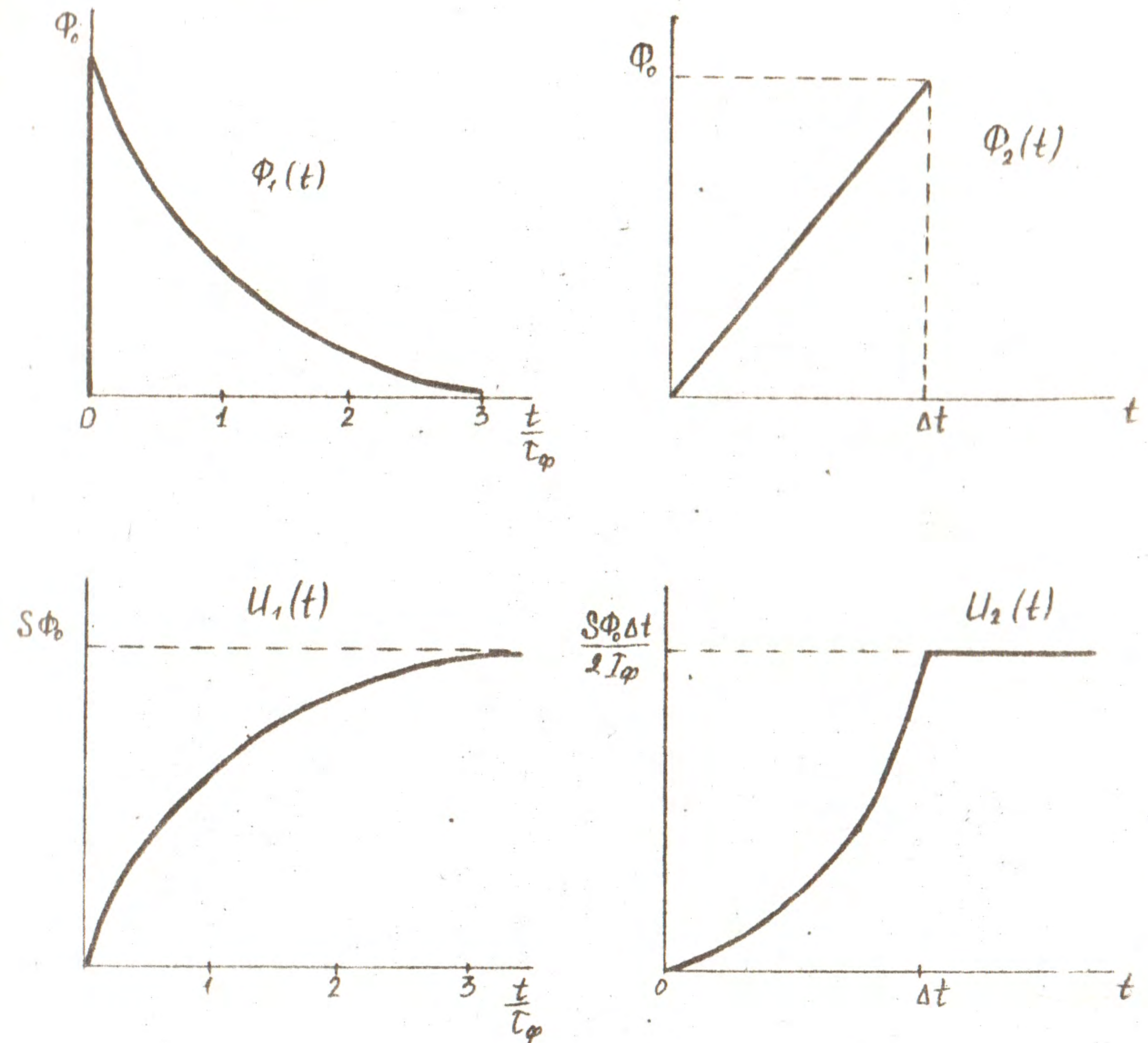


Рис.8.4

Пример 8.3. Лучистый поток на выходе модулятора описывается функцией  $\Phi(t) = \Phi_0 \cos^2 2\pi f_m t$ , где  $f_m$  - частота вращения модулятора. Определить, как изменится переменная составляющая сигнала ПЛЭ, постоянная времени которого составляет 10 мс при изменении частоты  $f_m$  с 50 до 75 Гц.

Решение. Функцию  $\Phi(t)$  представляем в виде

$$\Phi_0 \cos^2 2\pi f_m t = \frac{\Phi_0}{2} (1 + \cos 4\pi f_m t) = \frac{\Phi_0}{2} - \frac{\Phi_0}{2} \cos 4\pi f_m t,$$

откуда видно, что спектр сигнала  $\Phi(t)$  состоит из постоянной составляющей  $\frac{\Phi_0}{2}$  и гармонической составляющей с частотой  $2f_m$ .

На основании /8.2/, /8.7/ и /8.9/ можно записать для амплитуды переменного сигнала ПЛЭ

$$\tilde{u} = S \Phi_0 \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot 2 f m \tau)^2}}$$

Отношение амплитуд переменного сигнала ПЛЭ в обоих случаях

$$\frac{\tilde{u}_1}{\tilde{u}_2} = \sqrt{\frac{1 + (4\pi f m_2 \tau)^2}{1 + (4\pi f m_1 \tau)^2}} = 1,49,$$

т.е. увеличение частоты вращения модулятора с 50 до 75 Гц приводит к уменьшению переменной составляющей сигнала ПЛЭ почти в 1,5 раза.

### 3. Задание для самостоятельной работы

**Задача 8.1.** В серийном фотосчитывающем устройстве с перфолент ФСП-3 в качестве ПЛЭ используется линейка из девяти кремниевых фотодиодов, освещенных полоской света от лампы СЦ-61. Определить предельное быстродействие устройства исходя из ограничения его инерционностью ПЛЭ, если постоянная времени нарастания  $\tau_n = 0$ , а пороговое устройство должно срабатывать при пороговом значении напряжения с выхода предусилителя  $u = u_n$ . Коэффициент усиления предусилителя - 1000, облученность перфоленты  $E = 1500$  Вт/м, диаметр отверстия перфоленты  $a = 2$  мм. Размеры чувствительной площадки ПЛЭ соответствуют размерам диафрагмы. Значения постоянной времени спада и порогового значения  $u_n$  приведены в таблице.

Интегральная чувствительность 1-го фотодиода к реальному источнику составляет 100 мВ/Вт. Расстояние между отверстиями перфоленты - 4 мм.

**Рекомендации.** 1. Составить уравнение формы импульса. 2. Считая функцию  $h(t)$  равной  $h(t) = e^{-\frac{t}{\tau_c}}$ , найти интеграл свертки /8.5/. 3. Минимальный период следования импульсов  $T_{min}$  определить из условия: точка пересечения прямой  $u = u_n$  с передним фронтом одного импульса должна быть за пределами предшествующего импульса /рис.8.5/.

Контрольный расчет для варианта № 26:  $u_{max} = 12,6$  м/с.

Порядок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\tau_n, \mu c$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	1,0	2,0	3,0	4,0
$u_n, \theta$	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04

15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,15	0,12	0,10

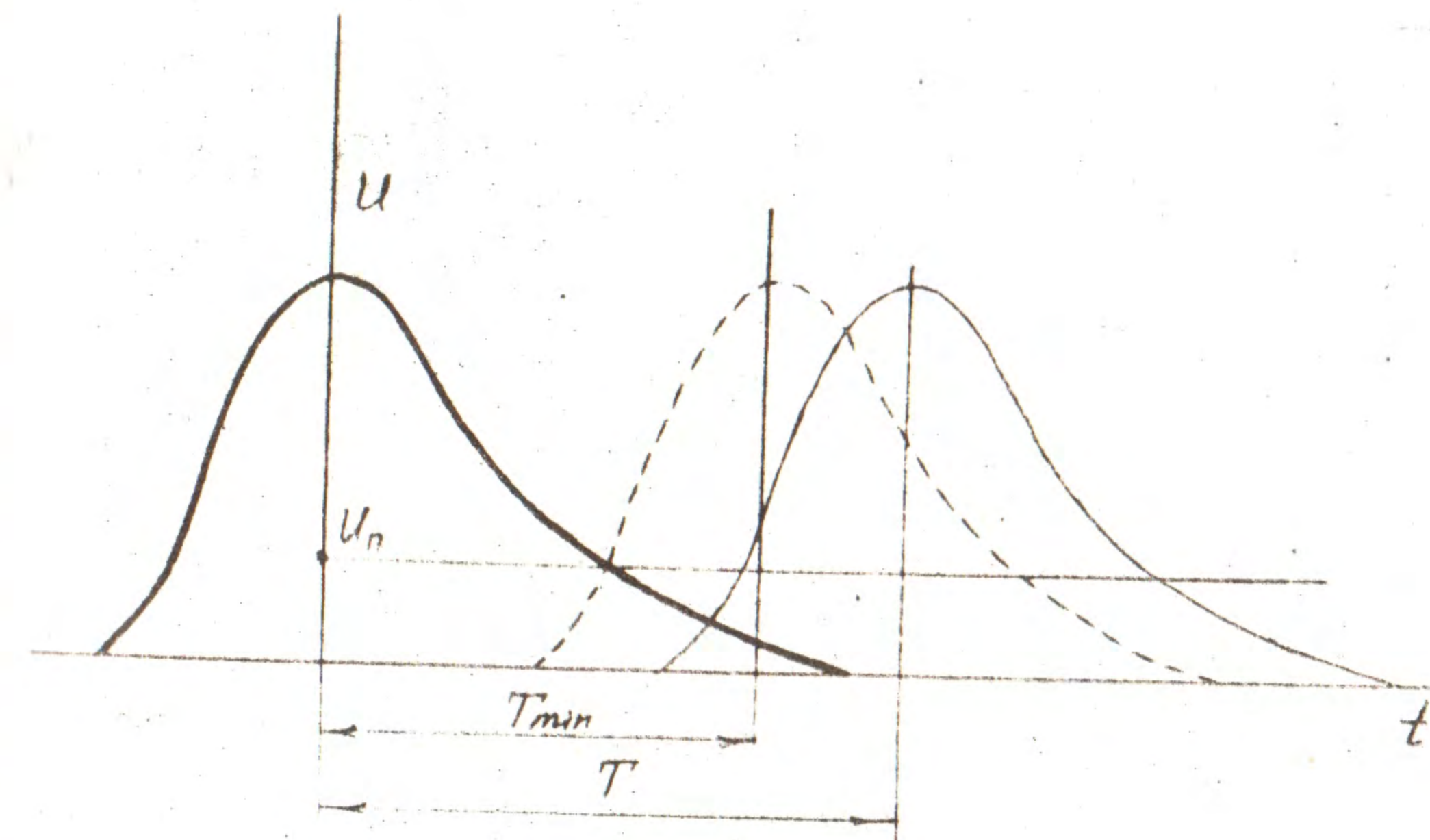


Рис.8.5

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуторов М.М. Основы светотехники и источники света: Учеб.пособ. для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 384 с. С. 204
2. Цветков А.Н., Епанечников В.А. Прикладные программы для микро-ЭВМ "Электроника БЗ-34", "Электроника МК-56", "Электроника МК-54". - М.: Финансы и статистика, 1984. - 175 с.
3. Бураковский Т., Гизинский Е., Саля А. Инфракрасные излучатели. - Л.: Энергия, 1978. - 408 с.
4. Хадсон Р. Инфракрасные системы. - М.: Мир, 1972. - 534 с.
5. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. - М.: Наука, 1965. - 223 с.
6. Жигарев А.А., Шамаева Г.Г. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы: Учебник для вузов. - М.: Высш.шк., 1982. - 463 с.
7. Енстров Ю.А. и др. Электронные приборы для отображения информации. - М.: Радио и связь, 1985. - 240 с.
8. Носов Ю.Р., Сидоров А.С. Оптроны и их применение. - М.: Радио и связь, 1981. - 280 с.
9. Применение оптоэлектронных приборов: Пер. с англ./ С.Гейг, Д.Эванс, М.Ходапп, Х.Соренсен. - М.: Радио и связь, 1981. - 344 с.
10. Иванов В.И. и др. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник/ Под ред. Н.Н.Горьнова. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 184 с.
11. Дьяконов В.П. Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. - М.: Наука, 1985. - 224 с.
12. Ишанин Г.Г. и др. Источники и приемники излучения. - М.: Машиностроение, 1982. - 222 с.
13. Гуревич М.М. Фотометрия /теория, методы и приборы/. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 272 с.
14. Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / Под ред. В.М.Стафеева. - М.: Радио и связь, 1984. - 216 с.