

**Г.Г. Ишанин, Н.К. Мальцева**

**ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ВНЕШНЕМ ФОТОЭФФЕКТЕ**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Г.Г. Ишанин, Н.К. Мальцева

**ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ВНЕШНЕМ ФОТОЭФФЕКТЕ**

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург  
2013

Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К. Приемники оптического излучения на внешнем фотоэффекте. Учебно-методическое пособие. - СПб: НИУ ИТМО, 2013. - 103 с.

В настоящем учебно-методическом пособии рассматривается раздел «Приемники излучения на внешнем фотоэффекте» курса «Источники и приемники излучения», приводятся теоретические положения внешнего фотоэффекта, принцип работы и устройства двух типов приемников – фотоумножителя и электронно-оптического преобразователя, излагаются описания лабораторных работ для определения их характеристик. Все теоретические положения иллюстрируются примерами-задачами по рассматриваемой тематике.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 200400 «Оптотехника», а также студентов, обучающихся по специальности 200401.02 - Оптико-электронные информационно-измерительные приборы и системы, а также для освоения материала по курсу Оптика и оптоэлектроника студентами специальности 220401.65 - Мехатроника

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки оптотехники и приборостроение.

Рецензент: Р.Р. Магдиев, к.т.н., доцент кафедры ТПС, декан факультета точной механики и технологий.

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.



© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

© Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Курс «Источники и приемники оптического излучения» рассчитан на один семестр, в котором студентам 3 курса факультета оптико-информационных систем и технологий предлагается прослушать курс лекций, выполнить ряд лабораторных работ и несколько самостоятельных заданий по решению задач. Раздел «Внешний фотоэффект» является составной частью этого курса, который призван служить некоторым переходным звеном от общеинститутских курсов физики и математики к инженерным расчетам и реальной работе в научно-исследовательской лаборатории.

Цель данного учебно-методического пособия заключается в том, чтобы показать как наряду с теоретическим материалом по одному из разделов выше указанного курса можно изучить на практике характеристики приемников на внешнем фотоэффекте, а также на конкретных примерах освоить основные методы расчета, применяемые при решении задач, связанных с выбором приемника оптического излучения в процессе проектировании оптико-электронных приборов. Опыт приема лабораторных работ по курсу показал, что чтения лекций и проведения лабораторных занятий, как правило, недостаточно для глубокого понимания данного предмета. Решение задач дают возможность студентам почувствовать масштаб величин, научиться делать конкретные численные оценки на основе имеющихся данных, что совершенно необходимо при проектировании оптико-электронных приборов и экспериментальной работе в лаборатории.

В первой главе учебно-методического пособия приводятся теоретические сведения по внешнему фотоэффекту, вторая глава включает материал по параметрам и характеристикам приемников на внешнем фотоэффекте, понимание которых необходимо для решения практических задач, являющихся составляющими частями научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ обучающихся.

Третья глава посвящена приемникам на внешнем фотоэффекте, которые нашли наиболее широкое применение в современной технике: фотоумножителям и электронно-оптическим преобразователям, по конкретным типам этих приемников приводятся таблицы со справочными данными. Здесь также описываются методики снятия основных характеристик и измерения параметров этих приемников и лабораторные установки, имеющихся в наличии в лаборатории «Источники и приемники оптического излучения» кафедры оптико-электронных приборов и систем. В этой же главе приведены типовые задачи по рассматриваемой тематике, а также примеры решения некоторых из них.

Краткое описание используемой аппаратуры, правила оформления отчета по лабораторным работам, методика расчета погрешности измерения, технические параметры приемников на внешнем фотоэффекте, а также ос-

новные энергетические, фотонные, световые величины и их единицы измерения приведены в приложениях.

В настоящее издание вошли исправленные и дополненные описания лабораторных работ по курсу «Источники и приемники излучения», содержащиеся в учебном пособии Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Мусяков В.Л. «Источники и приемники излучения. Методические указания к лабораторным работам - СПб.: СПбГУИТМО, 2000, а также примеры решения задач по рассматриваемому разделу курса источники и приемники оптического излучения из издания Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Мусяков В.Л. «Источники и приемники излучения. Пособие по решению задач» - СПб.: СПбГУИТМО, 2005.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, изучающих курс «Источники и приемники оптического излучения», обучающихся по направлению подготовки бакалавров 200400 «Оптотехника» и по специальности 200401.02 - Оптико-электронные информационно-измерительные приборы и системы, а также может быть использовано для освоения материала по курсу «Оптика и оптоэлектроника» студентами специальности 220401.65 - Мехатроника

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ПВД - полупроводниковый излучающий диод  
ПОИ - приемник оптического излучения  
СКЗ - среднее квадратическое значение  
ФУ - фотоумножитель  
ЧТ - черное тело  
ЭОП - электронно-оптический преобразователь

## ТЕРМИНЫ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Абсолютная спектральная чувствительность ПОИ -  $S_{\lambda, \text{абс}}$   
Видимое (угловое) увеличение оптической системы -  $\Gamma$   
Вольтовая интегральная чувствительность ПОИ -  $S_{U, \text{инт}}$   
Дисперсия генерационного шума ФПЗС -  $\sigma_z$   
Дисперсия шума темнового тока -  $\sigma_m$   
Длинноволновая граница спектральной чувствительности ПОИ -  $\lambda_{\text{гр}}$   
Интегральная чувствительность ПОИ к потоку излучения -  $S_{\text{инт.}\Phi_e}$   
Интегральная чувствительность ПОИ к световому потоку -  $S_{\text{инт.}\Phi_v}$   
Квантовая эффективность -  $\eta_k$   
Коэффициент использования излучения глазом -  $\kappa_r$   
Коэффициент использования излучения источника приемником оптического излучения -  $\kappa$   
Коэффициент преобразования потока излучения ЭОП -  $\eta$   
Коэффициент усиления яркости ЭОП -  $\eta_L$   
Коэффициент усиления фотоумножителя по току -  $M$   
Линейное увеличение оптической системы -  $\beta$   
Максимальная СПЭС ЧТ -  $M_{e, \lambda_{\text{max}}}$   
Напряжение теплового шума -  $U_{\text{ш.т}}$   
Напряжение фотосигнала -  $U_c$   
Напряжение шума ПОИ -  $U_{\text{ш}}$   
Облучённость -  $E_e$   
Относительная спектральная характеристика чувствительности ПОИ -  $S_{\text{отн}}(\lambda)$   
Относительная спектральная чувствительность ПОИ -  $S_{\lambda, \text{отн}}$   
Относительное спектральное распределение потока излучения -  $\varphi_{e, \lambda}(\lambda)$   
Полоса частот -  $\Delta f$   
Пороговая чувствительность в заданной полосе частот в световых ФМВ -  $\Phi_{\text{в.п}}$   
Пороговая чувствительность в заданной полосе частот в энергетических ФМВ -  $\Phi_{e, \text{п}}$

Пороговая чувствительность ПОИ в единичной полосе частот -  $\Phi_{п.1}$   
 Постоянная времени схемной релаксации ПОИ -  $\tau_p$   
 Поток излучения -  $\Phi_e$   
 Рабочее напряжение ПОИ -  $U_p$   
 Световая анодная чувствительность фотоумножителя -  $S_{v.a}$   
 Световая отдача экрана ЭОПа -  $\eta_v$   
 Световая чувствительность фотокатода -  $S_{v.к}$   
 Сила излучения -  $I_e$   
 Сопротивление нагрузки -  $R_n$   
 Спектральная чувствительность ПОИ к потоку излучения -  $S_{\lambda.\Phi_e}$   
 Спектральная чувствительность ПОИ к световому потоку -  $S_{\lambda.\Phi_v}$   
 Суммарный ток фотокатода -  $I_k$   
 Темновое сопротивление ПОИ -  $R_T$   
 Темновой ток -  $I_T$   
 Темновой ток фотокатода -  $I_{T.к}$   
 Ток дробового шума ПОИ -  $I_{ш.др}$   
 Токовая интегральная чувствительность ПОИ -  $S_{I.инт}$   
 Ток теплового шума ПОИ -  $I_{ш.т}$   
 Ток шума ПОИ -  $I_{ш}$   
 Удельная обнаружительная способность ПОИ -  $D^*$   
 Удельное сопротивление металла -  $\rho_m$   
 Удельная пороговая чувствительность ПОИ -  $\Phi_{п}^*$   
 Ширина запрещённой зоны полупроводника -  $\Delta E_3$   
 Энергетическая светимость -  $M_e$   
 Энергетическая яркость -  $L_e$   
 Энергия излучения -  $Q_e$   
 Эффективный коэффициент теплового излучения -  $\epsilon'$

## 1. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Внешний фотоэффект, или фотоэлектронная эмиссия - это испускание электронов с поверхности фоточувствительного слоя в вакуум или другое вещество под действием падающего потока излучения.

Основные законы внешнего фотоэффекта:

1. Фототок (число фотоэлектронов, вырываемых из фотокатода в единицу времени) в режиме насыщения (все вылетевшие из фотокатода фотоэлектроны собираются на анод и фототок не зависит от напряжения питания) прямо пропорционален потоку излучения, поглощенного фотокатодом, при неизменном спектральном составе падающего потока излучения (закон Столетова).

$$I_{\phi} = \Phi \cdot S_H,$$

где  $S_H$  - интегральная чувствительность фотокатода, А/Вт;  $\Phi$  — поглощенный поток, Вт;  $I_{\phi}$  - фототок, А.

2. Максимальная энергия выбиваемых фотоэлектронов пропорциональна частоте  $\nu$  падающего на фотокатод излучения и не зависит от потока излучения (закон Эйнштейна — закон сохранения энергии при фотоэлектронной эмиссии). Для каждого вещества существует длинноволновая граница внешнего фотоэффекта, называемая «красной границей», так как энергия падающих фотонов  $h\nu$  уменьшается с увеличением длины волны и уменьшением частоты. Пороговая частота фотоэффекта  $\nu_{гр}$  соответствует энергии падающих фотонов, при которой даже максимальная энергия фотоэлектронов равна нулю. Если электрон в веществе после взаимодействия с упавшим фотоном с энергией  $h\nu$  вышел в вакуум с кинетической энергией  $(mv^2/2)_{max}$ , совершив фотоэлектронную работу выхода  $E_{\phi}$ , то закон Эйнштейна можно записать в виде

$$a. (mv^2/2)_{max} = h\nu - E_{\phi},$$

где  $c$  — скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме;  $\lambda''$  — граничная длина волны в микрометрах при измерении  $E_{\phi}$  в электрон-вольтах.

4. Время запаздывания между поглощением кванта и появлением фотоэлектрона меньше  $10^{-12}$  с, что позволяет на основе внешнего фотоэффекта создавать быстродействующие приемники излучения.

5. Фототок (число фотоэлектронов, вырываемых из фотокатода в единицу времени) в режиме насыщения (все вылетевшие из фотокатода фотоэлектроны собираются на анод и фототок не зависит от напряжения [4,11,14].

## 2. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВНЕШНЕМ ФОТОЭФФЕКТЕ

В приемниках на внешнем фотоэффекте поток фотоэлектронов, эмитируемых под действием падающего излучения одним из электродов (фотокатодом) в вакуум (или газ), ускоряется за счет постоянного внешнего напряжения и улавливается другим электродом (анодом), образуя во внешней цепи электрический ток - фототок.

В качестве фотокатодов используют некоторые чистые и сложные металлы и полупроводники, фотоэлектронная эмиссия которых состоит из поглощения фотона и передачи его энергии электрону, диффузии (перемещения) возбужденного электрона к поверхности фотокатода и прохождения его в вакуум через поверхностный потенциальный барьер (электрическое поле, действующее в узкой области вблизи поверхности фотокатода, удерживающее электроны внутри вещества). Энергию, которая необходима электрону для преодоления поверхностного потенциального барьера, называют работой выхода.

### Параметры и характеристики приемников излучения на внешнем фотоэффекте и их пересчет.

Технические свойства приемников излучения и эффективность использования их в оптико-электронных приборах оценивают при помощи системы параметров и характеристик.

Параметр характеризует определенное свойство ПОИ и служит критерием оценки его качества при работе в определенных условиях. Параметр можно измерить или вычислить по данным измерений других величин.

Характеристика — это зависимость, описывающая изменение какого-либо параметра ПОИ при изменении внешних факторов. Характеристику можно выразить формулой, графиком или таблицей. К основным *параметрам* ПОИ относят следующие.

1. Параметры чувствительности ПОИ: интегральная чувствительность  $S_{\text{инт}}$ ; интегральная токовая чувствительность  $S_I$ ; интегральная вольтовая чувствительность  $S_U$ ; монохроматическая чувствительность  $S_\lambda$ ; импульсная чувствительность  $S_{\text{имп}}$ ; коэффициент использования потока излучения  $\chi$ ; эффективная ширина полосы чувствительности  $\Delta\lambda_{\text{эфф}}$ .

2. Пороговые и шумовые параметры ПОИ: ток шума  $I_{\text{ш}}$ ; напряжение шума  $U_{\text{ш}}$ ; порог чувствительности в заданной полосе  $\Phi_{\text{п}}$ ; порог чувствительности в единичной полосе  $\Phi_{\text{п1}}$ ; удельный порог чувствительности  $\Phi_{\text{п}}^*$ ; обнаружительная способность  $D$ ; удельная обнаружительная способность  $D^*$ ; радиационный порог чувствительности  $\Phi_{\text{рп}}$ ; квантовая пороговая чувствительность  $\Phi_{\text{рлп}}$ .

3. Временные параметры ПОИ: собственная постоянная времени  $\tau$ ; граничная частота модуляции  $f_{\text{гр}}$ ; темновое сопротивление приемника  $R_{\text{т}}$ ; динамическое сопротивление  $R_{\text{д}}$ ; емкость приемника  $C$ .

4. Спектральные параметры ПОИ: максимум спектральной характеристики  $\lambda_{\max}$ ; коротковолновая граница спектральной чувствительности  $\lambda'$ ; длинноволновая граница спектральной чувствительности  $\lambda''$ .

5. Эксплуатационные параметры ПОИ: рабочее напряжение фотоприемника  $U_p$ ; максимально допустимая рассеиваемая электрическая мощность  $P_{\max}$ ; температурный коэффициент фототока  $\alpha_T$ ; нестабильность параметров при эксплуатации.

К основным характеристикам ПОИ относят следующие.

1. Спектральные характеристики ПОИ: абсолютная спектральная характеристика чувствительности фотоприемника  $S_{\text{абс}}(\lambda)$ ; относительная спектральная характеристика чувствительности  $S_{\text{отн}}(\lambda)$ .

2. Вольтовые характеристики ПОИ: вольт-амперная характеристика  $I(U)$ ; вольтовая характеристика чувствительности  $S(U)$ ; вольтовая характеристика тока шума  $I_{\text{ш}}(U)$ ; вольтовые характеристики напряжения шума  $U_{\text{ш}}(U)$  и т. д.

3. Характеристики зависимости параметров ПОИ от величин потока излучения: зависимость сопротивления от освещенности  $R(E)$ ; энергетическая характеристика фототока фотоприемника  $I_{\text{ф}}(\Phi)$ ; энергетическая характеристика сигнала фотоприемника  $U_{\text{ф}}(\Phi_e)$ .

4. Фоновые характеристики: фоновая характеристика сопротивления  $R(\Phi_{\text{ф}})$ ; фоновая характеристика чувствительности  $S(\Phi_{\text{ф}})$ ; фоновая характеристика тока шума  $I_{\text{ш}}(\Phi_{\text{ф}})$ ; фоновая характеристика напряжения шума  $U_{\text{ш}}(\Phi_{\text{ф}})$ ; фоновая характеристика удельной обнаружительной способности  $D(\Phi_{\text{ф}})$  и т. д.

5. Частотные характеристики ПОИ: частотная характеристика чувствительности  $S(f)$ ; фазовая характеристика  $\varphi(f)$ ; частотная характеристика удельной обнаружительной способности  $D^*(f)$ ; частотная характеристика спектральной плотности тока шума  $I_{\text{ш}}(f)$ ; частотная характеристика спектральной плотности напряжения шума  $U_{\text{ш}}(f)$ .

### Параметры ПОИ

Чувствительностью ПОИ называют отношение изменения измеряемой электрической величины, вызванного падающим на фотоприемник излучением, к количественной характеристике этого излучения в заданных эксплуатационных условиях. В зависимости от того, в какой системе фотометрических величин характеризуется падающее на ПОИ излучение, различают чувствительность к потоку излучения  $S_{\Phi_e}$ ; чувствительность к световому потоку  $S_{\Phi_v}$ ; чувствительность к облученности  $S_{E_e}$  или освещенности  $S_{E_v}$ . В зависимости от спектрального состава регистрируемого приемником излучения бывают интегральная  $S_{\text{инт}}$  и монохроматическая  $S_{\lambda}$  чувствительности.

Существуют также статическая чувствительность, определяемая отношением постоянных значений, измеряемых на выходе и на входе приемника величин, и дифференциальная, определяемая отношением малых приращений этих величин. Иногда употребляют понятие «удельная чувствительность

ПОИ», которая представляет собой чувствительность, отнесенную к напряжению питания в 1 В.

При экспериментальном определении чувствительности ПОИ оговаривают частоту и форму модуляции, потока излучения и форму выходного сигнала, так как от них зависит чувствительность.

Чувствительность ПОИ к немонахроматическому (сложному) потоку излучения заданного спектрального состава называют интегральной [А/Вт, А/лм или А·м<sup>2</sup>/Вт, А/лк]. Так, для приемников с внешним фотоэффектом  $S_{\text{инт}} = \Delta I / \Delta \Phi$  [А/Вт], для фоторезисторов  $S_{\text{инт}} = \Delta R_{\Phi} / R_{\Phi} \Delta \Phi$  [1/Вт]. Внешняя схема включения не должна существенно влиять на результаты измерений. Так как  $S_{\text{инт}}$  — величина паспортная и относится к определенному источнику, для другого (непаспортного) источника ее надо пересчитывать.

В качестве паспортных источников ГОСТ 17772-88 рекомендует: светоизмерительную лампу накаливания при цветовой температуре  $T_{\text{цв}} = 2856 \pm 100$  К (источник типа А по ГОСТ 8.023-2003) для приемников, чувствительных в видимой области спектра; полный излучатель (черное тело) с температурой полости  $500 \pm 2$  К и полный излучатель с температурой полости  $1273 \pm 15$  К для приемников, чувствительных в ИК-области спектра.

На практике чаще применяют интегральную токовую  $S_I$  или интегральную вольтовую  $S_U$  [В/Вт, В/лм или В·м<sup>2</sup>/Вт, В/лк] чувствительности, характеризующие чувствительность приемника не вообще, а применительно к реальной схеме его включения. Интегральную токовую (вольтовую) чувствительность можно снимать при немодулированном потоке излучения:

$$S_I = I_{\Phi} / \Phi; S_U = U_{\Phi} / \Phi,$$

где  $I_{\Phi} = I_0 - I_T$ ,  $U_{\Phi} = U_0 - U_T$ ;  $I_0$  и  $U_0$  — суммарные ток и напряжение;  $I_T$  и  $U_T$  — темновые ток и напряжение.

Для модулированного или импульсного потока излучения частоту, форму и глубину модуляции при измерении параметров и определении характеристик фотоприемников выбирают в соответствии с требованиями стандартов и ТУ на фотоприемники конкретных типов. При отсутствии этих требований применяют электромеханические модуляторы с вращающимися дисками и 100%-ной глубиной модуляции с частотой  $800 \pm 20$  Гц. Форма модуляции должна приближаться к синусоидальной ( $\beta = 0,353$ ).

Для малоинерционных фотоэмиссионных приемников на внешнем фотоэффекте используют частоту модуляции в диапазоне 800–1000 Гц. В паспорте на приемник оговаривают температуру и тип источника, частоту модуляции потока излучения и полосу пропускания усилительного тракта, к которой отнесен данный параметр. Часто эти факторы приводят в таблицах параметров как подстрочный индекс или в скобках около значения параметра. Например,  $S_{I(500,800,1)}$  означает, что измерение велось по черному телу с температурой 500 К, при частоте модуляции 800 Гц и полосе пропускания усилителя 1 Гц.

## Пороговые и шумовые параметры ПОИ

Помимо полезного регулярного сигнала в выходной цепи приемника наблюдается хаотический сигнал со случайными амплитудой и частотой — шум приемника. На фоне шума становятся неразличимыми малые полезные сигналы, т. е. шум ограничивает возможности ПОИ. Ток шума (напряжение шума) фотоприемника возникает по внешним и внутренним причинам: воздействие тепла, тока фотоприемника, фотонный характер излучения и т. д. Так как шумы (флуктуации) — процессы случайные, их описывают такими характеристиками, как математическое ожидание (средний уровень шума), среднеквадратичное значение или дисперсия. Распределение шума по спектру определяют спектральной плотностью шума (дисперсией), приходящейся на единицу полосы частот. Если спектральная плотность шума одинакова и не зависит от частоты, то такой шум называют «белым».

*Током шума ПОИ*  $I_{ш}$  называют среднеквадратичное значение флуктуации тока, протекающего через фотоприемник в указанной полосе частот, *напряжением шума*  $U_{ш}$  — среднеквадратичное значение флуктуации напряжения на заданной нагрузке в цепи фотоприемника в указанной полосе частот.

В приемниках излучения различают *радиационный (фотонный) шум*, возникающий из-за флуктуации потока квантов, падающих на фотоприемную площадку, и флуктуаций потока квантов, излучаемых самим фотоприемником в пространство, так как его температура отлична от абсолютного нуля.

Дисперсия флуктуаций потока излучения фона с температурой  $T_{\phi}$  и коэффициентом теплового излучения  $\varepsilon_{T\phi}$ , поступающего на фотоприемную площадку с площадью  $A$  в полосе частот  $\Delta f$ :

$$\overline{\Delta\Phi_{\phi}^2} = 8\alpha_T \varepsilon_{T\phi} k T_{\phi}^5 \sigma A \Delta f,$$

где  $\alpha_T = \varepsilon_{T\pi}$  — коэффициент поглощения (излучения) фотоприемной площадкой;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup> — постоянная Больцмана;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup> — постоянная Стефана–Больцмана;  $\varepsilon_{T\pi}$  — коэффициент теплового излучения фона.

Дисперсия флуктуаций потока излучения, излучаемого приемником:

$$\overline{\Delta\Phi_{\pi.и}^2} = 8\varepsilon_{T\pi} k T_{\pi.и}^5 \sigma A \Delta f,$$

где  $\varepsilon_{T\pi}$  — коэффициент теплового излучения приемника.

Общая флуктуация, определяющая дисперсию радиационного шума:

$$\overline{\Delta\Phi_{р.ш}^2} = \overline{\Delta\Phi_{\phi}^2} + \overline{\Delta\Phi_{\pi.и}^2} = 8k\sigma A \alpha_T \Delta f (\varepsilon_{T\phi} T_{\phi}^5 + T_{\pi.и}^5).$$

Дисперсия напряжения радиационного шума с учетом интегральной чувствительности ПОИ к излучению фона  $S_{\text{инт.}\phi}$  и к излучению самого приемника  $S_{\text{инт.}\pi.и}$  будет равна

$$\overline{U_{р.ш}^2} = S_{\text{инт.}\phi}^2 \overline{\Delta\Phi_{\phi}^2} + S_{\text{инт.}\pi.и}^2 \overline{\Delta\Phi_{\pi.и}^2}.$$

Радиационный шум имеет равномерный спектр (белый шум).

*Тепловой шум* вызывается хаотическим тепловым движением свободных электронов в самом приемнике. Спектр теплового шума равномерный. Дисперсию напряжения теплового шума в полосе  $\Delta f$  определяют по формуле Найквиста

$$\overline{U_{т.ш}^2} = 4kTR\Delta f, \quad \overline{I_{т.ш}^2} = 4kTR^{-1}\Delta f,$$

где  $R$  — сопротивление приемника (для фотодиода берут сопротивление базы  $R_B$ ).

*Дробовый шум* объясняется тем, что электрический ток — это поток частиц, флуктуирующих во времени. Дисперсию тока дробового шума в полосе  $\Delta f$  определяют по формуле Шоттки

$$\overline{I_{др.ш}^2} = 2eI_0\Delta f,$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  А·с — заряд электрона,  $I_0$  — среднее значение тока в приемнике. Спектр дробового шума равномерный.

Протекая по нагрузочному сопротивлению  $R_n$ , ток дробового шума создает напряжение шума

$$\overline{U_{др.ш}^2} = 2eI_0R_n^2\Delta f.$$

Дисперсия тока дробового шума в полосе  $\Delta f$  для ФЭУ:

$$\overline{I_{др}^2} = 2eI_{фк}M^2(1+B)\Delta f,$$

где  $I_{фк}$  — суммарный ток с фотокатода, А;  $M$  — коэффициент умножения ФЭУ;  $1+B$  — коэффициент, учитывающий дробовый шум эмиттеров (равен 2,5 для ФУ с электростатической фокусировкой).

*Шум мерцания (фликкер-эффект)* возникает у фотоэлементов из-за непостоянства чувствительности фотокатода во времени, он проявляется на низких частотах ( $f < 100$  Гц) и может превышать дробовый шум на порядок:

$$\overline{I_{м.ш}^2} = 2eI_0[1 + BI_0 / (Af)],$$

где  $B$  — постоянная, зависящая от материала фотокатода;  $A$  — площадь фотокатода. Шум мерцания чаще всего снимают экспериментально.

*Токовый шум (избыточный, 1/f-шум)* объединяет несколько видов шума, которые отдельно трудно рассчитать. Он зависит от состояния поверхности и технологии изготовления фоточувствительного слоя, от качества контактов и токов утечки. Дисперсия напряжения токового шума на  $R_n$ :

$$\overline{U_{т.ш}^2} = BR_n^2I_0^2 \frac{\Delta f}{f_m},$$

где  $B$  — коэффициент, зависящий от типа фотоприемника (для сернисто-свинцовых фоторезисторов  $B = 10^{-11} \dots 10^{-12}$ );  $R_n$  — сопротивление нагрузки, Ом;  $I_0$  — среднее значение тока в цепи приемника, А.

На низких частотах, меньших 100 Гц, токовый шум у приемников может превышать другие виды шумов на порядок и более, с увеличением частоты свыше 1000 Гц он резко падает.

При расчете общего шума ПОИ считают, что шумы некоррелированы, поэтому дисперсия суммарного напряжения шумов:

$$\overline{U_{ш.с}^2} = \overline{U_{р.ш}^2} + \overline{U_{т.ш}^2} + \overline{U_{др.ш}^2} + \overline{U_{гр.ш}^2} + \dots$$

Так как с минимальными пороговыми потоками ПОИ работают при отсутствии посторонних засветок, то обычно измеряют темновой ток и темновое напряжение, которые определяют уровень минимальных регистрируемых данным ПОИ сигналов. Измерения проводят в условиях полного затемнения

на аппаратуре, аналогичной измерению  $S_{\text{инт}}$ . По результатам измерения вычисляют среднее арифметическое  $I_{\text{т.ср}}$  и  $U_{\text{т.ср}}$ , из  $n$  измерений определяют максимальное отклонение темнового тока  $I_{\text{тmax}}$  ( $U_{\text{тmax}}$ ) от среднего значения и находят нестабильность темнового тока  $dI_{\text{т}}$  ( $dU_{\text{т}}$ ) по аналогии с обработкой результатов при измерении  $S_{\text{инт}}$ . Требования к измерительной аппаратуре те же. При измерениях  $I_{\text{т.ш}}$  и  $U_{\text{т.ш}}$  сначала измеряют уровень собственных шумов установки  $U_{\text{ш1}}$  ( $I_{\text{ш1}}$ ), не подавая на ПОИ напряжение питания. Затем подают питание  $U_{\text{п}}$  и измеряют суммарный шум  $U_{\text{ш2}}$  ( $I_{\text{ш2}}$ ). Если шумы фотоприемника близки к шумам установки  $U_{\text{ш2}} \leq 3U_{\text{ш1}}$ , то расчет ведут по формуле

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{U_{\text{ш2}}^2 - U_{\text{ш1}}^2}.$$

Если  $U_{\text{ш2}} > 3U_{\text{ш1}}$ , то его значение принимают за напряжение шума фотоприемника. Ток шума  $I_{\text{ш}} = U_{\text{ш}}/R_{\text{п}}$ . Требования к измерительной аппаратуре регламентирует ГОСТ 17772-88.

*Порогом чувствительности ПОИ в заданной полосе  $\Phi_{\text{п}}$*  называют среднеквадратичное значение первой гармоники действующего на ПОИ модулированного потока излучения сигнала с заданным спектральным распределением, при котором среднее квадратическое значение первой гармоники напряжения (тока) фотосигнала равно среднему квадратическому значению напряжения (тока) шума в заданной полосе частот модуляции потока излучения. Полосу частот выбирают, как правило, в пределах 20% от частоты модуляции, так, чтобы изменением спектральной плотности шума в ее пределах можно было пренебречь.

$$\Phi_{\text{п}} = \sqrt{U_{\text{ш}}^2} / S_U \quad \text{или} \quad \Phi_{\text{п}} = \sqrt{I_{\text{ш}}^2} / S_I.$$

Для фотоэмиссионных приемников типа ФЭУ или фотоэлементов (ФЭ) (ГОСТ 20526-82) порогом чувствительности  $\Phi_{\text{п}}$  называют поток излучения, который, падая на фотокатод, создает на выходе ФЭУ или ФЭ сигнал, равный среднеквадратичному значению напряжения шумов темнового анодного тока, измеренного в определенной полосе частот эквивалентом шума темнового анодного тока ФЭУ или ФЭ. Оба эти названия применяются в литературе при рассмотрении параметров различных ПОИ.

Для сравнения порогов чувствительности ПОИ, снятых аппаратурой с различной полосой пропускания и имеющих разные по площади приемные площадки, вводят понятие порога чувствительности в единичной полосе частот и удельного порога чувствительности.

*Порогом чувствительности ПОИ в единичной полосе частот  $\Phi_{\text{п1}}$*  (в Вт/Гц<sup>1/2</sup>) называют среднеквадратичное значение первой гармоники действующего на ПОИ модулированного потока излучения источника фотосигнала с заданным спектральным распределением, при котором среднеквадратическое значение первой гармоники напряжения (тока) фотосигнала равно среднеквадратическому значению напряжения (тока) шума, приведенному к единичной полосе на частоте модуляции потока излучения.

$$\Phi_{\text{п1}} = \Phi_{\text{п}} / \sqrt{\Delta f}.$$

Удельным порогом чувствительности  $\Phi_n^*$  считают порог чувствительности ПОИ в единичной полосе частот в Вт/(см·Гц<sup>1/2</sup>), отнесенный к единичному по площади фоточувствительному элементу:

$$\Phi_n^* = \Phi_n / \sqrt{\Delta f A}.$$

Иногда пороговую чувствительность ПОИ характеризуют пороговой освещенностью или облученностью  $E_n$ ,  $E_{n1}$ ,  $E_n^*$ .

В качестве полосы пропускания  $\Delta f$  берут чаще всего эффективную шумовую полосу пропускания измерительного тракта (в Гц):

$$\Delta f_{\text{эфф}} = \int_0^{\infty} k^2(f) df / k_{\text{max}}^2,$$

где  $k(f)$  — функция, определяющая зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты;  $k_{\text{max}}$  — коэффициент усиления на резонансной частоте.

Величину, обратную пороговой чувствительности фотоприемника в заданной (единичной) полосе частот (в Гц<sup>1/2</sup>/Вт), называют *обнаружительной способностью*:

$$D = 1/\Phi_n; D_1 = 1/\Phi_{n1}.$$

Удельная обнаружительная способность (в Гц<sup>1/2</sup>·см/Вт):

$$D^* = \frac{1}{\Phi_n^*} = \frac{\sqrt{\Delta f_{\text{эфф}} A}}{\Phi_n} = \frac{S_U \sqrt{\Delta f_{\text{эфф}} A}}{\sqrt{U_{\text{ш}}^2}}.$$

Для учета влияния фона на порог чувствительности ПОИ вводят понятие радиационного порога чувствительности фотоприемника  $\Phi_{\text{рад.п}}$  — это пороговая чувствительности ПОИ в заданной (единичной) полосе частот, шумы которого обусловлены флуктуациями теплового излучения фона заданной температуры.

Пороговые параметры относят к определенному источнику. Для источника с другим спектральным распределением их надо пересчитывать.

При измерении  $\Phi_n$ ,  $\Phi_{n1}$ ,  $\Phi_n^*$ ,  $D$ ,  $D^*$  в монохроматическом потоке излучения к обозначению добавляют индекс  $\lambda$ :  $\Phi_{n\lambda}$ ,  $\Phi_{n1\lambda}$ ,  $\Phi_{n\lambda}^*$ ,  $D_\lambda$ ,  $D_\lambda^*$ . Паспортные значения порога чувствительности и обнаружительной способности вычисляют по измеренным  $S_U$  и  $U_{\text{т.ш}}$  или  $S_I$  и  $I_{\text{т.ш}}$ :

$$\Phi_n = \sqrt{U_{\text{т.ш}}^2} / S_U = \sqrt{I_{\text{т.ш}}^2} / S_I = \Phi_1 U_{\text{т.ш}} / U_c = \Phi_1 I_{\text{т.ш}} / I_c,$$

где  $\Phi_1$  — действующее значение потока излучения, Вт (лм).

Удельная обнаружительная способность:

$$D^* = \frac{U_c \sqrt{\Delta f_{\text{эфф}} A}}{U_{\text{т.ш}} \Phi_1} = \frac{I_c \sqrt{\Delta f_{\text{эфф}} A}}{I_{\text{т.ш}} \Phi_1}.$$

*Квантовая пороговая чувствительность*  $\Phi_{p\lambda n}$  [фотон/(мкм·с)] есть число квантов монохроматического излучения, падающих в единицу времени на ПОИ и вызывающих сигнал, равный шуму:

$$\Phi_{p\lambda n} = \Phi_{e\lambda n} \lambda / (hc).$$

## Временные параметры ПОИ

Собственные постоянные времени ПОИ —  $\tau_{сп}$  и  $\tau_{н}$ :  $\tau_{сп}$  — интервал времени после прекращения воздействия излучения, по истечении которого спадающее по экспоненте напряжение фотосигнала уменьшается в  $e$  раз;  $\tau_{н}$  — время после начала воздействия излучения, по истечении которого нарастающее по экспоненте напряжение фотосигнала достигает доли  $1 - 1/e = 0,63$  от своего максимального значения. Собственные постоянные времени определяют быстродействие приемника в ОЭП, и разброс  $\tau_{сп}$  и  $\tau_{н}$  для однотипных приемников не превышает 5–10 %. У некоторых приемников (например, у фоторезисторов)  $\tau_{сп} \neq \tau_{н}$ , так как процесс рекомбинации носителей у них зависит от квадрата их концентрации (или от какого-либо другого закона). У фоторезисторов в первом приближении  $\tau$  определяется временем жизни носителей; у фотодиодов — временем пролета носителей от места их образования до  $p$ - $n$ -перехода; у ФЭ и ФЭУ — временем пролета носителей от фотокатода до анода с учетом их неодновременного прилета на анод, что дает задержку по времени; у тепловых приемников — временем тепловых процессов и т. д.

При определении  $\tau_{сп}$  и  $\tau_{н}$  измерительная установка должна удовлетворять требованиям ГОСТ 17772-88. В установке модулятор и фотозатвор должны формировать трапецеидальные импульсы излучения с фронтом нарастания или спада импульса  $\tau_{фр} \leq 0,2\tau$ , где  $\tau$  — минимальное значение собственной постоянной времени фотоприемника, взятое из стандартов или ТУ на ПОИ, с. Длительность импульса потока излучения  $\tau_{имп} \geq 5\tau$  при скважности 2.

Уровень потока излучения:

$$5\Phi_n^* \sqrt{\Delta f_{эфф} A} \leq \Phi_{max} \leq 100\Phi_n^* \sqrt{\Delta f_{эфф} A},$$

причем должно быть  $R_n \leq 0,05\tau_{фр}/C$ , где  $C$  — емкость установки.

На ПОИ подают импульс излучения и фиксируют на осциллографе сигнал, который, регулируя усиление осциллографа, вписывают в прямоугольник  $ABV_1A_1$ . С помощью меток времени или масштаба развертки на экране осциллографа определяют время нарастания выходного сигнала  $\tau_{н}$  на участке  $AN_1$  и времени спада  $\tau_{сп}$  на участке  $BC_1$ . Граничная частота фотоприемника  $f_{гр}$  показывает частоту синусоидально-модулированного потока излучения, при которой чувствительность фотоприемника падает до значения 0,707 от чувствительности при немодулированном излучении за счет его инерционности (рис. 1).

К электрическим параметрам ПОИ относят темновое сопротивление ПОИ  $R_t$ ; динамическое сопротивление приемника  $R_d = dU/dI$  при заданной облученности на ПОИ; емкость ПОИ  $C$ . Сопротивление и емкость ПОИ — важные параметры, так как они определяют постоянную времени схемной релаксации электрической цепи ПОИ ( $\tau_{рел} = CR$ ), которая может быть больше постоянной времени самого ПОИ. От сопротивления приемника зависят уровень шумов ПОИ и схема согласования приемника с усилителем. Сопротив-

ление ПОИ зависит от формы приемной фоточувствительной площадки, от наличия фона.

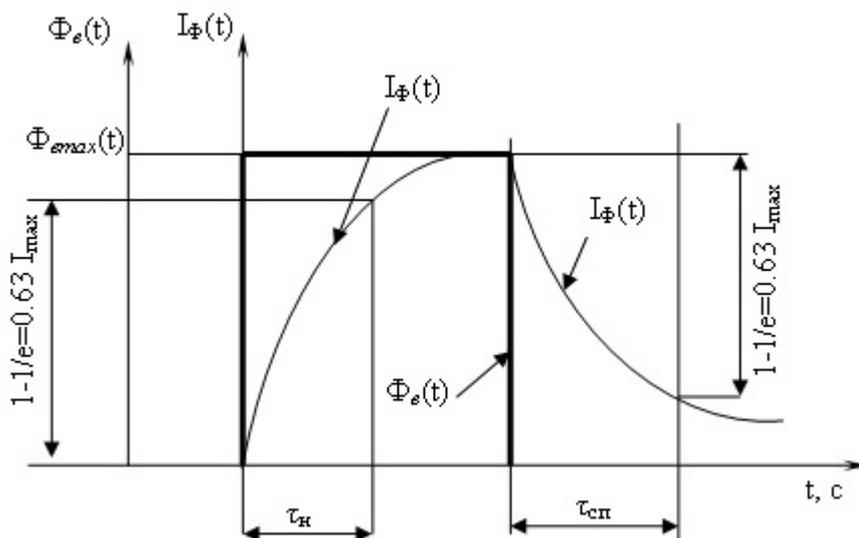


Рисунок 1 - Определение постоянной времени фотоприемника

Темновое сопротивление можно вычислить, зная темновой ток:

$$R_{Ti} = U/I_{Ti}.$$

Затем находят среднее значение темнового сопротивления:

$$R_{T,ср} = \sum_{i=1}^n R_{Ti}/n, \text{ и вычисляют максимальное отклонение } R_T \text{ от средней величины:}$$

$$\Delta R_{T\max} = |R_{T,i,m} - R_{T,ср}|, \text{ и нестабильность темнового сопротивления:}$$

$$\delta R_T = (\Delta R_{T\max}/R_{T,ср}) \cdot 100\%.$$

Параметр  $\lambda_{\max}$  определяет местоположение максимума спектральной чувствительности ПОИ, а  $\lambda'$  и  $\lambda''$  — наименьшую и наибольшую длины волн монохроматического излучения, при которых монохроматическая чувствительность ПОИ падает до 0,1 ее максимального значения.

Из эксплуатационных параметров следует отметить наиважнейшие — рабочее напряжение ПОИ  $U_p$  и максимально допустимую рассеивающую мощность ПОИ  $P_{\max}$ , обеспечивающие номинальные параметры ПОИ при длительной его работе в заданных условиях.

### Характеристики ПОИ

Спектральные характеристики определяют спектральный диапазон чувствительности ПОИ.

Абсолютная спектральная характеристика чувствительности фотоприемника  $S_{абс}(\lambda)$  характеризует зависимость монохроматической чувствительности ПОИ  $S_{\lambda}$ , измеренной в абсолютных единицах, от длины волны падающего на ПОИ потока излучения.

В большинстве случаев спектральные характеристики ПОИ имеют вид плавных кривых с одним максимумом при  $\lambda_{\max}$ . Измерить абсолютную спектральную характеристику на практике очень трудно, так как она изменяется

не только от серии к серии приемников, но зависит от каждого отдельного приемника внутри серии.

Между тем, относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприемника  $S_{\text{отн}}(\lambda)$  — зависимость монохроматической его чувствительности, отнесенной к значению максимальной чувствительности, от длины волны регистрируемого излучения — практически не меняется от приемника к приемнику одного и того же типа, а зависит от материала чувствительного слоя (ее значения даны в справочниках):

$$S_{\text{отн}}(\lambda) = S_{\text{абс}}(\lambda)/S_{\lambda_{\text{max}}}.$$

Зная из справочника  $S_{\text{отн}}(\lambda)$  и измерив  $S_{\lambda_{\text{max}}}$  приемника, можно легко построить  $S_{\text{абс}}(\lambda)$ .

Экспериментально относительную спектральную характеристику чувствительности определяют при модулированном и немодулированном (без модулятора) потоках излучения. Конструкция установки должна предусматривать одинаковый оптический ход потока излучения от источника до исследуемого и аттестованного приемников излучения. Требования к аппаратуре регламентирует ГОСТ 17772-88. В качестве аттестованного приемника можно использовать неселективный приемник в необходимой области спектра или селективный с известной спектральной чувствительностью. При снятии  $S_{\text{отн}}(\lambda)$  приемник должен работать на линейном участке энергетической характеристики, поэтому рекомендуемый максимальный поток излучения:

$$\Phi_{\text{max}} \leq 10^3 \Phi_{\text{п}}^* \sqrt{\Delta f_{\text{эфф}}} A.$$

Сначала измеряют по аттестованному приемнику распределение спектральной плотности потока излучения по длине волны на выходе монохроматора (меняя длину волны через 50–100 нм, а в области максимума — через 10...20 нм) в относительных единицах, затем снимают сигнал с исследуемого приемника. Относительная спектральная характеристика чувствительности исследуемого приемника:

$$S_{\text{отн}}(\lambda) = n_{\lambda} m_{\lambda_{\text{max}}}/(m_{\lambda} n_{\lambda_{\text{max}}}),$$

где  $n_{\lambda}$  и  $m_{\lambda}$  — показания регистрирующего сигнал прибора в цепи исследуемого и аттестованного приемников;  $n_{\lambda_{\text{max}}}$  и  $m_{\lambda_{\text{max}}}$  — максимальные показания регистрирующего сигнал прибора в цепи исследуемого и аттестованного приемников излучения.

Если приемник имеет нелинейную энергетическую характеристику фототока, то его относительную спектральную характеристику чувствительности определяют следующим образом: устанавливают последовательно требуемые длины волн и с помощью регулировки режима источника или с помощью специального устройства в монохроматоре изменяют поток излучения, добываясь неизменного сигнала на выходе исследуемого ПОИ. Затем это же спектральное распределение измеряют в относительных единицах аттестованным неселективным приемником. Значение

$$S_{\text{отн}}(\lambda) = m_{\lambda_{\text{min}}}/m_{\lambda},$$

где  $m_{\lambda,\min}$  — минимальное показание прибора в цепи аттестованного приемника.

На основании полученных результатов строят график  $S_{\text{отн}}(\lambda) = f(\lambda)$ , по которому можно определить монохроматическую вольтовую  $S_{U\lambda}$  (или токовую  $S_{I\lambda}$ ) чувствительность исследуемого приемника на длине волны по формуле

$$S_{U\lambda} = S_{\text{отн}}(\lambda)S_{U\lambda,\max},$$

где  $S_{U\lambda,\max}$  — вольтовая (токовая) чувствительность исследуемого фотоприемника в максимуме чувствительности, которая может быть измерена заранее или определена по формуле связи интегральной и спектральной чувствительностей:

$$dU_{\lambda} = S_{\text{абс}U}(\lambda)d\Phi_e = S_{\text{абс}U}(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda = S_{U\lambda,\max} S_{\text{отн}}(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda.$$

Для получения сигнала от всего потока необходимо проинтегрировать полученное выражение:

$$U = S_{U\lambda,\max} \int_0^{\infty} S_{\text{отн}}(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda = S_{U\lambda,\max} \Phi_{\text{эфф}}. \quad (1.1)$$

Эффективный поток излучения  $\Phi_{\text{эфф}}$  для данных приемника и источника — это поток, который при чувствительности приемника, постоянной по всему спектру и равной максимальному значению ( $S_{U\lambda,\max}$ ), вызвал бы такой же сигнал, какой вызывает весь падающий реальный поток при реальной спектральной чувствительности (относится к параметрам). Интегральный поток от источника:

$$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda.$$

Следовательно, интегральная вольтовая чувствительность:

$$S_U = \frac{U}{\Phi} = S_{U\lambda,\max} \frac{\int_0^{\infty} S_{\text{отн}}(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda} = S_{U\lambda,\max} \cdot \chi.$$

Отношение интегралов в полученном выражении показывает, какую долю в сложном потоке, падающем на ПОИ, составляет эффективный поток ( $\Phi_{\text{эфф}}$ ) для данного приемника и источника. Отношение интегралов, обозначенное  $\chi$ , называют коэффициентом использования потока излучения данным приемником (параметр приемника) или спектральным КПД приемника. Из выражения (1.1) при известных  $S_U$ ,  $S_{\text{отн}}(\lambda)$  и  $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$  определяют  $S_{U\lambda,\max} = S_U/\chi$ . Спектральный КПД приемника  $\chi$  — очень важный параметр, его можно найти в таблицах или графоаналитически, построив  $\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda}(\lambda)/\Phi_{e\lambda,\max}$  и  $S_{\text{отн}}(\lambda)$  (рис. 2а):

$$\chi = \frac{\int_0^{\infty} S_{отн}(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} S_{отн}(\lambda) \varphi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{A_1}{A_0}.$$

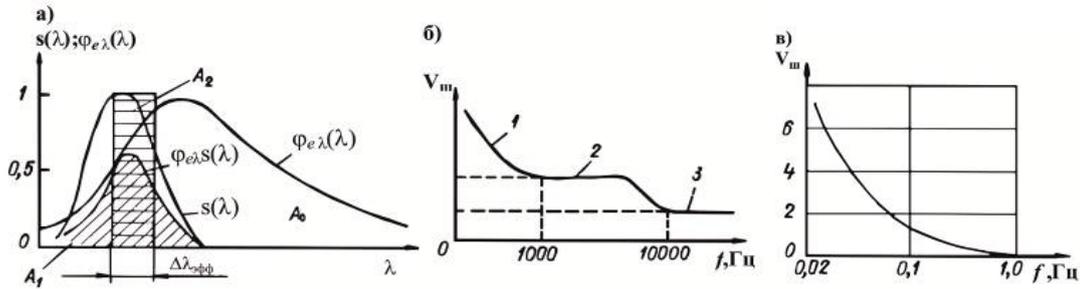


Рисунок . 2 - Спектральный КПД приемника, эффективная полоса его чувствительности (а), спектры шума фоторезистора (б) и фотодиода (в): 1 — токовый шум; 2 — генерационно-рекомбинационный шум; 3 — тепловой и радиационный шум.

Если для приемника известны  $S_{инт,е}$  по какому-либо излучателю и  $S_{отн}(\lambda)$ , то можно определить и его спектральную абсолютную чувствительность:

Из формулы 1.1:  $S_{инт,е} = S_{\lambda,е,макс} \cdot \chi$ , так как  $S_{отн}(\lambda) = S_{абс,е}(\lambda) / S_{\lambda,е,макс}$ ,

Откуда:  $S_{\lambda,е,макс} = S_{инт,е} / \chi = S_{абс}(\lambda) / S_{отн}(\lambda)$

Следовательно:  $S_{абс}(\lambda) = S_{инт,е} \cdot S_{отн}(\lambda) / \chi$ .

В расчетах ОЭП часто используют такой параметр, связанный со спектральной чувствительностью, как эффективная ширина полосы чувствительности приемника  $\Delta\lambda_{эфф}$ , введенный М. М. Мирошниковым [15].

Эффективная ширина полосы чувствительности приемника характеризует ширину диапазона спектра (в мкм), в которой был бы сосредоточен весь эффективный для данного приемника поток излучения, при условии, что в этом интервале спектра функция спектральной плотности потока излучения постоянна и равна своему максимальному значению, т. е.

$$\Delta\lambda_{эфф} = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) S_{отн}(\lambda) d\lambda / \Phi_{e\lambda,макс},$$

или, переходя к относительным единицам путем деления числителя и знаменателя на  $\Phi_{e\lambda,макс}$ , получим

$$\Delta\lambda_{эфф} = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) S_{отн}(\lambda) d\lambda.$$

Графическое отображение  $\Delta\lambda_{эфф}$  дает рис. 1.5а. Сравнивая выражение для  $\chi$  и  $\Delta\lambda_{эфф}$ , можно заметить связь между ними:

$$\Delta\lambda_{эфф} = \chi \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\Phi_{e\lambda,макс}} = \chi \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda = \chi \frac{\Phi_e}{\Phi_{e\lambda,макс}}.$$

Для тепловых приемников  $S_1 = 1$ , поэтому и  $\chi = 1$ . Следовательно, для тепловых приемников

$$\Delta\lambda_{\text{эфф.т}} = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda / \Phi_{e\lambda.\text{max}} = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda.$$

Если для теплового приемника в качестве источника использовать абсолютно черное тело при температуре  $T$ , для которого по закону Стефана–Больцмана известна энергетическая светимость  $M_e^0 = \sigma T^4$  и максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости  $M_{e\lambda.\text{max}}^0 = aT^5$ , то

$$\Delta\lambda_{\text{эфф.т}}^0 = \frac{\Phi_e^0}{\Phi_{e\lambda.\text{max}}^0} = \frac{M_e^0}{M_{e\lambda.\text{max}}^0} = \frac{\sigma T^4}{aT^5} = \frac{4310}{T},$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  [Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>] — постоянная Стефана–Больцмана;  
 $a = 1,315 \cdot 10^{-11}$  [Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>5</sup>·мкм)].

Выразим  $\lambda$  через  $\Delta\lambda_{\text{эфф}}$ :

$$\chi = \frac{\int_0^{\infty} S_{\text{омн}}(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} S_{\text{омн}}(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\Phi_{e\lambda.\text{max}} \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\Delta\lambda_{\text{эфф}}}{\Delta\lambda_{\text{эфф.т}}}.$$

### Вольтовые характеристики

Вольт-амперной характеристикой ПОИ  $I(U)$  называют зависимость тока ПОИ от напряжения питания, приложенного к нему при фиксированном потоке излучения. Она определяет электрические свойства ПОИ и позволяет выбрать схему его включения.

Вольтовые характеристики выражают зависимость от напряжения питания чувствительности  $S(U)$  при постоянном потоке излучения, среднеквадратичного значения тока шума  $I_{\text{ш}}(U)$ , среднеквадратичного значения напряжения шума  $U_{\text{ш}}(U)$ , порогового потока  $\Phi_{\text{п}}(U)$ , удельной пороговой чувствительности ПОИ  $\Phi_{\text{п}}^*(U)$  и удельной обнаружительной способности  $D^*(U)$ . Эти зависимости влияют на параметры ОЭП, поэтому их надо учитывать при расчетах.

### Характеристики зависимости параметров ПОИ от мощности излучения

К характеристикам зависимости параметров ПОИ от мощности излучения относят световые характеристики ФЭ и ФЭУ — зависимости их анодного фототока от светового потока  $I_{\text{а}}(\Phi_{\text{в}})$  и т. д. По этим характеристикам можно определять вольтовую и токовую чувствительности, так как они являются крутизной зависимостей  $U_{\text{с}} = f(\Phi_{\text{е}})$  и  $I_{\text{ф}} = f(\Phi_{\text{е}})$ . У большинства приемников их чувствительность с увеличением потока излучения падает, поэтому при расчетах ОЭП с ПОИ надо вводить поправки на ее падение при заданном спектральном составе излучения по энергетическим характеристикам.

### Фоновые характеристики

Фоновые характеристики — это зависимости, определяющие изменения чувствительности  $S(\Phi_{\text{ф}})$ , тока шума  $I_{\text{ш}}(\Phi_{\text{ф}})$ , напряжения шума  $U_{\text{ш}}(\Phi_{\text{ф}})$ , удельной пороговой чувствительности ПОИ  $\Phi_{\text{п}}^*(\Phi_{\text{ф}})$  или удельной обнаружи-

тельной способности  $D^*(\Phi_\phi)$  от немодулированного потока излучения фона. Эти зависимости также необходимо учитывать при расчете ОЭП и ПОИ и принимать меры к уменьшению фоновых засветок при помощи фильтров, пропускающих только рабочий спектральный интервал излучения.

### Частотные характеристики ПОИ

Частотной характеристикой ПОИ называют зависимость какого-либо из его параметров (чаще чувствительности или обнаружительной способности) от частоты модуляции потока излучения  $f$ . Частотная характеристика определяет, как и постоянная времени, динамические свойства ПОИ и связана с постоянной времени ПОИ  $\tau$ , так как последняя определяет допустимую (граничную) частоту модуляции  $f_{гр}$  потока излучения, когда сигнал падает в заданное число раз за счет инерционности ПОИ. Вид частотной характеристики зависит от формы модуляции. Так, динамические свойства приемника, имеющего экспоненциальную зависимость изменения выходного сигнала во времени при синусоидальной форме модуляции потока излучения, описываются следующим выражением:

$$I(f) = \left[ \Phi_0 S_I / \sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2} \right] \exp[-i(\omega t + \varphi)],$$

где  $\Phi_0$  — амплитуда потока излучения, Вт;  $f$  — частота модуляции потока излучения, Гц;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота изменений потока излучения, Гц;  $\varphi$  — сдвиг фазы гармонической составляющей выходного тока относительно фазы потока излучения;  $S_I$  — токовая чувствительность ПОИ, А/Вт;  $\tau$  — постоянная времени ПОИ, с.

Множитель в квадратных скобках характеризует изменения амплитуды выходного сигнала в зависимости от частоты модуляции потока излучения  $f$ , а за скобками — фазу. При  $f = 0$  амплитуда максимальна:  $I_0 = \Phi_0 S_{I0}$ ,  $S_{I0} = I_0 / \Phi_0$ . Отсюда относительное изменение токовой чувствительности ПОИ в зависимости от частоты модуляции потока излучения  $f$ :

$$S_{I_f} / S_{I_0} = 1 / \sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2}.$$

Если считать допустимой частотой модуляции потока излучения такую  $f_{гр}$ , когда  $S_{I_f}$  за счет инерционных свойств приемника уменьшается в два раза, как это принято в ОЭП, то можно найти соотношение между  $\tau$  и  $f_{гр}$ :

$$1/2 = 1 / \sqrt{1 + (2\pi f_{гр} \tau)^2}.$$

откуда  $4 = 1 + 4\pi^2 f_{гр}^2 \tau^2$ ,  $\tau f_{гр} \leq \sqrt{3} / (2\pi) \approx 0,28$ . При этих же условиях падения  $S_{I_f}$  для прямоугольной формы модуляции потока излучения  $\tau f_{гр} \leq 1,1/\pi \approx 0,32$ . Общее условие выбора граничной частоты модуляции для ОЭП в зависимости от постоянной времени приемника —  $f_{гр} \approx 0,3/\tau$ .

Зависимость сдвига фазы гармонической составляющей выходного тока (напряжения) относительно соответствующей ей гармонической составляющей потока излучения от частоты его модуляции называют фазовой характеристикой:  $\text{tg } \varphi = -\omega\tau$ .

Частотной характеристикой удельной обнаружительной способности ПОИ называют зависимость его удельной обнаружительной способности от частоты модуляции потока излучения  $D^* = \varphi(f)$ .

Важными характеристиками ПОИ являются спектральное распределение плотности среднеквадратичного значения тока шума  $I_{ш}(f)$  и напряжения  $U_{ш}(f)$  шума по частотам (спектр мощности шума). Они позволяют правильно выбрать частоту модуляции сигнала и полосу пропускания электронного тракта так, чтобы уменьшить влияние собственных шумов ПОИ на ОЭП.

Температурные характеристики определяют изменения различных параметров ПОИ в зависимости от изменения температуры его чувствительного слоя:  $R(T)$ ,  $I_T(T)$ ,  $I_{ш}(T)$ ,  $U_{ш}(T)$ ,  $D^*(T)$  и т. д.

К временным и пространственным характеристикам ПОИ относят угловую характеристику чувствительности  $S(\theta)$ ; зависимость чувствительности от положения светового зонда на светочувствительном элементе — зонную характеристику  $S(xy)$ ; для координатных приемников — координатные характеристики  $U_{вых}(x)$ ,  $U_{вых}(y)$ , определяющие зависимость выходного сигнала ПОИ от положения пятна на чувствительном слое; временной дрейф нулевой точки координатного приемника — смещение нулевой точки координатной характеристики при постоянной температуре в течение заданного интервала времени; зависимости изменения параметров ПОИ во времени, характеризующие их стабильность.

### 3. ПРИЕМНИКИ НА ВНЕШНЕМ ФОТОЭФФЕКТЕ

К приемникам оптического излучения на внешнем фотоэффекте относятся электровакуумные фотоэлементы (вакуумные или ионные диоды, основанные на явлении фотоэлектронной эмиссии электронов в вакууме или газе преобразуют энергию), фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) — (электровакуумный прибор, преобразующий энергию оптического излучения в электрические сигналы) и электронно-оптический преобразователь

#### 3.1 ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ

Фотоумножитель (ФЭУ) — электровакуумный прибор, преобразующий энергию оптического излучения в электрические сигналы. ФЭУ состоит из фотокатода, вторично-электронного умножителя и анода [5, 7].

Кроме фотокатода и анода содержит еще фокусирующую электронно-оптическую систему, диафрагму и дополнительные электроды (диноды), являющиеся эмиттерами вторичных электронов (рис.3 ).

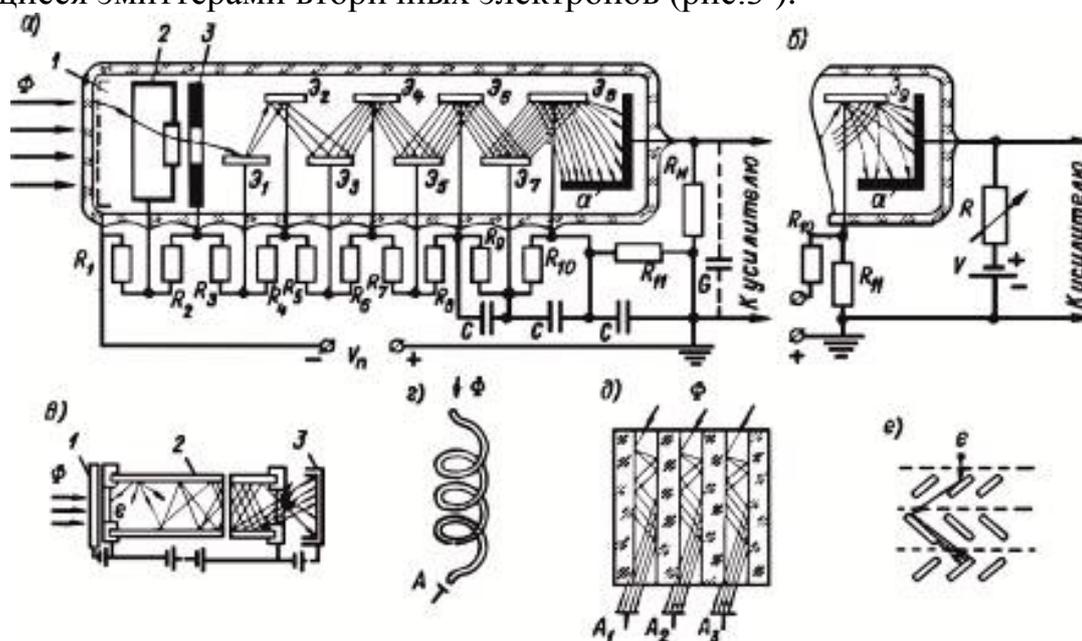


Рисунок 3 - Устройство ФЭУ со схемой его питания (а, б) и пояснение работы канального (в-д) и жалюзийного (е) ФЭУ

При освещении фотокатод  $1$  эмитирует первичные фотоэлектроны, которые ускоряются электрическим полем и фокусируются электронно-оптической системой  $2$  на первый динод  $\mathcal{E}_1$ , вызывая его увеличенную вторичную электронную эмиссию. Вторичные электроны, вылетевшие из первого динода, ускоряются электрическим полем и направляются на второй динод  $\mathcal{E}_2$ , увеличенный поток электронов со второго динода — на третий и т. д.

Электрическое поле, ускоряющее электроны, создается делителем постоянного напряжения  $R_1, \dots, R_{11}$ , обеспечивающим большой положительный потенциал каждого последующего каскада относительно предыдущего.

Фотокатоды ФУ могут работать «на просвет» и на «отражение». При работе на просвет полупрозрачный фотокатод наносят на плоское входное окно колбы в виде круга диаметром 10...50 мм (иногда до 250 мм), при работе на отражение входное окно часто располагают на боковой стенке колбы, а излучение через него попадает на фотокатод со стороны вакуума.

Пространство, образуемое поверхностями фотокатода 1 (рис 3а) и первого динода Э<sub>1</sub> с расположенными между ними электродами, называют катодной (входной) камерой ФЭУ. Форма и распределение электрического потенциала по поверхности фотокатода, фокусирующего электрода 2 и диафрагмы 3 должны обеспечить максимальный сбор фотоэлектронов на первый динод за счет использования законов движения электронов в электрическом поле.

Качество электронно-оптической системы катодной камеры определяется коэффициентом сбора электронов  $\gamma_k$  (отношением числа фотоэлектронов, достигших первого динода, к общему числу эмитированных фотокатодом электронов  $n_k$ ). Коэффициент сбора электронов у современных ФЭУ близок к единице. Надо везде «к» маленькое.

Первичные фотоэлектроны, попадая на первый динод, взаимодействуют с электронами его вещества и возбуждают их до более высоких энергетических состояний. Часть электронов перемещается к границе динода с вакуумом. Электроны, достигшие поверхности с энергией, превышающей поверхностный потенциальный барьер, переходят в вакуум и ускоряются электрическим полем в направлении ко второму диноду. Время вторичной электронной эмиссии меньше  $10^{-12}$  с [4,11,14]...

Благодаря делителю напряжения, обеспечивающему повышение потенциала на каждом последующем диноде, вторичные электроны направляются последовательно на следующие диноды, причем их количество возрастает после каждого динода. Увеличение числа электронов оценивается **коэффициентом вторично-электронной эмиссии**:  $\sigma = \frac{n_2}{n_1}$ , где  $n_2$  - число вторичных электронов после динода;  $n_1$  - число первичных электронов на диноде. Поток электронов собирается на аноде А. На нагрузочном резисторе  $R_n$  возникает напряжение фотосигнала.

Коэффициент вторичной электронной эмиссии динода зависит от энергии первичных электронов, от материала динода и состояния его поверхности. Энергия первичных электронов в диапазоне 100...1800 эВ дает максимальное значение  $\sigma$ . В качестве вторично-эмиссионных материалов динодов применяют  $SbCs_3$  и окисленные сплавы CuBe, AlMg, AgMg, CuMg, GaP(Cs) и т. д. Форму и расположение динодов выбирают, учитывая: максимальный сбор электронов, эмитированных предыдущим динодом; одинаковое время пролета электронов от фотокатода до анода (траектории электронов должны быть изохронными для обеспечения малой постоянной времени); отсутствие объемного заряда, приводящего к нелинейности световой характеристики.

Часть электронов из-за несовершенства системы рассеивается и попадает на стенки баллона и на нерабочие участки динодов, что учитывает коэффициент эффективности динодного каскада  $\gamma_i$  (отношение числа электронов, попавших на  $(i + 1)$ -й динод, к числу электронов, вышедших из  $i$ -го динода). У современных ФУ  $\gamma_i = 0,7 \dots 0,95$ .

Число электронов, собираемых на анод:

$$n_a = n_K \gamma_K \prod_{i=1}^m \sigma_i \gamma_i = n_K \gamma_K M,$$

где  $m$  — число каскадов;  $M$  — коэффициент усиления ФЭУ.

Если  $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma$ , а  $\gamma_K = \gamma_i = 1$ , то  $M = \sigma^m$  или  $I_a = I_K \sigma^m$ , где  $I_a$  — анодный ток ФЭУ,  $I_K$  — ток эмиссии фотокатода.

Для серийных ФЭУ при среднем коэффициенте вторичной эмиссии  $\sigma = 4$  и числе каскадов 12, коэффициент усиления ФЭУ  $M = 10^7$ , что достаточно для регистрации сигнала на выходе от одного упавшего на фотокатод кванта (выбившего один фотоэлектрон).

В последние годы находят широкое применение жалюзийные и канальные ФЭУ, отличающиеся от обычных построением динодной системы.

Жалюзийная динодная система (рис. 3е) состоит из наклонных полосок и прозрачной сетки, находящейся под тем же потенциалом. Сетка экранирует жалюзи, обеспечивая попадание вторичных электронов на лопасти следующего динода. Эффективность жалюзийного динода невелика (88%), однако подобные системы имеют и некоторые преимущества, обеспечивая широкий диапазон линейности световой характеристики, высокую стабильность анодного тока, относительную нечувствительность к небольшим изменениям межкаскадных напряжений, стабильность анодного тока при наличии магнитных полей, большую площадь динода, позволяющую работать при повышенных токовых нагрузках.

В жалюзийных ФУ между катодной камерой и динодной системой помещают кольцевой электрод-модулятор, изменяющий анодную чувствительность ФЭУ в широких пределах и осуществляющий внутреннюю модуляцию сигнала.

Большие возможности для миниатюризации ФУ представляет использование непрерывного динода с распределенным сопротивлением. В простейшем случае такой динод представляет собой трубку (канал) (рис. 3в–д), изготовленную, например, из специального стекла, на поверхности которого в результате термообработки в водороде образуется слой, обладающий необходимыми электрическим сопротивлением и коэффициентом вторичной электронной эмиссии  $R = 10^7 \dots 10^8$  Ом,  $\sigma = 3 \dots 3,5$  при  $E = 300$  эВ.

При подаче высокого напряжения на концы канала через проводящие контакты по его поверхностному слою течет ток, создающий падение напряжения вдоль канала. Вторичный электрон, выбитый из внутренней стенки канала, под действием электростатического поля ускоряется и ударяется о

стенку канала в точке с более высоким потенциалом. Усиление в канале зависит от отношения его диаметра к длине (калибр), напряжения на концах канала и вторично-эмиссионных свойств рабочей поверхности [67]. При оптимальном калибре канала, равном 50...100, и напряжении около 2,5 кВ можно получить усиление  $10^6 \dots 10^7$ .

Простейшая (прямая) форма канала не позволяет получить больших усилений в ФУ из-за увеличения шумов, обусловленных оптической и ионной обратными связями с анода на фотокатод (прямое видение).

Для устранения этого недостатка каналу может быть придана форма спирали (спиральтрон), для чего систему из нескольких соединенных вместе параллельных каналов (например, четырех) закручивают вокруг оси при ее изготовлении (рис. 2).

Недостаток прямых и изогнутых каналов — низкая эффективность эквивалентного каскада умножения, так как часть вторичных электронов выходит под такими углами к оси трубки, что попадает в тормозящее поле и не участвует в дальнейшем процессе умножения. Кроме того, наблюдается большой разброс времени пролета электронов из-за отсутствия их фокусировки, что увеличивает постоянную времени. Эти недостатки устранены в системах со скрещенными магнитными и электрическими полями, которые используют для изготовления высокочастотных ФУ.

Анодный блок ФУ состоит из последнего динода и анода. Часто анод выполняют в виде сетки и располагают между предпоследним и последним динодами. В этом случае электроны от последнего динода ускоряются анодом-сеткой и, умножаясь на последнем диноде, собираются на аноде. Недостатком сеточного анода является перехват части электронов на пути к последнему диноду, что ухудшает временное разрешение ФЭУ.

Кроме общих параметров и характеристик электровакуумных фотоэлектронных приборов (интегральной чувствительности фотокатода, спектральной характеристики чувствительности фотокатода и т.д.), фотоумножитель оценивается также специфическими параметрами и характеристиками.

**Коэффициент усиления фотоумножителя по току  $M$**  - отношение анодного фототока фотоумножителя  $I_{\text{фа}}$  к фототоку фотоумножителя  $I_{\text{ф}}$  (в цепи фотокатода):

$$M = \frac{I_{\text{фа}}}{I_{\text{ф}}}$$

При одинаковых коэффициентах вторично-электронной эмиссии для всех динодов:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma$$

получим:

$$M = \sigma^m$$

где  $m$  - число каскадов усиления (динодов). Коэффициент усиления ФЭУ можно также определить как отношение интегральной анодной чувствитель-

ности ФУ  $S_a$  к интегральной чувствительности фотокатода  $S_{фк}$  при определенном напряжении между анодом и фотокатодом  $U_{ак} = const$  и рекомендованной паспортном на ФЭУ схемой включения:

$$M = S_a/S_{фк}.$$

**Световая анодная чувствительность фотоумножителя  $S_{va}$**  - отношение анодного фототока фотоумножителя к падающему на фотокатод световому потоку:

$$S_{ya} = \frac{I_{фа}}{\Phi_y}.$$

**Анодная характеристика фотоумножителя  $I_{фа}(U_{а-нд})$**  - зависимость анодного фототока фотоумножителя от напряжения питания между анодом и последним динодом.

Спектральная (монохроматическая) чувствительность ПОИ  $S_\lambda$  - это чувствительность ПОИ к монохроматическому излучению:

$$S_\lambda = dC/d\Phi_\lambda,$$

где  $dC$  - электрический сигнал, вызываемый падающим на ПОИ монохроматическим потоком  $d\Phi$  или монохроматической облученностью ПОИ  $dE_\lambda$ .

**Спектральная чувствительность ФУ** определяется в основном типом фотокатода и материалом стекла колбы. **Относительная спектральная характеристика чувствительности ФУ** в отличие от абсолютной, практически одинакова для различных экземпляров приборов одной марки. Электровакуумные фотоэлектронные приборы являются типичными **селективными ПОИ** (имеющими различную чувствительность к излучению различных длин волн). Для регистрации излучения с  $\lambda < 105$  нм применяют ФУ с открытым входом (нет входного окна). Селективность электровакуумных фотоэлектронных приборов объясняется селективностью процессов, происходящих в фотокатоде при внешнем фотоэффекте. Наибольшее распространение получили фотокатоды из полупроводниковых материалов. У таких фотокатодов зависимость квантового выхода (отношения числа фотоэлектронов к числу падающих квантов) от частоты излучения определяется, главным образом, спектральным распределением коэффициента фотоэлектрического поглощения, который возрастает при увеличении частоты фотонов. Характер этого распределения обусловлен структурой энергетических зон полупроводника и преобладающим типом оптических электронных переходов.

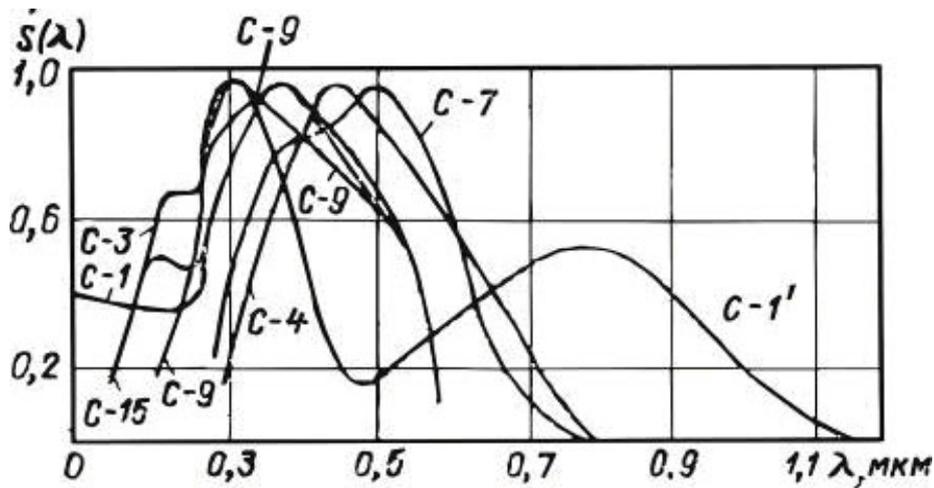


Рисунок 4 - Спектральные характеристики некоторых фотокатодов

В паспортах ФУ указывается ряд рекомендованных значений напряжения питания  $U_{ак}$ , соответствующих определенным номинальным значениям анодной чувствительности:  $S_a = 1, 3, 10, 30, 100, 1000, \dots$  А/лм, иногда приводится одно значение  $S_a$  при рекомендованном  $U_{ак}$ . Для разных экземпляров ФЭУ одного и того же типа разброс  $S_a$  при  $U_{ак} = \text{const}$  может превышать порядок, а для разных типов ФЭУ — несколько порядков.

Временное разрешение ФУ зависит от времени внешнего фотоэффекта ( $10^{-12}$  с), времени вторичной эмиссии ( $10^{-12}$  с), времени пролета электронов от фотокатода до анода (с учетом умножения на динодах), изохронности (одновременности) их прихода на анод и постоянной времени схемной релаксации  $\tau_p$ .

Постоянная времени по фронту нарастания импульса для обычных ФЭУ составляет  $5 \dots 10$  нс (при  $\tau_p < 1$  нс), что позволяет регистрировать модулированные потоки с частотой в сотни мегагерц.

ФУ присущи все виды шумов приемников на основе внешнего фотоэффекта, однако превалирует дробовый шум. Кроме того, следует учитывать тепловые шумы нагрузочного резистора  $R_n$ .

Ток дробового эффекта фотокатода в ФУ усиливается каждым каскадом [5]:

$$I_{др} = \sqrt{2eI_k M^2(1+B)\Delta f},$$

где  $I_k$  — суммарный ток фотокатода, складывающийся из его фототока и темнового тока, А;  $\Delta f = f_2 - f_1$  — полоса частот;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  А·с — заряд электрона;  $1 + B = 2,5$  для ФЭУ с электростатической фокусировкой — множитель, учитывающий влияние дробового эффекта эмиттеров.

С учетом тепловых шумов ФЭУ ( $R_n$ ) среднеквадратичное значение суммарного шумового тока на входе усилителя:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_{др}^2 + I_{тепл}^2} = \sqrt{2eI_k M^2(1+B)\Delta f + 4kT\Delta fR_n^{-1}},$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура нагрузочного сопротивления  $R_n$ , К.

Пороговая чувствительность ФУ:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{\sqrt{2eI_{\text{к}}M^2(1+B)\Delta f + 4kT\Delta fR_{\text{н}}^{-1}}}{S_{\text{а}}}, \quad (3.2)$$

где  $S_{\text{а}}$  — анодная чувствительность ФЭУ, А/лм.

При расчете порогового (темнового) тока ФУ (при отсутствии фоновой засветки) основной составляющей тока фотокатода  $I_{\text{к}}$  будет его темновой ток  $I_{\text{тк}}$ , значение которого и подставляют в формулу (4.2). Так как в паспорте ФЭУ приведено значение темнового анодного тока  $I_{\text{та}}$ , то значение  $I_{\text{тк}}$  рассчитывают по формуле

$$I_{\text{тк}} = I_{\text{та}}/M.$$

Темновой ток возникает в результате термоэлектронной эмиссии фотокатода и динодов (особенно первых, так как их ток усиливается), автоэлектронной эмиссии электродов, тока обратных ионной и оптической связей, а также тока утечки между анодом и остальными электродами.

В спектре темнового тока равномерно представлены составляющие всех частот — белый шум. При регистрации переменного сигнала на уровне постоянной фоновой засветки в формулу для определения порогового потока подставляют суммарный ток:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{тк}} + I_{\text{фк}} = I_{\text{тк}} + \Phi_{\text{ф}}S_{\text{фк}},$$

где  $\Phi_{\text{ф}}$  — поток фона, лм (Вт);  $I_{\text{фк}}$  — ток фотокатода от фоновой засветки;  $S_{\text{фк}}$  — интегральная чувствительность фотокатода, А/лм (А/Вт).

ФУ необходимо защищать от внешних магнитных и электростатических полей, так как они меняют траекторию электронов и, как следствие, изменяют коэффициент его усиления.

Фотокатод и электроды, находящиеся под напряжением, должны быть защищены от засветок, так как большие засветки выводят ФЭУ из строя. Поскольку наибольшее изменение параметров ФУ происходит сразу же после включения (примерно через 30 мин), для точных измерений рекомендуется предварительная выдержка ФУ под напряжением в течение 1...2 ч. При работе с пороговыми потоками необходимо ФУ предварительно выдерживать в темноте.

Изменение интегральной чувствительности ФУ в процессе длительной работы не превышает 50...80%, что легко компенсирует изменение напряжения питания на 10...20%. Данные упомянутых ФУ приведены в таблицах 1, 2 и 3 [5, 7].

Области использования ФУ очень разнообразны, так как эти устройства имеют большой коэффициент усиления, малую инерционность и низкий уровень собственных шумов. В частности, ФУ используют для измерения малых постоянных или медленно изменяющихся потоков излучения и для регистрации кратковременных быстро изменяющихся малых потоков излучения. Широкое использование ФУ нашли в астрономии, оптической и ядерной спектроскопии, телевидении, космической технике, медицине. На сегодняшний день основными областями их применения являются ядерная спектроскопия и сцинтилляционная спектрометрия.

**Таблица 1. ФУ для измерения пороговых световых потоков**

Параметр	ФЭУ-27	ФЭУ-31А	ФЭУ-64	ФЭУ-79	ФЭУ-101
Максимальный диаметр, мм	30,5	22,5	48,5		20
Максимальная длина, мм	108	79	175		87
Диаметр катода, мм	25	18	5	6	10
Область спектральной чувствительности, нм	300-800	300-600		300-820	300-600
Средняя чувствительность, нм	480-520	340-440	380-420	400-400	380-490
Средняя чувствительность катода, мкА/лм	61	70	106	200	90
Средний порог чувствительности, лм/Гц <sup>1/2</sup>	$2,8 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-13}$	$4,3 \cdot 10^{-12}$
Анодная чувствительность, А/лм	30	10	1000		-
Максимальное напряжение питания, В	1800	1300	1500	2500	-
Максимальный темновой ток, А	-	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	-
Фоновой поток, лм	-	10	-		-
Порог чувствительности при фоне, А/лм	$10^{-6}$		-		$10^{-9}$
Максимальный порог чувствительности, лм/Гц <sup>1/2</sup>	$6,75 \cdot 10^{-10}$	$1,12 \cdot 10^{-9}$	-		$8 \cdot 10^{-12}$

**Таблица 2. ФУ для измерений в ИК- и УФ-областях спектра**

Параметр	ФЭУ-28	ФЭУ-39А	ФЭУ-62	ФЭУ-71	ФЭУ-99	ФЭУ-100	ФЭУ-106
Максимальный диаметр, мм	34	48,5	34	31	34		48,5
Максимальная длина, мм	122	178	95	120	100		175
Диаметр катода, мм	25	34	10	16		10	6
Область спектральной чувствительности, нм	400-1100	160-600	400-1200	160-600	160-300	170-830	
Область максимальной спектральной чувствительности, нм	680-850	420-460	650-850	420-460	200-220	-	400-440
Чувствительность катода, мкА/лм:							
Минимальная	15	25	15	30	-	50	80
Средняя		-				100	200
Анодная чувствительность для режима работы I, А/лм	1	10	1	100	-	10	1000
Напряжение питания максимальное, В	1300	1200	1300	1000	-	1800	2500
Темновой ток, А							
Максимальный	$10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$10^{-8}$	-	$6 \cdot 10^{-10}$	-
Средний	$7 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-8}$		-		$3 \cdot 10^{-8}$
Анодная чувствительность для режима работы II, А/лм	10	1000	-	1000	-	100	-
Напряжение питания максимальное, В	1600	1800	-	1300	-	2200	-
Темновой ток, А:							
максимальный	-	$10^{-6}$	-	$5 \cdot 10^{-7}$	-	$3 \cdot 10^{-9}$	-
средний	-	$3 \cdot 10^{-7}$			-		

**Таблица 3. ФУ для временных измерений [4,11,14].**

Параметр	ФЭУ-30	ФЭУ-36	ФЭУ-65	ФЭУ-72	ФЭУ-77
Максимальный диаметр, мм	68	48,5	185	52,5	48,5
Максимальная длина (без штырьков), мм	210	195	350	160	185
Диаметр фотокатода, мм	50	34	150	34	5
Область спектральной чувствительности, нм	300-600		360-600	350-600	380-830
Область максимальной спектральной чувствительности, нм	360-440	340-440	-	340-440	-
Число каскадов, шт	14	13	14	13	-
Интегральная чувствительность катода средняя, мкА/лм	70	60	40	50	-
Спектральная чувствительность катода ( $\lambda=410$ нм) минимальная, мА/Вт	-	30	-		15
Предел линейности световой характеристики, А	1,1	-	0,7	0,5	0,3
Максимальная амплитуда анодного тока, А	-	0,75	-	1,3	-
Время нарастания анодных импульсов, нс	2,8	-	4,0	2,5	-
Максимальная длительность анодных импульсов, нс	8		12	7	5
Максимальная крутизна переднего фронта импульсов, мА/нс	-	200	-	250	-
Разброс времени пролета фотоэлектронов, нс	0,5	-	2,0	-	
Параметр	ФЭУ-30	ФЭУ-36	ФЭУ-65	ФЭУ-72	ФЭУ-77
Анодная чувствительность, А/лм	5000	1000		100	-
Напряжение питания максимальное, В	3200	2900	3500	2900	-
Темновой ток максимальный, А	-	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$	-

### 3.1.1 Лабораторная работа «ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ»

#### Цели работы:

- закрепить лекционный материал по курсу «Источники и приемники излучения» (раздел «Приемники оптического излучения», тема «Фотоумножители»);
- дать практические навыки по экспериментальному определению спектральной характеристики чувствительности и зависимости анодной чувствительности фотоумножителя от напряжения питания;
- ознакомиться с устройством и работой монохроматора и измерительного усилителя.

#### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5) включает в себя следующее оборудование: блок питания осветителя 1, осветитель 2 с лампой накаливания 3, объективом 4, двигателем 5 и модулирующим диском 6, монохроматор 7 (ДМР-4), эталонный ПОИ 8 (фотодиод ФД-24К), высоковольтный блок питания фотоумножителя 9, переходную оправку 10, исследуемый фотоумножитель 11, измерительный усилитель 12, цифровой вольтметр 13 [10]..

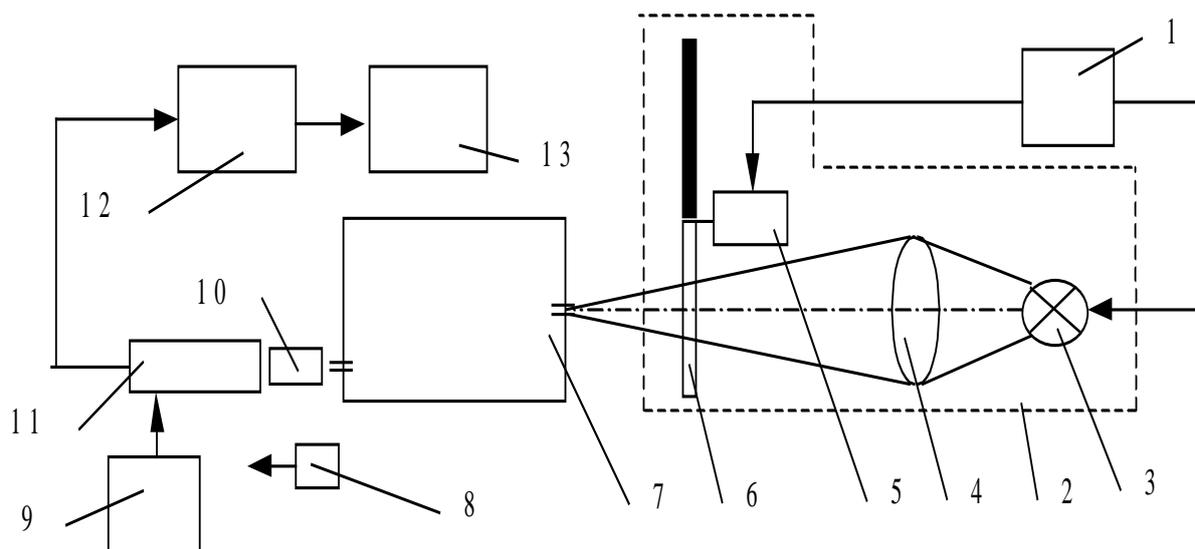


Рисунок 5 - Схема лабораторной установки

Нить лампы 3 при помощи объектива 4 проектируется на входную щель монохроматора 7. Излучение модулируется модулирующим диском 6, закрепленным на оси двигателя 5. Питание на лампу и двигатель модулятора поступает от блока питания 1. На выходную щель монохроматора устанавливается эталонный ПОИ 8 или через переходную оправку 10 исследуемый фотоумножитель 11, подключенный к высоковольтному блоку питания 9. ПОИ подключаются к измерительному усилителю 12, с выходом которого соединен цифровой вольтметр 13.

## Порядок выполнения работы

*Подготовка к измерениям.* Собрать установку по схеме, приведенной на рис. 43. После проверки схемы преподавателем включить приборы в сеть. Проверить заполнение входной щели монохроматора излучением лампы.

### 1. Измерение спектрального распределения потока излучения на выходной щели монохроматора.

1.1. Установить на выходную щель монохроматора эталонный фотодиод и подключить его к измерительному усилителю.

1.2. Установить размеры входной и выходной щелей монохроматора одинаковыми в пределах 0,1...0,5 мм, а средней щели - в 2 раза больше.

1.3. Установить коэффициент усиления измерительного усилителя и пределы измерения цифрового вольтметра в соответствии с указаниями лаборанта или значениями, отмеченными на лабораторной установке.

Таблица 4.

Длина волны, мкм	Отсчет по барабану, дел.	Длина волны, мкм	Отсчет по барабану, дел.	Длина волны, мкм	Отсчет по барабану, дел.
0,500	557	0,600	587	0,800	620
0,510	562	0,620	591	0,840	625
0,520	565	0,640	596	0,880	629
0,530	569	0,660	599	0,920	633
0,540	573	0,680	603	0,960	636
0,550	575	0,700	606	1,000	640
0,560	578	0,720	609	1,040	643
0,570	580	0,740	612	1,080	646
0,580	582	0,760	615	1,120	649
0,590	585	0,780	617		

1.4. Измерить напряжение фотосигнала, снимаемого с ПОИ и усиленного измерительным усилителем, на различных длинах волн, устанавливая по барабану монохроматора в соответствии с градуировочной таблицей 1 длины волн от 500 до 1000 нм с интервалом ~50 нм. Результаты заносить в табл. 5. Измерения повторить 5 раз.

Таблица 5.

Длина волны $\lambda$ , мкм	Сигнал усилителя, В					$S_{\lambda.отн.эт}$	$d\lambda / dl$ , нм/мм	$\frac{U_{эт.отн} dl}{S_{\lambda.отн.эт} d\lambda}$	$\Phi_{\lambda}$
	$U_{эт.1}$	...	$U_{эт.5}$	$U_{эт.ср}$	$U_{эт.отн}$				
0,5									
...									
1,0									

### 2. Определение спектральной характеристики анодной чувствительности фотоумножителя

2.1. Уменьшить размеры входной, выходной и средней щелей монохроматора одинаковыми в соответствии с указаниями лаборанта или значениями, отмеченными на лабораторной установке.

2.2. Установить исследуемый фотоумножитель с переходной оправкой на выходную щель, подключить к усилителю, включить высокое напряжение на блоке питания фотоумножителя, подать на фотоумножитель напряжение питания 600...1200 В и установить коэффициент усиления измерительного усилителя в соответствии с указаниями лаборанта или значениями, отмеченными на лабораторной установке.

2.3. Измерить напряжение фотосигнала, снимаемого с фотоумножителя и усиленного измерительным усилителем, при различных длинах волн, устанавливая по барабану монохроматора те же длины волн, что и в подпункте 1.4. Результаты заносить в табл. 6. Измерения повторить до 5 раз.

Таблица 6.

Длина волны $\lambda$ , мкм	Сигнал усилителя, В					$U_{отн}/\varphi\lambda$	$S_{\lambda.a.отн}$
	$U_1$	...	$U_5$	$U_{cp}$	$U_{отн}$		
0,5							
...							
1,0							

### 3. Определение зависимости анодной спектральной чувствительности фотоумножителя от напряжения питания

3.1 Установить по барабану монохроматора длину волны, соответствующую максимальному напряжению фотосигнала, полученному с фотоумножителя и занесенному в табл. 3.

3.2 Измерить напряжение фотосигнала, снимаемого с фотоумножителя и усиленного измерительным усилителем, при различных напряжениях питания, устанавливая переключателем на высоковольтном блоке питания фотоумножителя напряжения от 0,6 до 1,2 кВ с интервалом 0,1 кВ. Результаты заносить в табл. 7. Измерения повторить 5 раз.

Таблица 7.

Напряжение питания, В	Сигнал усилителя, В				$S_{\lambda.a.отн}$
	$U_1$	...	$U_5$	$U_{cp}$	
600					
...					
1200					

### 4. Расчет относительной спектральной характеристики анодной чувствительности фотоумножителя

4.1. Рассчитать среднее значение напряжения фотосигнала для каждой длины волны в табл. 5 и записать результаты вычислений в таблицу.

4.2. Рассчитать относительное значение напряжения фотосигнала для каждой длины волны в табл. 3

$$U_{\text{отн}}(\lambda) = \frac{U_{\text{отн.ср}}(\lambda)}{U_{\text{отн.ср.макс}}}$$

и записать результаты вычислений в таблицу.

4.3. Занести в табл. 6 значения относительной анодной спектральной чувствительности эталонного ПОИ для соответствующих длин волн, воспользовавшись графиком на рис. 5.

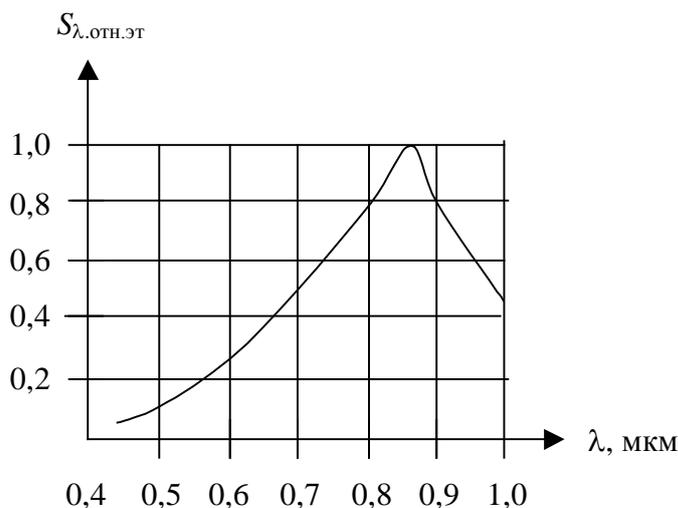


Рисунок 5 - Относительная спектральная характеристика ФД-24К

4.4. Занести в табл. 5 значения обратной линейной дисперсии монохроматора ДМР-4 для соответствующих длин волн, воспользовавшись графиком на рис. 6.

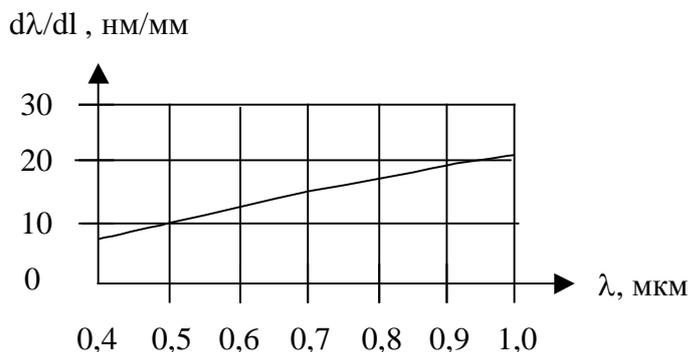


Рисунок 6 - Обратная линейная дисперсия монохроматора ДМР-4

4.5. Рассчитать для каждой длины волны относительное значение спектральной плотности потока излучения (СППИ), выходящего из выходной щели монохроматора и падающего на фотокатод фотоумножителя. СППИ определяется спектром излучения источника и спектральным коэффициентом пропускания монохроматора с учетом относительной спектральной характеристики чувствительности эталонного ПОИ  $S_{\lambda,отн.эт}(\lambda)$  и обратной линейной дисперсии монохроматора  $d\lambda/dl$ :

$$\varphi_{\lambda}(\lambda) = \frac{\left( U_{\text{эт.отн}}(\lambda) \frac{dl}{S_{\lambda,отн.эт}} (\lambda) d\lambda \right)}{\left( U_{\text{эт.отн}} \frac{dl}{S_{\lambda,отн.эт}} d\lambda \right)_{\text{max}}}$$

Результаты вычислений записать в табл. 5.

4.6. Рассчитать среднее значение напряжения фотосигнала для каждой длины волны в табл. 6 и записать результаты вычислений в таблицу.

4.7. Рассчитать относительное значение напряжения фотосигнала для каждой длины волны в табл. 6 и записать результаты вычислений в таблицу.

4.8. Рассчитать для каждой длины волны относительную анодную спектральную чувствительность исследуемого фотоумножителя:

$$S_{\lambda.a.омн}(\lambda) = \frac{\left( U_{омн}(\lambda) / \Phi_{\lambda}(\lambda) \right)}{\left( U_{омн} / \Phi_{\lambda} \right)_{max}}$$

Результаты вычислений записать в табл. 6.

### **5. Расчет относительной зависимости анодной спектральной чувствительности фотоумножителя от напряжения питания**

5.1. Рассчитать среднее значение напряжения фотосигнала для каждого значения напряжения питания фотоумножителя в табл. 7 и записать результаты вычислений в таблицу.

5.2. Рассчитать относительное значение анодной спектральной чувствительности фотоумножителя для каждого значения напряжения питания в табл. 7

$$S_{\lambda.a.омн}(U_{a.k}) = \frac{U_{cp}(U_{a.k})}{U_{cp,max}}$$

и записать результаты вычислений в таблицу.

### **Содержание отчета**

1. Теоретическая часть (краткие сведения о принципе действия, основных конструктивных особенностях, параметрах и характеристиках фотоумножителей).

2. Схема лабораторной установки и ее описание.

3. Таблицы с результатами измерений и вычислений.

4. Расчет погрешности измерений (обработка одной строки из любой таблицы).

5. Графики:

1) относительного спектрального распределения потока излучения на выходной щели монохроматора;

2) относительной спектральной характеристики чувствительности эталонного ПОИ;

3) относительной спектральной характеристики анодной чувствительности исследуемого фотоумножителя;

4) относительной зависимости анодной спектральной чувствительности фотоумножителя от напряжения питания.

6. Выводы по работе.

### **Вопросы для подготовки**

1. Сущность внешнего фотоэффекта и типы электровакуумных фотоэлектронных приборов.

2. Принцип действия фотоумножителя.

3. Параметры и характеристики фотоумножителя.
4. Спектральная чувствительность, спектральная характеристика чувствительности и их виды.
5. Факторы, определяющие селективность фотоумножителей.
6. Методика измерения спектральных характеристик чувствительности ПОИ.
7. Методика расчета спектральных характеристик чувствительности.

### 3.1.2 Краткие теоретические сведения для решения задач [8].

Коэффициент использования излучения источника приёмником оптического излучения:

$$\kappa = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_{e,\lambda}(\lambda) S_{\text{отн}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{e,\lambda}(\lambda)$  - относительное спектральное распределение потока излучения источника;  $S_{\text{отн}}(\lambda)$  - относительная спектральная характеристика чувствительности ПОИ.

Связь интегральной чувствительности ПОИ к потоку излучения со спектральной:

$$S_{\text{инт}\Phi_e} = S_{\lambda,\Phi_{e,\text{max}}} \kappa, \quad (2)$$

где  $S_{\lambda,\Phi_{e,\text{max}}}$  - максимальная спектральная чувствительность ПОИ к потоку излучения.

Относительная спектральная чувствительность ПОИ [1,5,9]:

$$S_{\lambda\text{отн}} = \frac{S_{\lambda,\text{абс}}}{S_{\lambda,\text{max}}}, \quad (4)$$

где  $S_{\lambda,\text{абс}}$  - абсолютная спектральная чувствительность ПОИ;

$S_{\lambda,\text{max}}$  - относительная спектральная чувствительность ПОИ.

Порог чувствительности ПОИ в заданной полосе частот [1,5,9]:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{S_{\text{отн}}(\lambda)}{S_{I,\text{инт}}} = \frac{U_{\text{ш}}}{U_{U\text{инт}}}, \quad (5)$$

где  $I_{\text{ш}}$ ,  $U_{\text{ш}}$  - ток и напряжение шума;  $S_{I,\text{инт}}$ ,  $S_{U,\text{инт}}$  - токовая и вольтовая интегральные чувствительности ПОИ.

Удельный порог чувствительности ПОИ [1,5,9]:

$$\Phi_{\text{п}}^* = \Phi_{\text{п}} \sqrt{A \Delta f} = \Phi_{\text{п.1}} \sqrt{A}, \quad (6)$$

где  $\Phi_{\text{п.1}}$  - порог чувствительности ПОИ в единичной полосе частот;

$A$  - площадь ФЧЭ ПОИ;  $\Delta f$  - полоса частот усилительного тракта.

Рекомендуемая полоса частот измерительного тракта при паспортизации ПОИ [6]:

$$\Delta f = 0,2 f_M, \quad (7)$$

где  $f_M$  - частота модуляции излучения при паспортизации.

Удельная обнаружительная способность ПОИ [1,5,9]:

$$D^* = \frac{1}{\Phi_n^*}, \quad (8)$$

где  $\Phi_n^*$  - удельный порог чувствительности ПОИ.

Пересчёт спектральной чувствительности селективного ПОИ к световому потоку в спектральную чувствительность к потоку излучения:

$$S_{\lambda, \Phi_e} = S_{\lambda, \Phi_v} K_{max} V(\lambda), \quad (9)$$

где  $S_{\lambda, \Phi_e}$ ,  $S_{\lambda, \Phi_v}$  - спектральная чувствительность к потоку излучения и к световому потоку;  $K_{max}$  - максимальная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения (см. табл. 1);  $V(\lambda)$  - относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения (см. табл. 2).

Пересчёт параметров селективного ПОИ, заданных в световых ФМВ, в параметры в энергетических ФМВ [1,5,9]:

$$S_{инт. \Phi_e} = S_{инт. \Phi_v} K_{max} \kappa_r; \quad (10)$$

$$\Phi_{п.е} = \frac{\Phi_{п.в}}{K_{max} \kappa_r}, \quad Bm, \quad (11)$$

где  $S_{инт. \Phi_e}$ ,  $S_{инт. \Phi_v}$  - интегральная чувствительность ПОИ к световому потоку и потоку излучения;  $\kappa_r$  - коэффициент использования излучения источника глазом;  $\Phi_{п.е}$ ,  $\Phi_{п.в}$  - пороги чувствительности ПОИ в заданной полосе частот в энергетических и световых ФМВ.

Пересчёт параметров селективного ПОИ, заданных в энергетических ФМВ для излучения одного источника, в параметры в энергетических ФМВ для излучения другого источника [6]:

$$S_{инт. \Phi_e}'' = \frac{S_{инт. \Phi_e}' \kappa''}{\kappa'}; \quad (12)$$

$$\Phi_{п. \Phi_e}'' = \frac{\Phi_{п. \Phi_e}' \kappa'}{\kappa''}, \quad (13)$$

где  $S_{инт. \Phi_e}'$ ,  $S_{инт. \Phi_e}''$  - интегральные чувствительности ПОИ к потоку излучения для излучения первого и второго источников;  $\kappa'$ ,  $\kappa''$  - коэффициенты использования ПОИ излучения первого и второго источников;  $\Phi_{п. \Phi_e}'$ ,  $\Phi_{п. \Phi_e}''$  - пороги чувствительности ПОИ в заданной полосе частот в энергетических ФМВ для излучения первого и второго источников.

Ток дробового шума фотоумножителя [1,5,9]:

$$I_{ш.др} = \sqrt{2e_3 I_{\kappa} M^2 (1 + B) \Delta f}, \quad (14)$$

где  $B$  - множитель, учитывающий влияние дробового эффекта динодов (см. табл. 1);  $I_k$  - суммарный ток фотокатода;  $M$  - коэффициент усиления по току.

Суммарный ток шума фотоумножителя [1,5,9]:

$$I_{ш} = \sqrt{I_{ш,др}^2 + I_{ш,т}^2} . \quad (15)$$

Максимально допустимое сопротивление нагрузки по постоянному току фотоэлемента [1,5,9]:

$$R_{y.max} = \frac{U_p}{I_m + S_I \Phi_{max}} = \frac{U_p}{I_m + I_{\phi.max}} , \quad (16)$$

где:  $U_p$  - рабочее напряжение ПОИ;  $I_t$  - темновой ток ПОИ;  $S_I$  - токовая чувствительность;  $\Phi_{max}$  - максимальный поток, падающий на ПОИ;  $I_{\phi.max}$  - максимальный фототок.

Постоянная времени схемной релаксации ПОИ [1,5,9]:

$$\tau_p = R_{n.max} C , \quad (17)$$

где  $C$  - ёмкость ПОИ.

Связь между вольтовой и токовой чувствительностью ПОИ [1,5,9]:

$$S_U \approx S_I R_n , \quad (18)$$

где  $R_n$  - сопротивление нагрузки.

Фототок в ПОИ [1,5,9] :

$$I_{\phi} \approx S_I \Phi , \quad (19)$$

где  $S_I$  - токовая чувствительность ПОИ.

Напряжение фотосигнала ПОИ [1,5,9]:

$$U_c = S_U \Phi , \quad (20)$$

где  $S_U$  - вольтовая чувствительность ПОИ.

Коэффициент усиления фотоумножителя по току [1,5,9]:

$$M = \frac{S_{v.a}}{S_{v.k}} = \frac{I_t}{I_{t.k}} , \quad (21)$$

где  $S_{v.a}$  - световая анодная чувствительность;  $S_{v.k}$  - световая чувствительность фотокатода;  $I_t$  - темновой ток в цепи анода;  $I_{t.k}$  - темновой ток фотокатода.

Суммарный ток фотокатода ПОИ на внешнем фотоэффекте [1,5,9]:

$$I_k = I_{t.k} + I_{\phi} , \quad (22)$$

где  $I_{\phi}$  - фототок фотокатода.

### 3.1.2 Примеры решения задач

Задача: Фотоумножитель ФЭУ-28 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом паспортизовался по источнику типа "А" с температурой 2856 К.

Найти удельный порог чувствительности фотоумножителя для излучения ЧТ с температурой 2360 К в световых и энергетических ФМВ.

Дано:  $T_1 = 2856 \text{ К}$ ,  $T_2 = 2360 \text{ К}$ .

Определить:  $\Phi_{п.в}$ ,  $\Phi_{п.е}$

Решение:

1) По табл. ПЗ.2 приложения 3 найдем удельный порог чувствительности ФЭУ-28 для излучения ЧТ с температурой 2856 К  $\Phi'_{п.в} = 3,5 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$  и по

табл. ПЗ.1 приложения 3 для ФЭУ-28 определим  $\kappa' = 0,106$  и  $\kappa'' = 0,14$  для 2856 К и 2360 К соответственно.

2) По формуле (5) получим удельный порог чувствительности ФЭУ для излучения ЧТ с температурой 2360 К в световых ФМВ:

$$\Phi''_{п.Ф_e} = \frac{\Phi'_{п.Ф_v} \kappa'}{\kappa''} = \frac{3,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,106}{0,14} = 2,65 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\text{Гц}}}.$$

3) По формуле (6) удельный порог чувствительности ФЭУ для излучения ЧТ с температурой **2360 К** в энергетических ФМВ равен при условии, что по табл. 3 пределен:  $\kappa_r = 8,5 \cdot 10^{-3}$

$$\Phi_{п.е} = \frac{\Phi_{п.в}}{K_{max} \kappa_r} = \frac{2,65 \cdot 10^{-11}}{683 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3}} = 4,56 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}$$

Ответ: удельный порог чувствительности ФЭУ-28 для излучения ЧТ с температурой **2360 К** в световых и энергетических ФМВ соответственно рав-

ны:  $\Phi_{п.е} = 4,56 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}$  и  $\Phi''_{п.Ф_e} = 2,65 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ .

Задача: Пересчитать интегральную чувствительность фотоэлемента Ф-5 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом из световых ФМВ для излучения паспортного источника (ЧТ с температурой 2856 К) в световые ФМВ для излучения ЧТ с температурой 2360 К.

Дано:

$$T_1 = 2360\text{К}$$

$$T_2 = 2856\text{К}$$

Справочные данные: табл. ПЗ.1 приложения 3 для Ф-5 определим

$$K_{\max} = 683, K''_r = 8,5 \cdot 10^{-3}, K'_r = 2,43 \cdot 10^{-2}$$

$$S'_{\text{инт.фв}} = 8\text{мкА} \cdot \text{лм}^{-1}$$

Найти:  $S''_{\text{инт.фв}}$  – ?

Решение:

Из таблицы ПЗ.1 приложения 3 «Коэффициенты использования излучения ЧТ различными ПОИ» находим:

$$k' = 0,106 (\text{при } T = 2856 \text{ К})$$

$$k'' = 6,17 \cdot 10^{-2} (\text{при } T = 2360 \text{ К})$$

$$S''_{\text{инт.фв}} = \frac{S'_{\text{инт.фе}}}{k_{\max} \cdot k''_r}$$

$$S''_{\text{инт.фе}} = S'_{\text{инт.фе}} \frac{k''}{k'}$$

$$S'_{\text{инт.фе}} = S'_{\text{инт.фв}} \cdot k_{\max} \cdot k'_r$$

$$S''_{\text{инт.фв}} = \frac{S'_{\text{инт.фв}} \cdot k_{\max} \cdot k'_r \cdot \frac{k''}{k'}}{k_{\max} \cdot k''_r}$$

$$S''_{\text{инт.фв}} = \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 683 \cdot 2,43 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{6,17 \cdot 10^{-2}}{0,106}}{683 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3}} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ А/лм}$$

Ответ: Интегральная чувствительность фотоэлемента Ф-5

$$S''_{\text{инт.фв}} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ А/лм}$$

Задача: Определить пороговую чувствительность фотоумножителя ФЭУ-28 в реальных условиях при полосе частот усилительного тракта 1 Гц, сопротивлении нагрузки  $10^4$  Ом и температуре 300 К: 1) по темновому току; 2) при наличии фоновой засветки  $10^{-6}$  лм.

Дано:

$$\Delta f = 1 \text{ Гц}$$

$$R_H = 10^4 \text{ Ом}$$

$$T = 300 \text{ К}$$

Справочные данные:

По таблице П3.2 приложения 3 находим:

$$S_I^{\text{анод}} = 1 \text{ А/лм}$$

$$S_I^{\text{катод}} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ А/лм}$$

$$I_{\text{mm}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ А}$$

Найти:

1.  $\Phi_{\text{п}}, \Phi = 0$

2.  $\Phi_{\text{п}}$  при  $\Phi_{\text{ф}} = 10^{-6}$  лм

Решение:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{\sqrt{2 \cdot e \cdot I_k \cdot M^2 \cdot (1+B) \cdot \Delta f + 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R_H^{-1}}}{S_I^{\text{анод}}}$$

1.  $\Phi = 0 \rightarrow I_k = I_{\text{mk}}$

$$I_{\text{mk}} = \frac{I_{\text{mm}}}{M}$$

$$M = \frac{S_I^{\text{анод}}}{S_I^{\text{катод}}}$$

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{\sqrt{2 \cdot e \cdot \frac{I_{\text{mm}}}{M} \cdot \frac{S_I^{\text{анод}}}{S_I^{\text{катод}}} \cdot \left( \frac{S_I^{\text{анод}}}{S_I^{\text{катод}}} \right) \cdot (1+B) \cdot \Delta f + 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R_H^{-1}}}{S_I^{\text{анод}}}$$

$$\Phi_{II} = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-7}}{40 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{1}{40 \cdot 10^{-6}}\right)^2 \cdot 2,5 + 4 \cdot 1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}}{1} =$$

$$= 6,3 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}$$

2.  $\Phi_{\phi} = 10^{-6} \text{ ЛМ}$

$$I_k = I_{mm} + I_{\phi} + S_I^{\text{катод}} \cdot \Phi$$

$$\Phi_{II} = \frac{\sqrt{2 \cdot e \cdot (I_{mm} + S_I^{\text{катод}} \cdot \Phi) \cdot M^2 \cdot (1 + B) \cdot \Delta f + 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R_H^{-1}}}{S_I^{\text{анод}}} =$$

$$= \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (8 \cdot 10^{-12} + 40 \cdot 10^{-12}) \cdot \left(\frac{1}{40 \cdot 10^{-6}}\right)^2 \cdot 2,5 + 4 \cdot 1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}}{1} =$$

$$= 4,9 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}$$

Ответ:

1. Пороговая чувствительность фотоумножителя ФЭУ-28 по темновому току

$$\Phi = 4,9 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}$$

2. Пороговая чувствительность фотоумножителя ФЭУ-28 при наличии фоновой засветки

$$\Phi = 4,9 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}$$

Задача: Фотоумножитель ФЭУ-28 с кислородно-серебряно-цезиевым фотока-  
тодом паспортизовался по источнику типа "А" с температурой 2856 К. Найти  
удельный порог чувствительности фотоумножителя для излучения ЧТ с тем-  
пературой 2360 К в световых и энергетических ФМВ.

Дано:

$$T_1 = 2360 \text{ К}$$

$$T_2 = 2856 \text{ К}$$

Справочные данные:

По таблице ПЗ.2 приложения 3 находим:

$$\Phi'_{ny} = 3,5 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\text{Гц}}}, \quad k_{max} = 683, \quad k_r'' = 8,5 \cdot 10^{-3}, \quad k_r' = 2,43 \cdot 10^{-2}$$

$$S'_{шт.ф\ddot{y}} = 8 \text{ мкА} \cdot \text{ЛМ}^{-1}$$

$$d = 25 \text{ мм}$$

Найти:  $\Phi''_{nv} - ?$   $\Phi''_{ny} - ?$

Решение:

Из таблицы ПЗ.1 приложения 3 «Коэффициенты использования излучения  
ЧТ различными ПОИ»:

$$k' = 0,106 (npuT = 2856K)$$

$$k'' = 6,17 \cdot 10^{-2} (npuT = 2360K)$$

$$\Phi''_{nv} = \Phi''_{ne} \cdot k_r'' \cdot k_{max}, \quad \Phi'_{ne} = \frac{\Phi'_{nv}}{[k_{max} \cdot k_r]}$$

$$\Phi''_{ne} = \Phi'_{ne} \cdot \frac{k'}{k''}, \quad \Phi''_{ne} = \frac{\Phi''_{ne}}{\sqrt{A}} = \frac{\Phi''_{ne}}{\sqrt{\pi \cdot d^2 / 4}}$$

$$\Phi''_{nv} = \frac{\Phi'_{nv} \cdot \frac{k'}{k''} / [k_{max} \cdot k_r]}{\sqrt{A}} \cdot k_r'' \cdot k_{max}$$

$$\Phi''_{nv} = \frac{3,5 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{0,106}{6,17 \cdot 10^{-2}} / [683 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2}]}{\sqrt{3,14 \cdot 25^2 / 4}} \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 683 = 929 \cdot 10^{-12} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$$

Ответ: Порог чувствительности фотоумножителя ФЭУ-28

$$\Phi''_{nv} = 929 \cdot 10^{-12} \frac{\text{ЛМ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$$

### 3.1.3 Задачи

1. Пересчитать интегральную чувствительность фотоэлемента Ф-5 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом из световых ФМВ для излучения паспортного источника (ЧТ с температурой 2856 К) в световые ФМВ для излучения ЧТ с температурой 2360 К.

2. Фотоумножитель ФЭУ-28 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом паспортновался по источнику типа "А" с температурой 2856 К. Найти удельный порог чувствительности фотоумножителя для излучения ЧТ с температурой 2360 К в световых и энергетических ФМВ.

3. Фотоэлемент Ф-5 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом паспортновался по источнику типа "А" с температурой 2856 К при полосе пропускания усилительного тракта 160 Гц. Найти: 1) порог чувствительности фотоэлемента в заданной полосе частот для излучения паспортного источника в световых ФМВ; 2) интегральную чувствительность к потоку излучения ЧТ с температурой 2360 К.

Указание. Считать преобладающим дробовой шум.

4. Вычислить напряжение дробового шума ПОИ, если сила тока, протекающего в цепи, равна 1 мА, полоса частот - 100 Гц, а сопротивление составляет 0,5 МОм.

5. Определить максимальную вольтовую чувствительность и постоянную времени схемной релаксации для фотоэлемента Ф-5, у которого межэлектродная ёмкость равна 50 пФ, если на фотоэлемент падает максимальный световой поток 0,4 лм.

6. Определить порог чувствительности фотоумножителя ФЭУ-28 в реальных условиях при полосе частот усилительного тракта 1 Гц, сопротивлении нагрузки  $10^4$  Ом и температуре 300 К: 1) по темновому току; 2) при наличии фоновой засветки  $10^{-6}$  лм.

### 3.2 ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Электровакuumное устройство на основе внешнего фотоэффекта, преобразующее оптическое изображение, создаваемое на фотокатодe рентгеновскими, видимыми, УФ- или ИК-лучами, в промежуточное электронное, а затем в видимое изображение на флуоресцирующем экране, называют электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) (рис. 4.6, а).

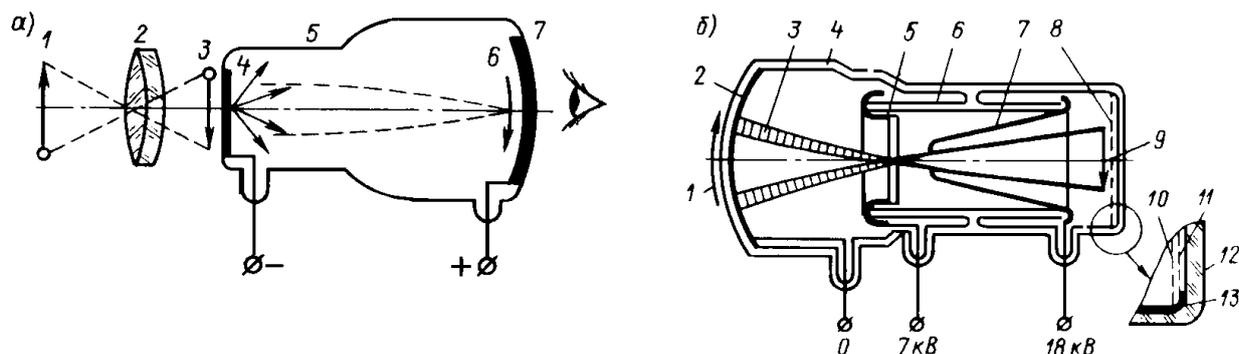


Рисунок 7 - а) Схематическое устройство ЭОП и б) ЭОП с трехэлектродной фокусирующей системой: 1 - изображение; 2 - фотокатод, 3 - электронный пучок; 4 - баллон из стекла; 5 - электрод; 6 - держатель; 7 — анод; 8 — экран; 9 — электронное изображение; 10 — люминесцирующий слой; 11 - алюминиевая фольга; 12 - стеклянная стенка; 13 — контактирующее покрытие

Конструктивно простейший ЭОП состоит из стеклянного баллона 5, из которого откачай воздух. На одну стенку баллона нанесен полупрозрачный фотокатод 4, на противоположную — флуоресцирующий экран 7. Между фотокатодом и экраном приложено постоянное напряжение 10–15 кВ. Объектив 2 строит на фотокатодe 4 невидимое (или видимое) изображение 3 рассматриваемого предмета 1. Под воздействием изображения возникает эмиссия фотоэлектронов, число которых в любой точке пропорционально имеющейся там освещенности. В момент выхода из фотокатода фотоэлектроны вылетают по различным направлениям. Ускоряющее электрическое поле стягивает фотоэлектроны в узкий пучок, ускоряет и направляет к экрану 7 в точку, лежащую против точки выхода. На экране 7 электронное изображение 6 преобразуется в видимое, благодаря его флуоресценции из-за бомбардировки фотоэлектронами. С экрана изображение может передаваться либо на сетчатку глаза (непосредственно или с помощью окуляра), либо на телевизионную трубку или любое другое устройство. Такой ЭОП дает линейное увеличение  $\Gamma_{\text{л}}=1^x$  (отношение линейного размера изображения на экране к линейному размеру на катодe), так как фокусировка электронных пучков осуществляется только за счет действия однородного плоского электростатического поля [4,11,14].

Разрешающая способность такого ЭОП до 40-50 пар линий/мм, так как электрическое поле собирает все вылетевшие из одной точки фотокатода фо-

то электроны не в точку на экране, а в некоторый кружок (кружок рассеяния) из-за различных направлений начальных скоростей электронов. Диаметр кружка рассеяния  $d_0$  определяет разрешающую способность ЭОП. Для повышения разрешающей способности ЭОП электронные пучки фокусируют электростатическим или магнитным полем.

Наибольшее распространение получили ЭОП с электростатической фокусировкой. На рис. 4.6, б приведена схема ЭОП с трехэлектродной электростатической фокусирующей системой со следующими параметрами: диаметр фотокатода 80 мм, длина 160 мм, напряжение 18 кВ, диаметр экрана 50 мм, разрешающая способность 30 пар линий/мм.

Изменяя потенциал третьего среднего электрода, можно изменять разрешающую способность ЭОП в различных кольцевых зонах экрана за счет перефокусировки электронных пучков при настройке.

Фотокатоды ЭОП аналогичны ФЭ и ФЭУ, и их спектральные характеристики приведены выше. В качестве флюоресцирующих экранов применяют различные мелкозернистые люминофоры — желто-зеленого свечения при работе с глазом, фиолетово-синего — для фотографирования или для дальнейшей передачи с помощью фотоэлектронных приборов. Наиболее часто используют экраны типа ФС-1, ФС-5, ЖЗ-2, К-67, К-40, К-72 со временем послесвечения  $10^{-6}$ – $10^{-2}$  с.

Пленочные мелкозернистые слои специальных люминофоров могут обеспечить разрешение в несколько сот линий на мм.

При оценке работы ЭОП кроме традиционных параметров и характеристик приемников на основе внешнего фотоэффекта ( $S_u$ ;  $S_\lambda$ ;  $\Phi_n$ ; и т. д.) и упомянутых ранее параметров фотокатодов и экранов (диаметр кружка рассеяния  $d_0$ ; разрешающая способность  $N_s$ ; электронно-оптическое увеличение  $\Gamma_s$ ) используют следующие специальные параметры, присущие только ЭОП.

1. Яркость темного фона - яркость свечения экрана  $L_\phi$  при отсутствии освещения фотокатода. Яркость темного фона ограничивает пороговая чувствительность, регистрируемый ЭОП. Причина возникновения  $L_\phi$  — термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии, токи утечки, токи положительных ионов, возникающие из-за наличия в ЭОП остатков газа. Для наблюдения слабо освещенных объектов необходимо уменьшить темновой ток (количество электронов, достигших экрана при отсутствии освещения фотокатода), что приводит к уменьшению  $L_\phi$ . Этого достигают охлаждением фотокатодов ЭОП до температур твердой углекислоты ( $-78^\circ\text{C}$ ), причем ток термоэлектронной эмиссии фотокатода уменьшается на семь-восемь порядков. Одновременно принимают меры для качественной откачки баллона, чтобы уменьшить ионный ток, и для снижения напряженности электрического поля вблизи фотокатода, чтобы уменьшить «холодную» эмиссию электронов.

2. Световая отдача экрана  $\eta$  — отношение светового потока, излучаемого экраном  $\Phi_{\text{экp}}$  в полусферу, к мощности облучающего экран электронного потока:

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{экp}}}{P_{\text{эл}}},$$

Имея в виду, что  $P_{\text{эл}} = VI_{\text{фк}} = VS_{\text{ифк}} \Phi_{\text{фк}}$ , получим

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{экp}}}{VS_{\text{ифк}} \Phi_{\text{фк}}},$$

где  $S_{\text{ифк}}$  — интегральная чувствительность фотокатода, А/лм.

3. Коэффициент преобразования ЭОП  $\eta_{\text{ф}}$  — отношение потока, излучаемого экраном во внешнюю полусферу  $\Phi_{\text{экp}}$ , к потоку излучения  $\Phi_{\text{фк}}$ , попавшему на фотокатод:

$$\eta_{\text{ф}} = \frac{\Phi_{\text{экp}}}{\Phi_{\text{фк}}} = \eta VS_{\text{ифк}}.$$

Например, коэффициент преобразования  $\eta_{\text{ф}}$  однокаскадного ЭОП с  $S_{\text{ифк}} = 30$  мкА/лм;  $V = 10$  кВ;  $\eta = 20$  лм/Вт

$$\eta = 30 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 20 = 6,$$

т. е. в таком ЭОП получается шестикратное усиление потока излучения за счет увеличения электрическим полем кинетической энергии электронов, формирующих изображение на экране.

4. Коэффициент яркости ЭОП  $\eta_L$  — отношение яркости экрана ЭОП к освещенности его фотокатода:

$$\eta_L = \frac{L_{\text{экp}}}{E_{\text{фк}}} = \xi' \pi S_{\text{ифк}} V,$$

где  $\xi'$  — световая отдача экрана, кд/Вт.

При наличии электронно-оптического увеличения  $\Gamma$ , формула примет вид:

$$\eta_L = \xi' \pi S_{\text{ифк}} \frac{V}{\Gamma^2},$$

Коэффициент яркости оценивает работу ЭОП при визуальном наблюдении, так как глаз реагирует на яркость изображения. Как видно из выражения, уменьшение  $\Gamma$ , дает выигрыш в яркости, но это не всегда допустимо из условий наблюдения уменьшенного изображения.

Например, коэффициент яркости ЭОП с  $\Gamma_3 = 1^x$ ;  $S_{\text{ифк}} = 250$   $\eta = 10^{-6}$  А/лм;  $V = 10$  кВ;  $\xi' = 15$  кд/Вт:

$$\eta_L = 15 \cdot 3,14 \cdot 250 \cdot 10^{-6} \cdot 10000 = 100$$

Если необходим больший коэффициент яркости, то надо усиливать электронные потоки, так как напряжение увеличивать выше 30 кВ нельзя из-за возможности электрического пробоя. Коэффициент яркости однокаскадных ЭОП колеблется от 10 до 50, для многокаскадных ЭОП с усилением электронных потоков —  $10^4$ – $10^5$ .

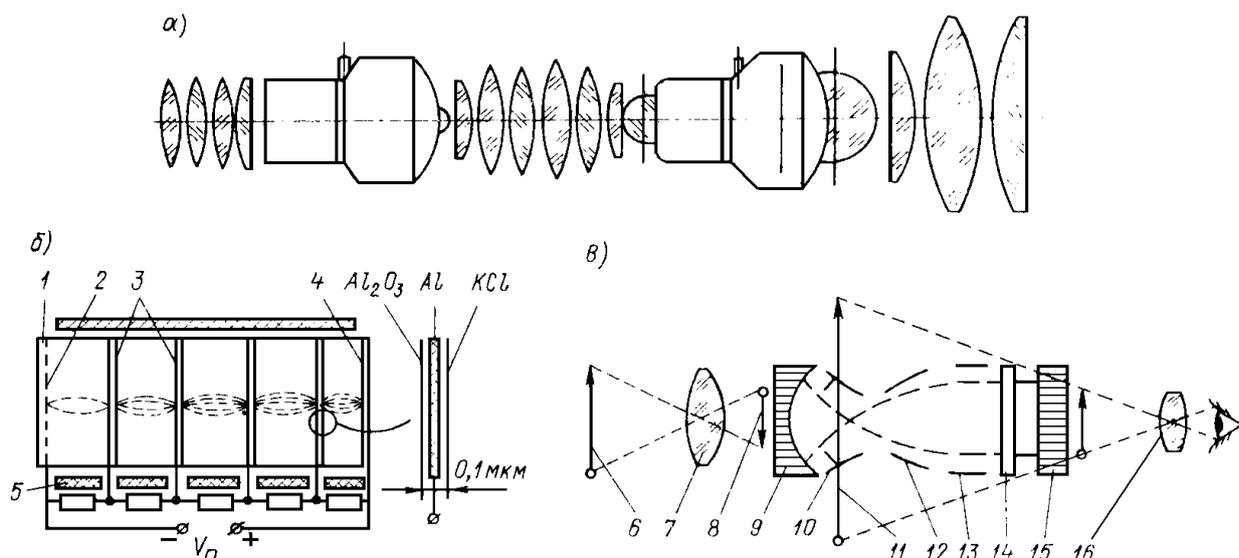


Рисунок 8 - Последовательное соединение ЭОП (а) и ЭОП со вторичной эмиссией электронов «на прострел» (б) и ЭОП с каналным электронным умножителем (в): 1 — входное окно; 2 — фотокатод, 3 — пленочные диоды, работающие «на прострел»; 4 — флюоресцирующий экран; 5 - фокусирующая катушка; 6 — объект; 7 — объектив; 8 — оптическое изображение; 9 — плосковогнутая стекловолоконная пластина с фотокатодом; 10 — фокусирующий электрод; 11 — оптическое изображение объекта; 12 — конический анод; 13 — корректирующий дисторсию электрод; 14 — микроканальный умножитель; 15 — стекловолоконная пластина с люминесцентным экраном; 16 — окуляр

5. Коэффициент усиления ЭОП по току  $K_i$  — отношение усиленного электронного тока к первоначальному.

Соединяя последовательно ЭОП, можно получить усиление яркости (рис. 4.7, а), однако используемые при этом промежуточные линзовые системы увеличивают потери света.

Более оптимальная конструкция для усиления яркости — соединение однокамерных ЭОП в одном вакуумном объеме. При этом люминесцирующий экран первого преобразователя и фотокатод второго нанесены на противоположные стороны тонкой (10–5 мкм) стеклянной или слюдяной пластинки. Подобную комбинацию экран — фотокатод называют каскадом усиления, а ЭОП — каскадным или многокамерным. При использовании многощелочных фотокатодов двухкаскадные (трехкамерные) ЭОП дают усиление яркости в  $10^5$  раз при  $\Gamma_s = 1^x$  и разрешающей способности в центре 35–40 пар линий/мм. Однако из-за искривления поверхности изображения в камерах разрешающая способность на краю падает до 4 пар линий/мм.

В последние годы для усиления яркости применяют многокамерные ЭОП с динодами, работающими на прострел (рис. 4.7, б). Электронное изображение, попадающее на первый динод, выбивает усиленный электронный поток вторичных электронов с его противоположной стороны и т.д.

Диноды выполняют из тонкой (десятые доли мкм) пленки, на которую с одной стороны нанесен алюминий (200–300 Å), с другой (500 Å) - хлористый калий или магний, дающие высокую вторичную эмиссию (рис. 4.7, б). Коэффициент усиления по току у таких ЭОП достигает  $10^4$ .

Однокамерные ЭОП часто сочленяют пластинами из стекловолокна (такие ЭОП называют модульными), а для усиления электронных потоков используют микроканальные пластинки с канальным электронным умножением (рис. 4.7, в). Коэффициент усиления таких ЭОП по току достигает  $10^5$ – $10^7$ , а разрешение определяется диаметром канала. На рис. 4.7, в приведена одна из конструкций ЭОП с канальными умножителями. Кроме электровакуумных преобразователей, в последнее время разрабатывают твердотельные усилители яркости изображения с меньшими габаритными размерами, требующие меньших напряжений питания. В них используют люминесцентные панели с нанесенным на них фотокатодом. Коэффициент усиления по яркости таких преобразователей достигает 800 при разрешающей способности 4–10 пар линий/мм и пороговой освещенности  $3 \div 10^{-2}$  лк.

Схема питания ЭОП обычно состоит из высоковольтного преобразующего блока и низковольтного источника питания. Постоянный ток аккумулятора поступает на преобразователь (дающий на выходе переменный ток), а с него на повышающий трансформатор, выпрямитель, стабилизатор, делитель напряжения и ограничитель тока. Ограничитель тока предохраняет преобразователь от пробоя при сильных засветках. Напряжение на выходе высоковольтного блока (и схема делителя напряжения) определяется типом ЭОП и колеблется от 3 до 45 кВ. Стабилизация напряжения должна осуществляться в пределах  $\pm(5 \div 10)$  %.

Потребляемый ток определяется током фотоэмиссии и колеблется от  $10^{-4}$  до  $10^{-5}$  А, потребляемая мощность —  $2 \div 5$  Вт.

ЭОП широко применяют в приборах визуального наблюдения при плохой видимости и в условиях естественной ночной освещенности порядка  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  лк, так как коэффициент яркости современных многокаскадных ЭОП достигает  $10^6$ – $10^8$ . Приборы с ЭОП широко используют в приборах наблюдения с подсветкой ИК-прожекторами и импульсными лазерами. ЭОП с плоской конструкцией применяют для регистрации быстропротекающих процессов в ядерной физике и в исследованиях искровых разрядов с временным разрешением до  $10^{-14}$  с при напряженности поля у фотокатода  $3 \cdot 10^5$  В/см.

Приборы с ЭОП используют для визуализации рентгеновского и нейтронного излучения. В астрономии ЭОП применяют для фотографирования спектров далеких звезд, а в оптической микроскопии — для наблюдения слабо светящихся объектов. Ниже в табл. 4.9 приведены параметры некоторых типов отечественных ЭОП [4,11,14].

**Таблица 4.9** Параметры некоторых отечественных ЭОП

Марка прибора	Размер фото-катода, мм×мм	Динамич. диапазон, Дж/см <sup>2</sup> (Вт/см <sup>2</sup> )	Разрешение		Коэфф. преобразования	Число камер	Система фокусировки	Прим.	
			временное	пространственное, штр/мм					
ПИМ-3Ш	6×12	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup>	40	10-50	1	Электростатическая	Режим импульсный, увеличение 2 <sup>x</sup> ± 0,1	
УМИ-92ШВ		10 <sup>-10</sup> -10 <sup>-8</sup>	5×10 <sup>-12</sup>	30	10 <sup>4</sup> -5×10 <sup>4</sup>	3			
УМИ-93ШВ		10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-9</sup>		25	2×10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	4			
УМИ-95Ш				10					
Пиксхрон-1	Ø3	10 <sup>-13</sup> -10 <sup>-11</sup>	5×10 <sup>-13</sup>	5	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	6	Электростатическая и магнитная	С СВЧ-разверткой; λ=3 см и v <sub>0</sub> =6×10 <sup>10</sup> см/с, режим импульсный	
ЭПИ-1И	2×30		-	60	-	1			
УМ-92ШВ	Ø40		(10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-5</sup> )	-	25	(1÷5)10 <sup>4</sup>			3
М-9В			-		30	5-30			1
М-9Ш	40×5			50					
МФ-1	Ø40	(10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-5</sup> )	-	40	10-80				

Примечание. Для фотокатода из Ag-O-Cs при Δλ=0,38÷1,2 мкм, S<sub>инт</sub>=30 мкА/лм; из CsSb при Δλ=0,25÷0,65 мкм S<sub>инт</sub>=50 мкА/лм; для многощелочного при Δλ=0,25÷0,65 мкм S<sub>инт</sub>=100 мкА/лм.

### 3.2.1 Лабораторная работа «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ»

#### Цели работы

- изучить принцип действия, основные параметры и характеристики электронно-оптического преобразователя (ЭОП);
- измерить предел разрешения, электронно-оптическое увеличение и пороговую облученность ЭОП;
- закрепить лекционный материал по курсу "Источники и приемники излучения", раздел "ЭОП".

#### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 9) состоит из коллиматора 1, содержащего конденсор 2, штриховую миру 3, расположенную в фокальной плоскости объектива 4, и полупроводниковые излучающие диоды (ПИД) подсветки миры: 5 — на просвет, 6 — на отражение. В приборе ночного видения 10 изображение штриховой миры 3 строится объективом 7 на фотокатоде ЭОП 8. Изображение миры на люминесцентном экране ЭОП рассматривается с помощью окуляра 9 [10].

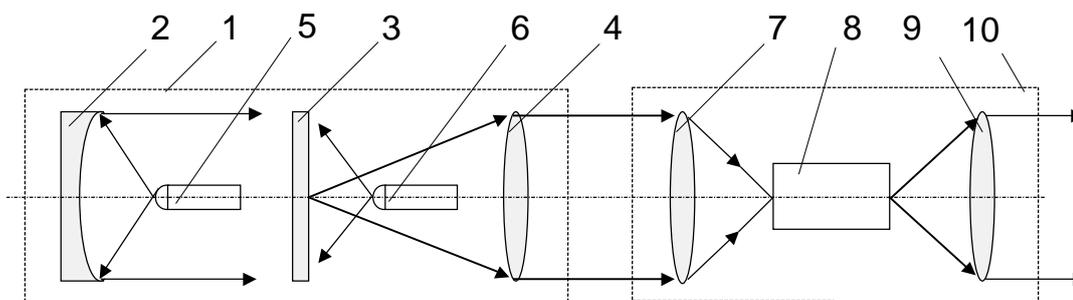


Рисунок 9 - Схема лабораторной установки

Электрическая схема питания ПИД и ЭОП (рис. 10) включает понижающий трансформатор 1, выпрямитель 2, подающий постоянное напряжение 27 В на блок питания ЭОП, который вырабатывает высокое постоянное напряжение 4 кВ. Блок питания ЭОП построен по схеме, приведенной на рис. 47. С трансформатора питание подается также через реостаты 4 и 5 и миллиамперметры 6 и 7 на ПИД подсветки. С помощью реостатов можно регулировать силу тока, протекающего через ПИД, а следовательно, и силу излучения ПИД.

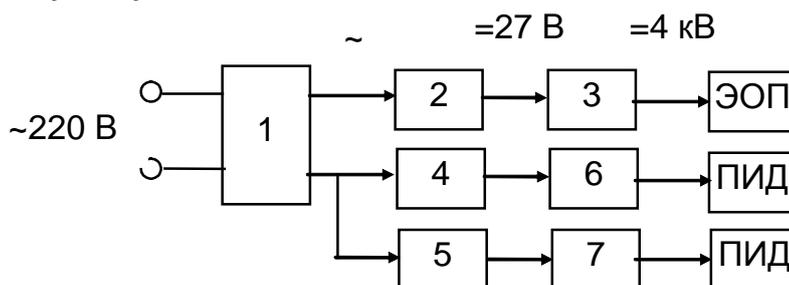


Рисунок 10 - Электрическая схема питания ПИД и ЭОП

### Порядок выполнения работы

*Подготовка к измерениям.* Подать питание на электрическую схему установки тумблером "СЕТЬ". Подать питание на блок питания ЭОП тумблером "ЭОП". Установить минимальную силу тока в ПИД, установив рукоятки реостатов "П1" и "П2" в крайнее левое положение. Подать питание на ПИД тумблером "СВЕТОДИОДЫ".

#### 1. Измерение предела разрешения ЭОП.

1.1. Установить оптимальную для наблюдателя яркость светлых полос миры, регулируя подсветку миры на просвет с помощью рукоятки "П1". Отфокусировать изображение миры, вращая окуляр.

1.2. Наблюдая изображение отдельных элементов миры (рис. 11), найти элемент миры с наибольшим порядковым номером, изображение штрихов которого во всех четырех направлениях различается на пределе.

3

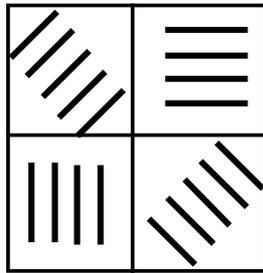


Рисунок 11 - Элемент штриховой миры

1.3 Вычислить предел разрешения по формуле

$$N_{np} = R f'_{об} / f'_k \quad \text{штрих/мм},$$

где  $f'_k$  — фокусное расстояние объектива коллиматора, мм;  $f'_k = 380$  мм;  $f'_{об}$  — фокусное расстояние объектива ЭОП;  $f'_{об} = 120$  мм;  $R$  — число штрихов на 1 мм в элементе миры, различаемых на пределе.

Число штрихов на 1 мм в  $n$ -ном элементе миры:

$$R_n = R_1 \cdot 0,094^{-(n-1)},$$

где  $R_1$  — число штрихов на 1 мм в 1-м элементе миры;  $R_1 = 10$  штрих/мм.

Погрешность величин  $f'_{об}$  и  $f'_k$  — 1 мм, а величины  $R$  — 0,005.

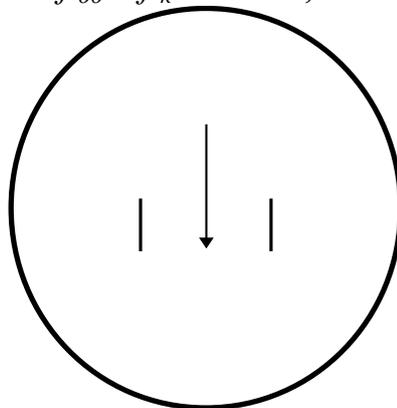


Рисунок 12 - Вид шкалы на экране

## 2. Измерение электронно-оптического увеличения.

2.1. Измерить размер изображения элемента миры на экране по вертикальным штрихам шкалы на экране, расстояние между которыми равно 12 мм (рис. 12).

2.2. Установить оптимальную для наблюдателя яркость изображения миры на экране ЭОП, регулируя подсветку миры на просвет с помощью рукоятки "П1". Подсветку миры на отражение при этом выключить с помощью рукоятки "П2".

2.3. Вычислить электронно-оптическое увеличение по формуле:

$$\Gamma_e = d_э / d,$$

где  $d_э$  — размер изображения элемента миры на экране, мм;  $d$  — размер изображения элемента миры на фотокатоде ЭОП, мм.

Размер изображения элемента миры на фотокатоде:

$$d = d_m f'_{об} / f'_k \quad \text{мм},$$

где  $d_m$  — размер элемента миры, мм;  $d_m = 10$  мм.

Погрешность величины  $d_m$  — 1 мм, а величины  $d_э$  — 0,2 мм.

## 3. Измерение пороговой облученности для излучения ПИД.

3.1. Включить ПИД подсветки на просвет с помощью рукоятки "П1". Выключить ПИД подсветки на отражение с помощью рукоятки "П2".

3.2. Плавно уменьшать яркость ПИД с помощью рукоятки "П1", достигая предела видимости его изображения. Значение силы тока занести в табл. 17. Измерения повторить 10 раз.

Таблица 17.

№ п/п	1	2	...	10
$I_{\text{пид}}, \text{ А}$				
$I_{\text{пид.ср}}, \text{ А}$				

3.3. Вычислить пороговую облученность по формуле:

$$E_{e.n} = \pi \tau L_{e.nud} \sin^2 \sigma_{A'}, \quad \text{Вт/м}^2,$$

где  $\tau$  — коэффициент пропускания объективов коллиматора и ЭОП;  $\tau = 0,7$ ;  $L_{e.nud}$  — энергетическая яркость ПИД, Вт/(м<sup>2</sup>· ср);  $L_{e.nud} = K_{nud} I_{nud}$ ;  $K_{nud}$  — коэффициент пропорциональности, Вт/(м<sup>2</sup>· ср· А);  $K_{пид} = 7 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>· ср· А);  $I_{nud}$  — сила тока, протекающего через ПИД, А;  $\sigma_{A'}$  — задний апертурный угол объектива ЭОП;  $\sigma_{A'} = 14^\circ$ . Погрешность величины  $\tau$  — 0,05, а величины  $\sigma_{A'}$  — 10'.

## Содержание отчета

1. Краткие теоретические сведения о принципе действия, основных параметрах и характеристиках ЭОП.
2. Схемы лабораторной установки и их описание.
3. Результаты измерений и вычислений.
4. Расчет погрешности измерений.
5. Выводы по работе.

### Вопросы для подготовки

1. Принцип действия ЭОП.
2. Основные параметры и характеристики ЭОП.
3. Измерение параметров ЭОП.
4. Схема питания ЭОП.

### 3.2.3 Пример решения задачи

Задача: Определить коэффициент яркости ЭОП ЭП-15, если световая отдача экрана  $\eta'_v = 15 \frac{\text{Кд}}{\text{Вт}}$ .

Дано: ЭОП ЭП-15,  $\eta'_v = 15 \frac{\text{Кд}}{\text{Вт}}$ .

Определить:  $\eta_L$ .

Решение:

По табл. 11 определяем параметры ЭОП ЭП-15:

$$\Gamma_3 = 1^x; S_{\text{инт.Фв}} = 180 \frac{\text{мА}}{\text{лм}} = 0,18 \frac{\text{А}}{\text{лм}}; U_p = 10 \text{ кВ} = 10^4 \text{ В}.$$

по формуле (4.45) определяем:

$$\eta_L = \frac{\eta'_v \cdot \pi \cdot S_{\text{инт.Фв}} \cdot U_p}{\Gamma_3^2} = 15 \cdot 3,14 \cdot 0,18 \cdot 10000 = 72000$$

Ответ: Коэффициент яркости ЭОП:  $\eta_L = 72000$ .

### 3.2.4 ЗАДАЧИ

1. Определить коэффициент преобразования потока излучения однокамерного ЭОП ПИМ-3Ш со световой отдачей экрана 20 лм/Вт, если ЭОП паспортизовался по ЧТ с температурой 2856 К.
2. Определить коэффициент усиления яркости ЭОП ЭП-15, имеющего световую отдачу экрана 15 кд/Вт, если ЭОП паспортизовался по ЧТ с температурой 2856 К.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев А.Н., Гаврилов ЕВ., Ишанин Г.Г. и др. Оптические измерения. Учебное пособие. – М.: Логос, 2008. – 416 с.
2. Бегункова А.Ф., Парфенов В.Г. Обработка результатов наблюдений при выполнении лабораторных работ физического практикума / Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1980 г.
3. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. – СПб.: Лань, 2011. – 528 с.  
[http://e.lanbook.com/books/pdf.php?book\\_id=690&p\\_id=25&bookid=580](http://e.lanbook.com/books/pdf.php?book_id=690&p_id=25&bookid=580)
4. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения / Учебное пособие для вузов – СПб: Папирус, 2003. – 527 с.
5. Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники оптического излучения - СПб: Политехника, 2009. - 415 с.
6. Ишанин Г.Г., Козлов М.Г., Томский К.А. Основы светотехники. / Учебное пособие для вузов – СПб: Береста, 2004. - 290 с.
7. Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники излучения. / Учебное пособие для вузов.- СПб: ГУ ИТМО, 2005. - 395 с.
8. Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Мусьяков В.Л. Источники и приёмники излучения. Пособие по решению задач. - СПб: ГУ ИТМО, 2006. - 86 с.
9. Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Рождественский А.В., Сычевский А.Т., Хребтова В.П. Источники и приёмники излучения. Часть 1- СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. - 58 с.
10. Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Мусьяков В.Л. Источники и приёмники излучения. Методические указания к лабораторным работам - СПб: СПбГУ ИТМО, 2001. - 122 с.
11. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Радайкин В.С. Источники и приёмники излучения. - М.: Машиностроение. 1982. - 220 с.
12. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. - Л.: Машиностроение, 1986. - 174 с.
13. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения. Учебник для вузов. - СПб: Политехника, 1991. - 240 с.
14. Ишанин Г.Г. Панков Э.Д., Радайкин В.С., Потёмин А.Э. Теория и расчет элементов приборов. / Учебник для техникумов – СПб: Политехника, 1993. - 224 с.
15. Мирошников М.М. Теория оптико-электронных приборов
16. Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д., Андреев Л.Н., Агальцова Н.А., Ишанин Г.Г., Василевский О.Н., Родионов С.А. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ОПТИКА. СПРАВОЧНИК. - М: ЛКИ, 2007. – 423 с.
17. Шарапов В.М., Полищук В.С, Ишанин Г.Г. и др. ДАТЧИКИ./ под общей ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищук – М: - Техносфера, 2012.- 624 с.
18. Шарапов В.М., Полищук В.С, Ишанин Г.Г. и др. ДАТЧИКИ. – Киев: - Брама-Украина, 2008.- 1070 с.

19. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. Справочник. Т. 1, 3. М.: ИП РадиоСофт, 2000.
20. Статистические методы обработки результатов теплофизического эксперимента / Учебное пособие. - Л.: ЛИТМО, 1981.
21. ГОСТ 21934-83 Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения
22. ГОСТ 19803-86. Преобразователи электронно-оптические. Термины, определения и буквенные обозначения.
23. ГОСТ 21815.0 - 21815.17. Преобразователи электронно-оптические. Методы измерения энергетических и оптических параметров.
24. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

**Краткое описание контрольно-измерительной аппаратуры**

**Монохроматор ДМР-4**

Назначение

Призмный двойной монохроматор ДМР-4 (рис.П1.1) применяется как источник монохроматического излучения высокой чистоты при измерениях светопропускания прозрачных веществ, снятии спектральных характеристик источников и приемников излучения, а также при других работах в области спектра от 0,22 до 2,5 мкм.

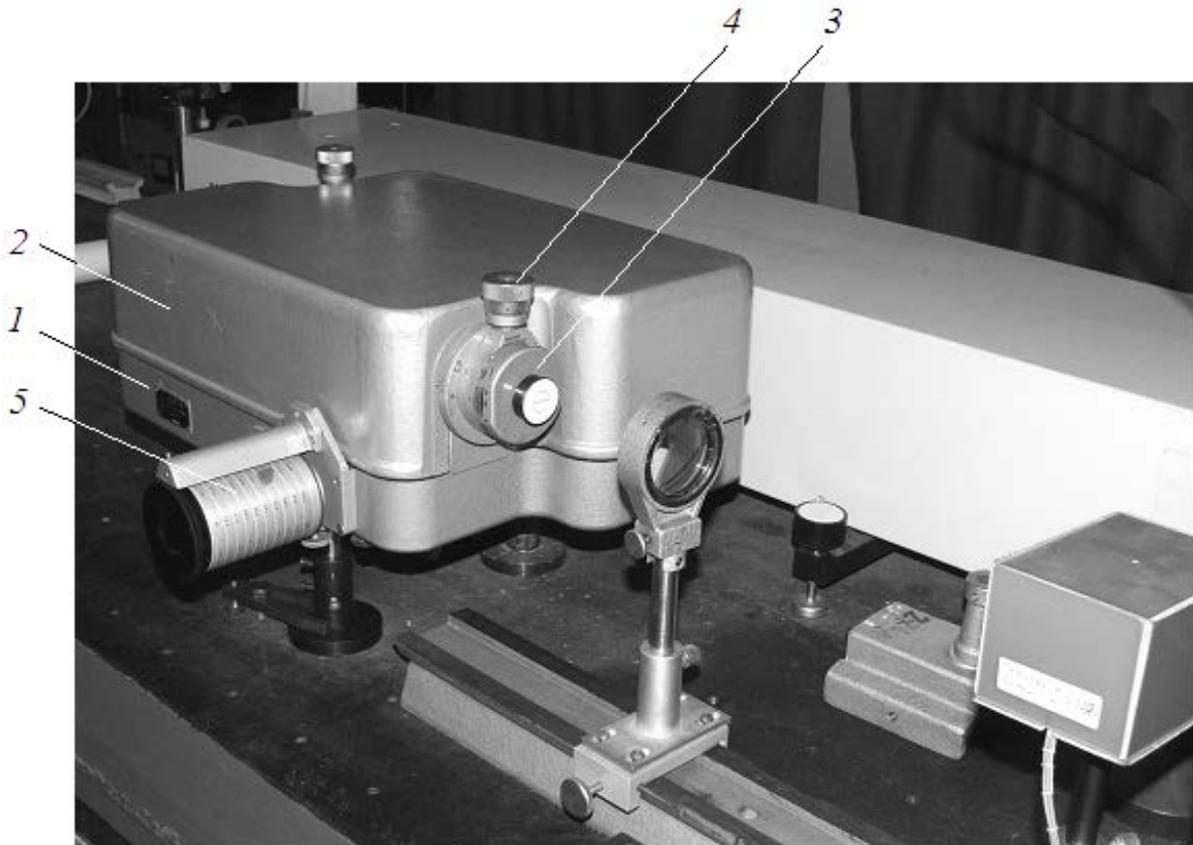


Рисунок П1.1 – Общий вид монохроматора ДМР-4

Все элементы монохроматора смонтированы на общем основании 1, закрытом крышкой 2. Раскрытие входной щели 3 регулируется поворотом микровинта 4. Барабан 5 служит для вращения диспергирующих призм монохроматора.

Технические данные

Рабочий диапазон прибора:

с кварцевыми призмами, нм - от 220 до 2500  
 со стеклянными призмами, нм - от 365 до 2400

- Относительное отверстие - 1 : 9,4
- Сферическое зеркало:

фокусное расстояние, мм - 343  
 световое отверстие, мм - 30×45

- Внеосевая парабола:  
фокусное расстояние, мм - 151  
световое отверстие, мм - 30×45  
внеосевой угол - 150°
  - Призма: преломляющий угол - 300 °
  - высота, мм - 30
  - Обратная линейная дисперсия прибора
  - с кварцевыми призмами, нм/мм
  - при  $\lambda = 220$  нм - 0,99
  - при  $\lambda = 340$  нм - 4,6
  - при  $\lambda = 2500$  нм - 49
  - Обратная линейная дисперсия прибора
  - со стеклянными призмами, нм/мм
  - при  $\lambda = 365$  нм - 1,6
  - при  $\lambda = 486,1$  нм - 5,1
  - при  $\lambda = 2400$  нм - 64,7
  - Щели:
  - высота, мм - 15
  - диапазон изменения ширины
  - входной и выходной щелей, мм - 0 ÷ 4
  - средней щели, мм 0 ÷ 2
- Фокусные расстояния конденсорных насадок, мм - 275 и 136

### Состав монохроматора

В состав прибора входят: монохроматор со сменными призмами на плато (кварцевые и стеклянные), конденсорные насадки, рельс, зеркала параболические в оправе, зеркала сферические в оправе, комплект ЗИП.

### Устройство и работа монохроматора

#### Оптико-кинематическая схема

Прибор построен по оригинальной оптической схеме, обеспечивающей высокую степень монохроматизации. Зеркальная оптика дает возможность применить в качестве диспергирующих элементов призмы из различных материалов: стекла, кварца. Это позволяет увеличить дисперсию в видимой области спектра и расширить диапазон работы прибора.

Входная и выходная щели расположены на противоположных сторонах прибора, это повышает эксплуатационные качества прибора при малых габаритных размерах.

Длина волны на выходной щели изменяется при одновременном повороте обеих призм. Оптико-кинематическая схема прибора показана на рис. П1.1. Свет через входную щель 4 падает на сферический зеркальный объектив 11, от которого параллельным пучком направляется на призму 3. Зеркальный внеосевой параболический объектив 12 собирает диспергированный пучок света на средней щели 6, расположенной в фокальной плос-

кости объектива и являющейся входной щелью второго монохроматора. Для совмещения зрачков первого и второго монохроматоров в схему перед средней щелью введена коллективная призма 7. Внеосевой параболический объектив 2 направляет монохроматический свет на призму 14, а сферический объектив 1 собирает его на выходной щели 13.

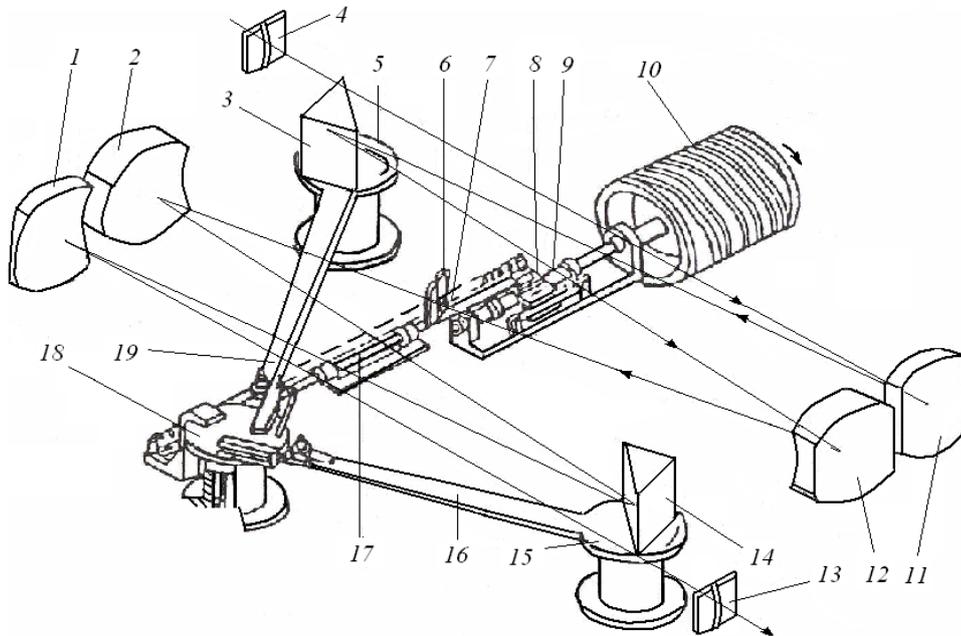


Рисунок П1.1. - Оптико-кинематическая схема монохроматора ДМР-4

Необходимую длину волны на выходной щели устанавливают вращением барабана 10. При этом гайка 8 перемещается по винту 9 и тянет за собой шток 17, который поворачивает распределительный столик 18. Через рычаги 16 и 19 распределительный столик передает вращение на оба призмных столика 5 и 15.

### Электроизмерительные приборы

Устройство и использование простейших электроизмерительных приборов (амперметры, вольтметры и т. п.) изучается в дисциплинах ... и здесь не рассматривается. Согласно ГОСТ электроизмерительные приборы по степени точности делятся на 8 классов (0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0), определяющих наибольшую приведенную погрешность  $\delta_{\max}$  для всего диапазона шкалы:

$$\delta_{\text{прив}} = \frac{(a_x - a) \cdot 100\%}{a_m} \leq \delta_{\max},$$

где  $a_x$  - показание прибора;  $a$  - истинное значение измеряемой величины;  $a_m$  - конечное значение диапазона измерений прибора. Класс точности указывается на шкале прибора. У цифровых вольтметров погрешность указывается в инструкции по эксплуатации.

**. Оформление отчета по лабораторной работе**

Результаты измерений в процессе выполнения лабораторной работы следует записывать в тетрадь для протоколов лабораторных работ. По окончании работы результаты измерений визирует преподаватель или лаборант.

Вычерчивание таблиц для протоколов лабораторных работ надо выполнять заранее (в электронном виде с распечаткой или по линейке), чтобы в лаборатории только производить измерения и записывать их в тетрадь. Каждый столбец таблицы должен иметь свое название, обозначение и единицы измеряемой величины ("Угол поворота  $\alpha$ , радиан").

Содержание отчета определяется указаниями к соответствующей работе. Отчет может быть оформлен в электронном виде, но для защиты отчета предьявляется его распечатка.

В описании лабораторной установки необходимо указать название, диапазон измерения, цену деления (младший разряд цифрового индикатора) и погрешности используемых приборов.

Таблицы с результатами всех прямых измерений в отчете (если он оформляется не в электронном виде) следует чертить по линейке. При статистической обработке результатов наблюдений для каждой рассчитываемой величины сначала записывается алгебраическая формула, затем та же формула с подставленными в нее числовыми значениями и результат вычислений.

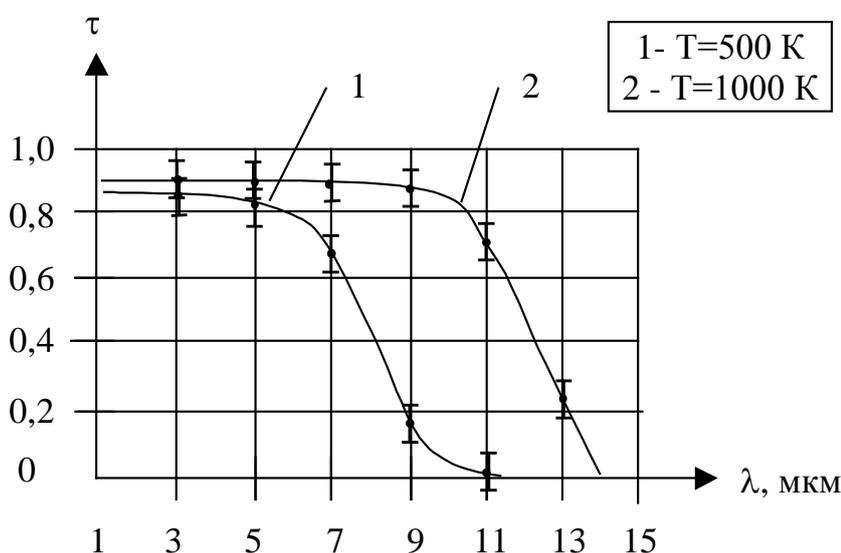


Рисунок П2 - Пример выполнения графика

При построении графиков следует помнить, что физические зависимости, как правило, не имеют разрывов, и поэтому графики их не должны быть ломаными линиями, соединяющими соседние экспериментальные точки. Перед построением графика необходимо выяснить теоретический характер зависимости (линейная, степенная, экспоненциальная и т.п.).

Графики (если отчет не оформлялся в электронном виде) выполняются на миллиметровой бумаге. Масштабы по осям координат выбираются так, чтобы кривые занимали все поле чертежа. За единицу масштаба целесообразно выбирать числа, кратные 5, 10, 50, 100 мм. На осях координат наносят метки, соответствующие цифровым значениям единиц измеряемых величин. Цифровые значения проставляются только для крупных единиц масштаба. Около оси координат необходимо написать обозначение величины, которая отложена на данной оси, и ее единицу. Экспериментальные точки, соответствующие результатам измерений, наносятся на чертеж в виде кружочков небольшого радиуса.

Если на графике имеется несколько кривых, то каждой кривой присваивается номер, а на свободном поле чертежа указывается обозначение, цифровое значение и единица параметра, соответствующего этому номеру.

Ниже приводятся два шаблона отчетов по лабораторным работам по исследованию характеристик и измерению параметров приемников излучения на внешнем фотоэффекте.

**Шаблон отчета по лабораторной работе**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики

Отчет  
по лабораторной работе  
«Исследование фотоумножителя»

.....

Выполнил студент:

гр. .... ФОИСТ

Преподаватель:

.....

Санкт-Петербург  
201\_

## Цели работы

- закрепить лекционный материал по курсу «Источники и приемники оптического излучения»;
- получить практические навыки по экспериментальному определению спектральной характеристики чувствительности и зависимости анодной чувствительности фотоумножителя от напряжения питания;
- ознакомиться с устройством и работой монохроматора и измерительного усилителя.

## Краткие теоретические сведения

Фотоумножитель - электровакуумный фотоэлектронный прибор, преобразующий энергию оптического излучения в электрическую и содержащий фотокатод, вторично-электронного умножителя (ВЭУ) и анода.

ВЭУ - электровакуумный прибор, в котором поток электронов умножается посредством вторичной электронной эмиссии. Это происходит на динодах - вторично-эмиссионных электродах, действие и расположение которых относительно других электродов таковы, что число вторичных электронов, эмиттированных с их поверхности, превышает число падающих на их поверхность первичных электронов.

Схематичное устройство фотоумножителя представлено на рис. 1.

В стеклянном корпусе К, из которого откачан воздух, располагаются электронно-оптическая система ЭОС, диафрагма Д, диноды Э<sub>1</sub>, Э<sub>2</sub>, Э<sub>3</sub> и анод А. На переднюю стенку корпуса нанесен фотокатод в виде тонкой пленки, работающий "на просвет" (рис. 1) или "на отражение". Между анодом и фотокатодом приложено напряжение питания 1...3,5 кВ. Падающий на фотокатод поток излучения Ф вызывает фотоэлектронную эмиссию. Выбитый из фотокатода фотоэлектрон e<sup>-</sup> с помощью ЭОС направляется через отверстие в диафрагме Д на первый динод Э<sub>1</sub>. На диноде происходит вторичная электронная эмиссия: первичный электрон выбивает из динода несколько вторичных.

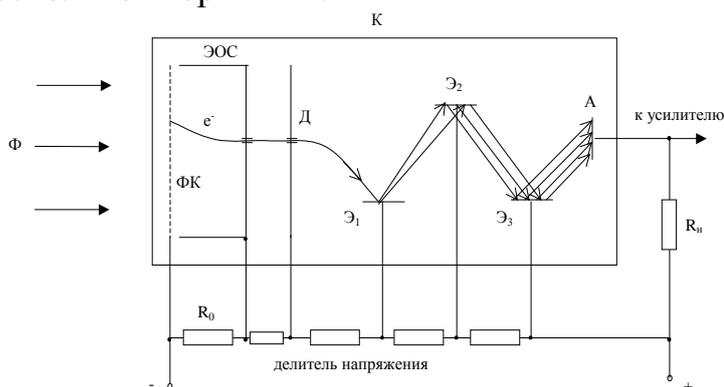


Рисунок 1 - Схема устройства фотоумножителя

Благодаря делителю напряжения, обеспечивающему повышение потенциала на каждом последующем диноде, вторичные электроны направляются последовательно на следующие диноды, причем их количество возрастает после каждого динода. Увеличение числа электронов оценивается коэффициентом вторично-электронной эмиссии:

$$\sigma = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_2$  - число вторичных электронов после динода;  $n_1$  - число первичных электронов на диноде. Поток электронов собирается на аноде А. На нагрузочном резисторе  $R_H$  возникает напряжение фотосигнала.

В качестве фотокатодов используются сложные соединения. Наиболее распространены серебряно-кислородно-цезиевые (Ag-O-Cs), сурьмяно-цезиевые (Sb-Cs) и многощелочные (Sb-Na-K-Cs) фотокатоды. Фотокатоды чувствительны в видимой и ближней инфракрасной областях.

В современных фотоумножителях от ВЭУ с отдельными динодами переходят к ВЭУ в виде микроканальной пластины (совокупности распределенных вторично-электронных умножителей, спаянных в единый блок), представляющей собой пластину из специального стекла с микроскопическими каналами, внутренние поверхности которых вследствие особой термообработки имеют высокий коэффициент вторично-электронной эмиссии. Поток фотоэлектронов направляется в каналы, а после усиления - на анод.

Кроме общих параметров и характеристик электровакуумных фотоэлектронных приборов (интегральной чувствительности фотокатода, спектральной характеристики чувствительности фотокатода и т.д.), фотоумножитель оценивается также специфическими параметрами и характеристиками.

Световая анодная чувствительность фотоумножителя  $S_{va}$  - отношение анодного фототока фотоумножителя к падающему на фотокатод световому потоку:

$$S_{va} = \frac{I_{\phi a}}{\Phi_v}$$

Анодная характеристика фотоумножителя  $I_{\phi a}(U_{a-nd})$  - зависимость анодного фототока фотоумножителя от напряжения питания между анодом и последним динодом (рис. 2).

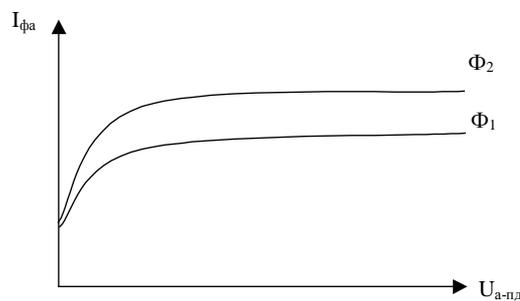


Рисунок 2 - Анодная характеристика фотоумножителя:  $\Phi_1 < \Phi_2$

Спектральная (мономатическая) чувствительность ПОИ  $S_\lambda$  - это чувствительность ПОИ к мономатическому излучению:

$$S_\lambda = \frac{dC}{d\Phi_\lambda}$$

где  $dC$  - электрический сигнал, вызываемый падающим на ПОИ монохроматическим потоком  $d\Phi_\lambda$  или монохроматической облученностью ПОИ  $dE_\lambda$ .

Спектральная характеристика чувствительности ПОИ  $S(\lambda)$  - это зависимость спектральной чувствительности ПОИ от длины волны излучения. Она может быть абсолютной и относительной.

Относительная спектральная характеристика чувствительности ПОИ на внешнем фотоэффекте - электровакуумного фотоэлектронного прибора - зависит от материала фотокатода и, в отличие от абсолютной, практически одинакова для различных экземпляров приборов одной марки. Электровакуумные фотоэлектронные приборы являются типичными селективными ПОИ (имеющими различную чувствительность к излучению различных длин волн). Селективность электровакуумных фотоэлектронных приборов объясняется селективностью процессов, происходящих в фотокатоде при внешнем фотоэффекте, а также селективностью оптического материала, из которого изготовлено входное окно (или колба) фотоумножителя.

### Схема лабораторной установки и её описание

Лабораторная установка (рис.3) включает в себя следующее оборудование: блок питания осветителя 1, осветитель 2 с лампой накаливания 3, объективом 4, двигателем 5 и модулирующим диском 6, монохроматор 7 (ДМР-4), эталонный ПОИ 8 (фотодиод ФД-24К), высоковольтный блок питания фотоумножителя 9, переходную оправку 10, исследуемый фотоумножитель 11, измерительный усилитель 12, цифровой вольтметр 13.

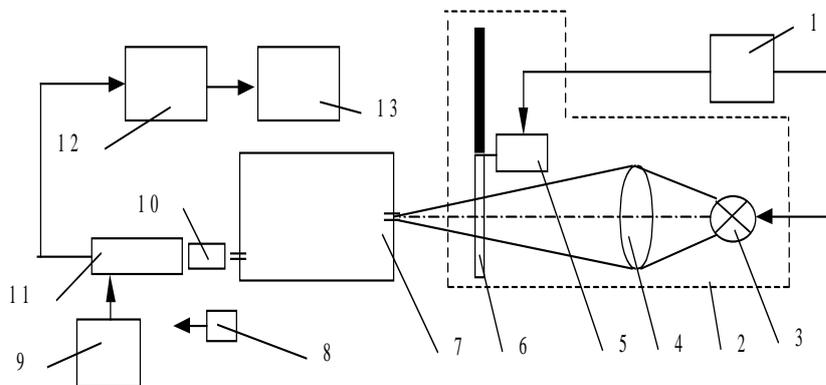


Рисунок 3 - Схема лабораторной установки

Нить лампы 3 при помощи объектива 4 проектируется на входную щель монохроматора 7. Излучение модулируется модулирующим диском 6, закрепленным на оси двигателя 5. Питание на лампу и двигатель модулятора поступает от блока питания 1. На выходную щель монохроматора устанавливается эталонный ПОИ 8 или через переходную оправку 10 исследуемый фотоумножитель 11, подключенный к высоковольтному блоку питания 9. ПОИ подключаются к измерительному усилителю 12, с выходом которого соединен цифровой вольтметр 13.

### Результаты измерений

- Измерение спектрального распределения потока излучения на выходной щели монохроматора (пример вычислений приведен в таблице 1)

Таблица 1

Длина волны $\lambda$ , нм	Деление монохр.	Сигнал усилителя, В		$S_{\lambda,отн.эт}$	$\frac{d\lambda}{d\ell}$ , $\frac{нм}{мм}$	$\frac{U_{эт.отн} dl}{S_{\lambda,отн.эт} d\lambda}$	$\varphi_{\lambda}$
		$U_{эт.сп}$	$U_{эт.отн}$				
500	557	3,95	0,06729	0,16	10	0,0420571	0,2073
550	575	19,46	0,33151	0,19	12	0,1454018	0,7167
600	587	41,8	0,71209	0,27	13	0,2028762	1
640	596	56,13	0,95621	0,37	14	0,1845981	0,90991
700	606	58,7	1	0,43	16	0,1453488	0,71644
740	612	57,47	0,97904	0,58	17	0,0992947	0,48944
800	620	56,44	0,96149	0,79	18	0,067616	0,33329
840	625	55,75	0,94974	0,9	19	0,0555406	0,27377
880	629	55,01	0,93713	0,9	19	0,0548034	0,27013
920	633	54,3	0,92504	0,7	20	0,0660745	0,32569
960	636	54,09	0,92146	0,57	20	0,0808303	0,39842
1000	640	54,8	0,93356	0,42	21	0,1058459	0,52173

Расчёт вёлся по следующим формулам:

$$U_{эт.отн.}(\lambda) = U_{эт.сп.}(\lambda) / U_{эт.сп.макс.}$$

$$\varphi_{\lambda}(\lambda) = [U_{эт.отн.}(\lambda) dl / S_{\lambda,отн.эт.}(\lambda) d\lambda] / [U_{эт.отн.}(\lambda) dl / S_{\lambda,отн.эт.}(\lambda) d\lambda]_{max}$$

Значения  $S_{\lambda,отн.эт}$  взяты из следующего графика, рис. 4.

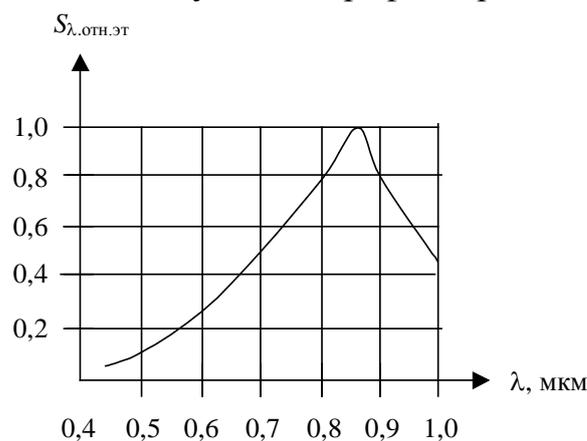


Рисунок 4 - График относительной спектральной характеристика ФД-24К

Значения  $\frac{d\lambda}{d\ell}$  взяты из следующего графика, рис. 5.

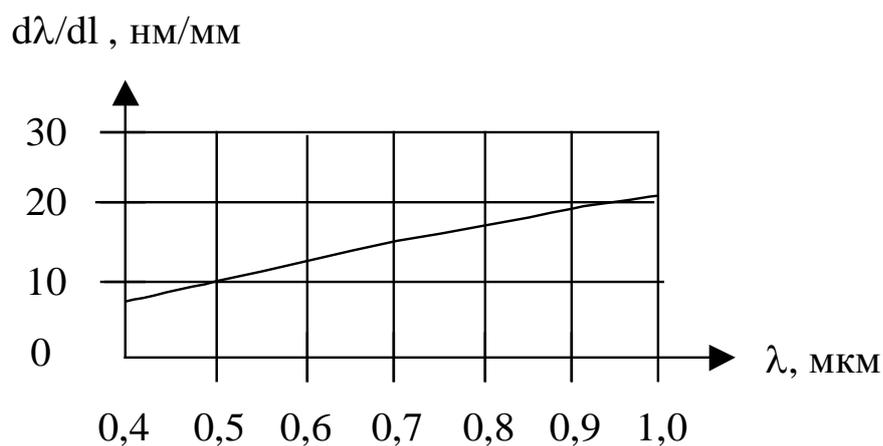


Рисунок 5 - График обратной линейной дисперсии ДМР-4

По полученным данным строится график относительного спектрального распределения потока излучения на выходной щели монохроматора  $\varphi_\lambda(\lambda)$



Рисунок 6 – График относительного спектрального распределения потока излучения на выходной щели монохроматора

**Определение спектральной характеристики анодной чувствительности фотоумножителя (таблица 2)**

Таблица 2

Длина волны $\lambda$ , мкм	Сигнал усилителя, В		$\frac{U_{отн}}{\varphi_\lambda}$	$S_{\lambda,отн}$
	$U_{cp}$	$U_{отн}$		
500	7,58	0,11168	0,53874	0,148
550	14,11	0,20789	0,29007503	0,080
600	24,2	0,35656	0,35656	0,098
640	34,36	0,50626	0,55638	0,153
700	57,03	0,84028	1,17285	0,322
740	60,25	0,88772	1,81377	0,499
800	61,68	0,90879	2,72676	0,750
840	64,92	0,95653	3,49398	0,961
880	66,64	0,98187	3,63480	1
920	67,74	0,99808	3,06453	0,8431
960	67,87	1	2,50990	0,6905
1000	66,68	0,98246	1,88316	0,51801

Расчёт вёлся по следующим формулам:

$$U_{отн}(\lambda) = U_{cp}(\lambda) / U_{cp,max}$$

$$S_\lambda(\lambda) = [U_{отн}(\lambda) / \varphi_\lambda(\lambda)] / [U_{отн}(\lambda) / \varphi_\lambda(\lambda)]_{max}$$

$\varphi_\lambda$  – взяты из графика относительного спектрального распределения потока излучения на выходной щели монохроматора.

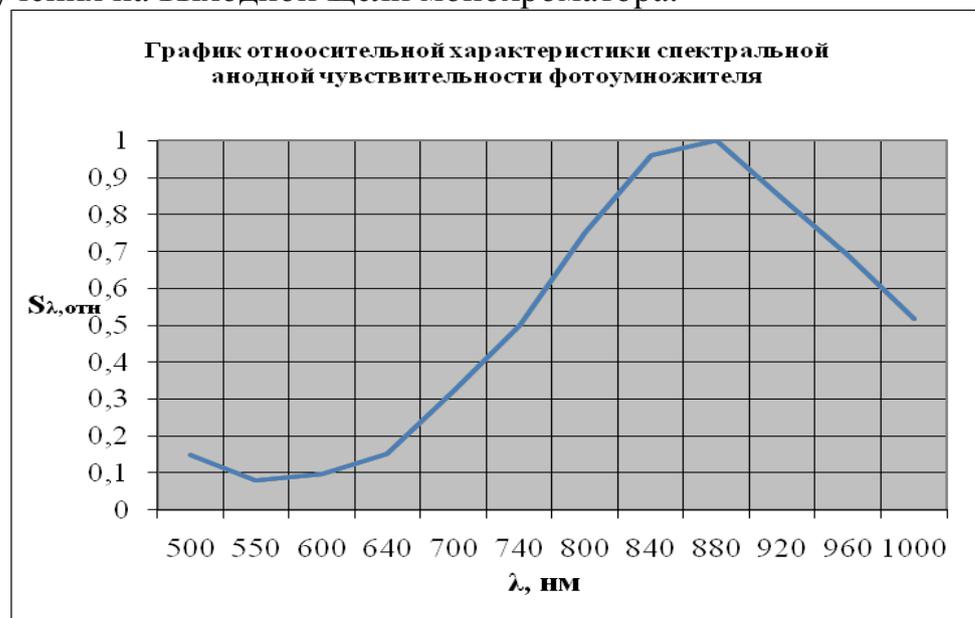


Рисунок 7 - График относительной характеристики спектральной анодной чувствительности фотоумножителя

Определение зависимости анодной спектральной чувствительности фотоумножителя от напряжения питания (пример вычислений приведен в таблице 3)

Таблица 3

Напряжение питания, кВ	Сигнал усилителя, В	$S_{\lambda, \text{отн.}}$
0,6	0,35	0,0032323
0,7	1,35	0,0145452
0,8	4,45	0,0547945
0,9	12,15	0,1683085
1	29,37	0,4520548
1,1	56,77	0,9611667
1,2	64,97	1,2

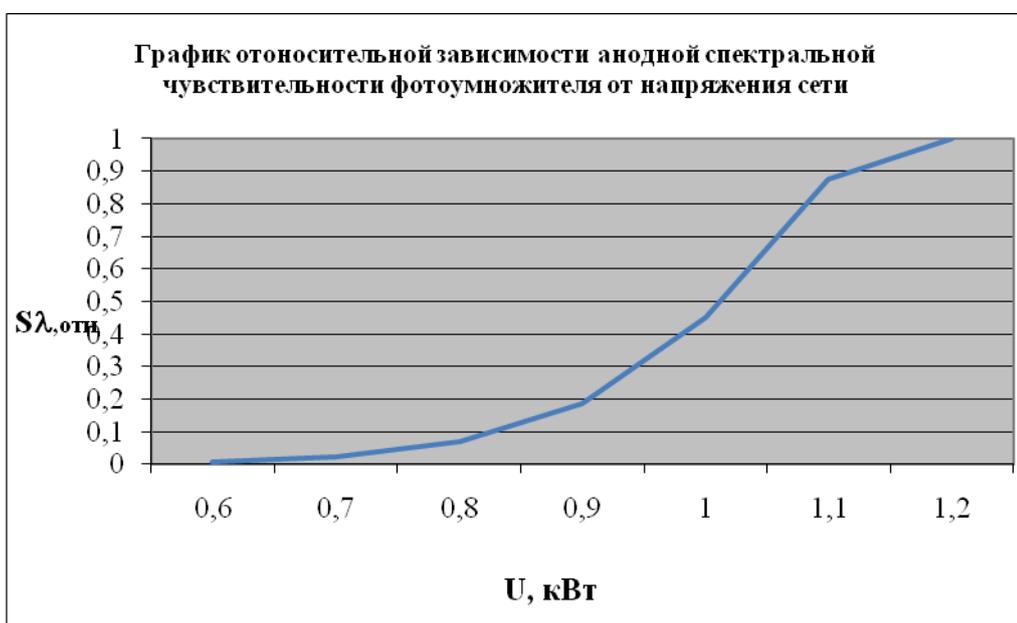


Рисунок 8.- График относительной зависимости анодной спектральной чувствительности фотоумножителя от напряжения сил

Расчёт вёлся по следующей формуле:

$$S_{\lambda, \text{отн.}}(U_{\text{а-к}}) = U_{\text{ср}}(U_{\text{а-к}}) / U_{\text{ср. max}}$$

### Выводы

Максимальное значение анодной спектральной чувствительности фотоумножителя наблюдается на длине волны  $\lambda = 890$  нм. Область спектральной характеристики лежит в интервале длин волн от ..... до ..... нм.

С увеличением напряжения питания значение относительной спектральной чувствительности растёт (указать характер роста: линейно, нелинейно, по экспоненте, гиперболе и т.д.) при изменении напряжения питания  $U_{\text{пит}}$  от 0,6 кВ до 1,1 кВ.

**Шаблон отчета по лабораторной работе**  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики

Отчет  
по лабораторной работе  
«Исследование электронно-оптического преобразователя»

.....

Выполнил студент:

гр. .... ФОИСТ

Преподаватель:

.....

Санкт-Петербург  
201\_

**Электронно-оптический преобразователь** — это фотоэлектронный электровакуумный прибор, предназначенный для преобразования спектрального состава излучения и (или) усиления яркости изображения.

Простейший, **однокамерный ЭОП** содержит фотокатод, систему формирования электронного изображения и люминесцентный экран. Он состоит из стеклянного (металлостеклянного, металлокерамического) корпуса 1, из которого откачан воздух (рис. 7).

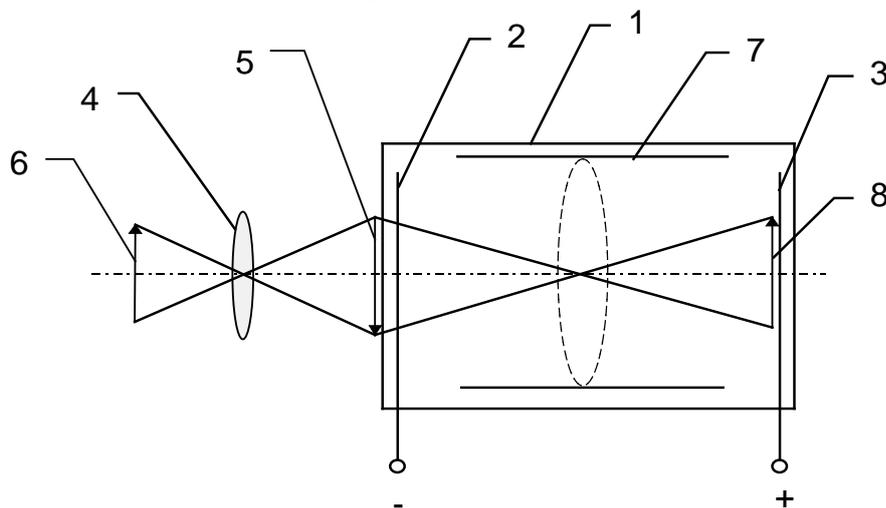


Рисунок 1 - Схема устройства ЭОП

На одну стенку баллона нанесен полупрозрачный фотокатод 2, на противоположную - люминесцентный экран 3. Между фотокатодом и экраном приложено постоянное напряжение 10...15 кВ. Объектив 4 строит на фотокатодe невидимое (или видимое) оптическое изображение 5 рассматриваемого объекта 6.

Под действием излучения возникает фотоэмиссия электронов с фотокатода (внешний фотоэффект). Число фотоэлектронов, испускаемое каждой точкой фотокатода, пропорционально облученности этой точки.

Фотокатоды ЭОП аналогичны фотокатодам фотоэлементов и фотомножителей. С помощью системы формирования электронного изображения (фокусирующей системы ЭОП) 7 на люминесцентном экране строится электронное изображение 8. Наиболее распространены ЭОП с электростатической фокусировкой.

Благодаря люминесценции экрана из-за бомбардировки его фотоэлектронами электронное изображение 8 преобразуется в видимое (или увеличивается яркость изображения по сравнению с яркостью видимого объекта). Изображение на экране может рассматриваться глазом (непосредственно или через окуляр) либо передаваться на телевизионную передающую трубку.

Для люминесцентных экранов используют мелкозернистые люминофоры: желто-зеленого свечения — для работы с глазом, фиолетово-синего — для фотографирования или работы с ПОИ. Наиболее распро-

используются люминофоры типа ФС-1, ФС-5, ЖЗ-2, К-67, К-40, К-72. В ЭОП используются различные системы формирования электронного изображения: плоская электростатическая система прямого переноса изображения, электростатическая фокусирующая система с оборачиванием изображения, электромагнитная фокусирующая система. В их состав входят электроды различного назначения: подфокусирующий, корректирующий, масштабирующий и др.

Для большего усиления яркости изображения на экране по сравнению с яркостью объекта используются **многокамерные ЭОП**, состоящие из последовательно соединенных в едином вакуумном объеме нескольких однокамерных ЭОП. При этом люминесцентный экран предыдущего ЭОП и фотокатод последующего наносятся на противоположные стороны стеклянной пластинки толщиной 5...10 мкм. Для лучшего переноса видимого изображения с экрана предыдущего однокамерного ЭОП на фотокатод последующего экран и фотокатод могут наноситься на волоконно-оптические пластины, соединяющиеся между собой посредством оптического контакта. Однокамерный ЭОП с волоконно-оптическими пластинами на входе и выходе называется **модульным**, а ЭОП, состоящий из последовательно соединенных модульных ЭОП, — **многомодульным**.

Усиления яркости можно достичь усилением электронных потоков в ЭОП. Для этого применяются однокамерные ЭОП с **микрочанальной пластиной**, аналогичной используемым в ВЭУ фотоумножителей, или однокамерные ЭОП с усилением за счет использования вторичной эмиссии тонкопленочных динодов, работающих на "прострел".

Современные ЭОП могут иметь регулируемое увеличение изображения с помощью масштабирующего электрода, импульсное управление электронным изображением с помощью электронно-оптического затвора, возможность сохранения неподвижности изображения движущегося объекта с помощью компенсирующих пластин, возможность перемещения изображения по люминесцентному экрану с помощью отклоняющих пластин.

Схема питания ЭОП обычно состоит из высоковольтного блока и низковольтного источника питания (рис. 2). Постоянный ток аккумулятора 1 поступает на преобразователь 2 (дающий переменный ток), а с него — на повышающий трансформатор 3, выпрямитель 4, стабилизатор 5, делитель напряжения 6 и ограничитель тока 7. Ограничитель тока предохраняет преобразователь от пробоя при сильных засветках. Напряжение на выходе блока составляет 3...4,5 кВ при силе тока  $10^{-5}$ ... $10^{-4}$  А. Потребляемая мощность равна 2...5 Вт.

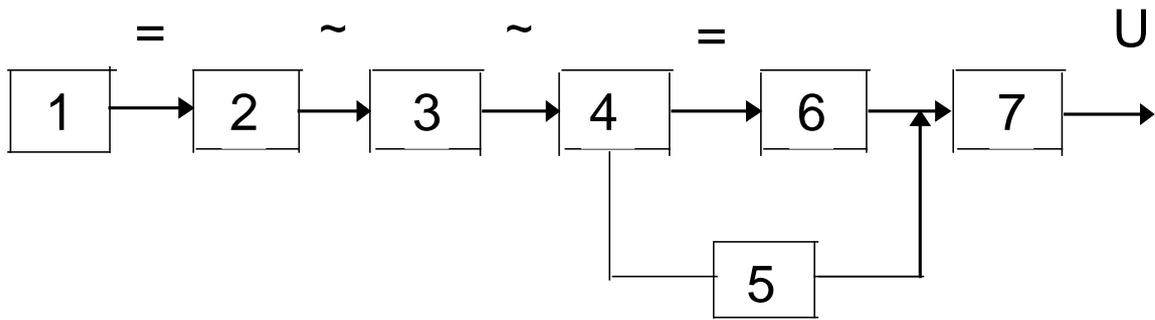


Рисунок 2 - Схема питания ЭОП

При оценке работы ЭОП кроме традиционных параметров и характеристик приемников на основе использования внешнего фотоэффекта ( $S_{\text{в}}$ ,  $S_{\text{л}}$ ,  $\Phi_{\text{п}}$  и т. д.) и упомянутых ранее параметров фотокатодов и экранов (диаметра кружка рассеяния  $d_0$ ; разрешающей способности  $N_3$ ; электронно-оптического увеличения  $\Gamma_э$ ) используются следующие специальные параметры, присущие только ЭОП.

Электронно-оптическое увеличение  $\Gamma_э$  — это отношение размера изображения объекта на выходной поверхности (люминесцентном экране или внешней поверхности волоконно-оптической пластины) к размеру изображения объекта на входной поверхности (внутренней поверхности фотокатода; на стекле; внешней поверхности волоконно-оптической пластины, на внутреннюю поверхность которой нанесен фотокатод). Электронно-оптическое увеличение лежит в пределах  $0,5^x \dots 2^x$ . Электронно-оптическое увеличение, меньшее  $1^x$ , дает выигрыш в яркости, но ухудшаются условия распознавания объекта.

Предел разрешения  $N_{\text{пр}}$  — наибольшее число штрихов в одном миллиметре изображения штриховой миры на входе ЭОП, которые на выходе различаются по четырем направлениям, при оптимальных для глаза условиях наблюдения. Штриховая мира — это пластинка с нанесенным на ней рисунком, состоящим из расположенных по определенной системе светлых штрихов на темном фоне.

Рабочее разрешение  $N_p$  — предел разрешения при заданных освещенности и контрасте штриховой миры. Предел разрешения связан с качеством системы формирования электронного изображения, а также с зернистостью люминофора. Предел разрешения максимален в центре выходной поверхности и минимален на краю. У современных ЭОП он составляет  $12 \dots 60$  штрих/мм в центре и  $3 \dots 6$  штрих/мм на краю.

Эквивалентная темновая (пороговая) освещенность ЭОП  $E_{0э}$  — освещенность на входе ЭОП, эквивалентная яркости темного фона:

$$E_{0э} = \frac{\pi L_0}{n_L}, \text{ лк.}$$

## Описание лабораторной установки:

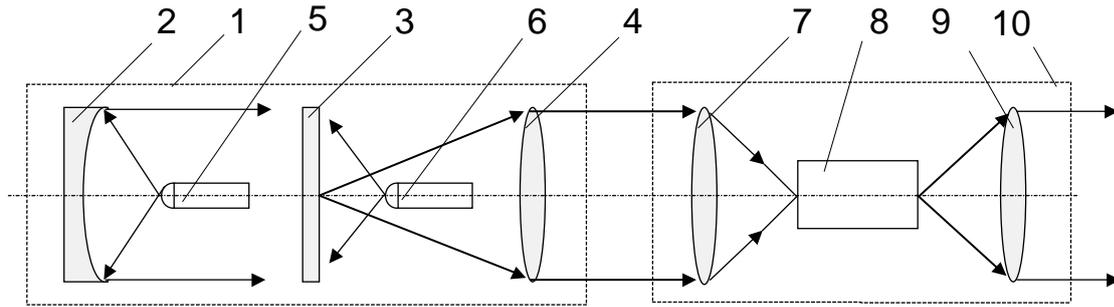


Рисунок 3. - Схема лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят

- 1 - коллиматор,
- 2 – конденсор,
- 3 - штрихова мира, расположенную в фокальной плоскости объектива,
- 4 – объектив,  
(ПИД) подсветки мира:
- 5 — ИК-полупроводниковый излучающий диод, работающий на просвет мира, 6 — ИК-полупроводниковый излучающий диод, работающий на отражение от мира,
- 7 – второй объектив,
- 8 – ЭОП,
- 9 – окуляр
- 10 - глаз.

## Результаты измерений и вычислений:

### 1) Измерение предела разрешения ЭОП.

(Например)  $n=17$

$$N_{\text{пр}} = R f'_{\text{об}} / f'_{\text{к}}, \text{ штрих/мм}$$

$$R_n = R_1 \cdot 0,94^{-(n-1)}$$

$$f'_{\text{к}} = 380 \text{ мм}; f'_{\text{об}} = 120 \text{ мм}; R_1 = 10 \text{ штрих/мм.}$$

$$R_n = R_1 \cdot 0,94^{-(n-1)} = \dots \text{ штрих/мм}$$

$$N_{\text{пр}} = R f'_{\text{об}} / f'_{\text{к}} = 25,297 \cdot 120 / 380 = 7,988 \text{ штрих/мм}$$

### 2) Измерение электронно-оптического увеличения

Например,

Расстояние между штрихами на поверхности мира – 12 мм

Количество элементов мира, размещающихся в этом расстоянии – (например) 1,2, тогда  $d_3 = 10$  мм;

$$d_{\text{м}} = 10 \text{ мм}$$

$$\Gamma_3 = d_3 / d$$

$$d = d_{\text{м}} f'_{\text{об}} / f'_{\text{к}} = (10 \cdot 120) / 380 = 3,158 \text{ мм}$$

$$\Gamma_3 = d_3 / d = 10 / 3,158 = 3,17^x$$

### 3) Измерение пороговой облученности для излучения ПИД:

Таблица 17.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{\text{пид}}, A \cdot 10^{-6}$	11	10	10	9	10	10,5	9	11	10	10
$I_{\text{пид.ср}}, A$	10,05									

$$E_{e.п} = \pi \tau L_{e.пид} \sin^2 \sigma_A', \text{ Вт/м}^2,$$

$$\tau = 0,7$$

$$L_{e.пид} \text{ — Вт/(м}^2 \cdot \text{ср)}; L_{e.пид} = K_{\text{пид}} I_{\text{пид}}$$

$$K_{\text{пид}} = 7 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{А)}$$

$\sigma_A'$  — задний апертурный угол объектива ЭОП;  $\sigma_A' = 14^\circ$ .

$$E_{e.п} = \pi \tau L_{e.пид} \sin^2 \sigma_A' = 3,14 * 0,7 * 7 * 10^4 * 10,05 * 10^{-6} * \sin^2 14^\circ = 0,0905 \text{ Вт/м}^2$$

#### Расчет погрешностей измерений:

$$\Delta N_{\text{пр}} = (\Delta f_{\text{об}}/f)^2 + (\Delta f_{\text{к}}/f)^2 + (\Delta R/R)^2)^{1/2}$$

$$\Delta N_{\text{пр}} = ((1/120)^2 + (1/380)^2 + (0,005/10)^2)^{1/2} = 0,00875329 = 0,009 \text{ штрих/мм}$$

$$\Delta \Gamma_3 = ((\Delta d_3/d_3)^2 + (\Delta d/d)^2)^{1/2}$$

$$\Delta d = (\Delta d_m^2 + \Delta f_k^2 + \Delta f_{\text{об}}^2)^{1/2}$$

$$\Delta d = (1^2 + 1^2 + 1^2)^{1/2} = 1,732$$

$$\Delta \Gamma_3 = ((0,2/9)^2 + (1,732/10)^2)^{1/2} = 0,17462025 = 0,175^x$$

$$\Delta E_{e.п.} = ((\Delta \tau/\tau)^2 + (\Delta I/I)^2 + (\Delta \sigma_A'/\sigma_A')^2)^{1/2}$$

$$\Delta I_{\text{пид}} = (\sum (I_i - I_{\text{ср}})^2 / N(N-1))^{1/2}$$

$$\Delta I_{\text{пид}} = (6,992/90)^{1/2} = 0,27872727 = 0,278$$

$$\Delta E_{e.п.} = ((0,05/0,7)^2 + (0,278/10,1)^2 + (10' / 14^\circ)^2)^{1/2} = ((0,05/0,7)^2 + (0,278/10,1)^2 + (0,0029074 / 0,2442)^2)^{1/2} = 0,00774687 = 0,008 \text{ Вт/м}^2$$

#### Выводы:

В результате лабораторной работы были вычислены следующие величины и их погрешности:

1) Предел разрешения - наибольшее число штрихов в одном миллиметре изображения штриховой миры на входе ЭОП, которые на выходе различаются по четырем направлениям, при оптимальных для глаза условиях наблюдения:  $N_{\text{пр}} = (7,988 \pm 0,009)$  штрих/мм,

2) Электронно-оптическое увеличение - отношение размера изображения элемента миры на люминесцентном экране к размеру изображения этого же элемента на фотокатод:  $\Gamma_3 = (3,17^x \pm 0,18)^x$ ,

3) Пороговая облученность ЭОП - минимальная освещенность фотокатода, которая позволяет получить изображение миры на экране на пределе видимости:  $E_{e.п.} = (0,091 \pm 0,008) \text{ Вт/м}^2$ .

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

**Таблица ПЗ.1 КОЭФФИЦИЕНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЧТ ПРИЕМНИКАМИ НА ВНЕШНЕМ ФОТОЭФФЕКТЕ,  
ИМЕЮЩИМИ СПЕКТРАЛЬНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ С!**

Температура ЧТ, К	Фотоэлемент Ф-5, Фотоумножитель ФЭУ-28
800	$1,42 \cdot 10^{-5}$
1000	$2,13 \cdot 10^{-4}$
1200	$1,25 \cdot 10^{-3}$
1500	$6,77 \cdot 10^{-3}$
1700	$1,45 \cdot 10^{-2}$
2000	$3,25 \cdot 10^{-2}$
2200	$4,80 \cdot 10^{-2}$
2360	$6,17 \cdot 10^{-2}$
2500	$7,43 \cdot 10^{-2}$
2700	$9,27 \cdot 10^{-2}$
2850	0,106
3000	0,120
3200	0,137
3600	0,169
4000	0,196
4200	0,209
4500	0,226
4800	0,242
5000	0,252
5200	0,261
5500	0,274
5850	0,287
6000	0,292

**Таблица ПЗ.2 ПАРАМЕТРЫ ПОИ**

Марка ПОИ	Диаметр ФЧЭ, мм	Интегральная (спектральная) чувствительность	Порог чувствительности (пороговая освещенность)	Удельная обнаружительная способность	Темновой ток, А	Рабочее напряжение, В
Фотоэлемент Ф-5	25	8 мкА/лм	-	-	$5 \cdot 10^{-11}$	100
Фотоумножитель ФЭУ-28	25	1 А/лм (анодная) 40 мкА/лм (фотокато-да)	$3,5 \cdot 10^{-11}$ лм/Гц <sup>1/2</sup>	-	$2 \cdot 10^{-7}$	-
ЭОП ПИМ-3Ш	-	50 мА/Вт	-	-	-	30000
ЭОП ЭП-15 (электронно-оптическое увеличение - 1 <sup>х</sup> )	-	180 мА/Вт	-	-	-	10000

**Таблица ПЗ.3. КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЧТ ГЛАЗОМ**

Температура ЧТ, К	Коэффициент использования излучения ЧТ глазом $k_2$	Температура ЧТ, К	Коэффициент использования излучения ЧТ глазом $k_2$
1200	$6,10 \cdot 10^{-6}$	3500	$5,57 \cdot 10^{-2}$
1300	$2,00 \cdot 10^{-5}$	3750	$6,82 \cdot 10^{-2}$
1400	$5,60 \cdot 10^{-5}$	4000	$8,10 \cdot 10^{-2}$
1500	$1,42 \cdot 10^{-4}$	4250	$9,24 \cdot 10^{-2}$
1600	$2,82 \cdot 10^{-4}$	4500	$1,03 \cdot 10^{-1}$
1700	$4,77 \cdot 10^{-4}$	4750	$1,11 \cdot 10^{-1}$
1800	$6,00 \cdot 10^{-4}$	5000	$1,19 \cdot 10^{-1}$
1900	$1,58 \cdot 10^{-3}$	5250	$1,25 \cdot 10^{-1}$
2000	$2,45 \cdot 10^{-3}$	5500	$1,30 \cdot 10^{-1}$
2100	$3,63 \cdot 10^{-3}$	5750	$1,34 \cdot 10^{-1}$
2200	$5,16 \cdot 10^{-3}$	6000	$1,36 \cdot 10^{-1}$
2300	$7,03 \cdot 10^{-3}$	6500	$1,37 \cdot 10^{-1}$
2360	$8,50 \cdot 10^{-3}$	7000	$1,35 \cdot 10^{-1}$
2400	$9,33 \cdot 10^{-3}$	7500	$1,31 \cdot 10^{-1}$
2500	$1,20 \cdot 10^{-2}$	8000	$1,26 \cdot 10^{-1}$
2600	$1,51 \cdot 10^{-2}$	8500	$1,21 \cdot 10^{-1}$
2700	$1,88 \cdot 10^{-2}$	9000	$1,14 \cdot 10^{-1}$
2850	$2,43 \cdot 10^{-2}$	9500	$1,07 \cdot 10^{-1}$
3000	$3,09 \cdot 10^{-2}$	10000	$9,88 \cdot 10^{-2}$
3100	$3,52 \cdot 10^{-2}$	20000	$3,06 \cdot 10^{-2}$
3200	$4,04 \cdot 10^{-2}$	40000	$5,37 \cdot 10^{-3}$
3300	$4,47 \cdot 10^{-2}$	60000	$2,64 \cdot 10^{-3}$
3400	$4,95 \cdot 10^{-2}$	70000	$1,33 \cdot 10^{-3}$

**Таблица П3.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ**

Наименование	Обозначение	Значение
Постоянная Планка	$h$	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная закона смещения (Вина) в спектре длин волн	$C_\lambda$	$28,98 \cdot 10^{-4}$ м·К
Постоянная закона смещения (Вина) в спектре частот	$C_f$	$5,88 \cdot 10^{10}$ Гц/К
Постоянная второго закона Вина	$C'_\lambda$	$1,315 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м <sup>3</sup> ·К <sup>5</sup> )
Вторая постоянная закона Планка	$C_2$	$1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К
Скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме	$c$	$2,998 \cdot 10^8$ м/с
Заряд электрона	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Максимальная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения	$K_{max}$	683 лм/Вт
Множитель, учитывающий дробовый эффект диодов фотоумножителя с электростатической фокусировкой	$B$	1,5
Удельное сопротивление вольфрама при нормальной температуре	$\rho_{м.0}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$
Температурный коэффициент сопротивления вольфрама	$\alpha_R$	$51 \cdot 10^{-4}$

Обработка результатов наблюдений при прямых измерениях [2].

Пусть имеется группа результатов наблюдений  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , полученных при прямых измерениях. Необходимо выполнить следующие действия.

1. Проанализировать результаты наблюдений и при обнаружении систематических погрешностей (или если они известны) исключить их. Например, уровень шумов измерительного прибора надо вычесть из всех результатов наблюдений.

2. Вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения:

$$\tilde{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

где  $n$  — число результатов наблюдений;  $X_i$  —  $i$ -ый результат наблюдения.

3. Вычислить оценку среднего квадратического отклонения (СКО) результата наблюдений [3, справочное приложение 1]:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2}.$$

4. Вычислить оценку СКО результата измерения:

$$S(\tilde{X}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2} = \frac{S}{\sqrt{n}}.$$

Ответ следует записать, оставив 1 значащую цифру (или 2 значащие цифры, если цифра старшего разряда меньше или равна 3).

5. Проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению.

Такая проверка проводится согласно [3] для числа результатов наблюдений  $n > 15$ . Поэтому будем априорно считать, что результаты наблюдений подчиняются нормальному распределению.

6. Определить наличие грубых погрешностей для уровня значимости  $q = 0,05$  [1].

6.1. Вычислить

$$U = \frac{\max(|X_{\min} - \tilde{X}|, |X_{\max} - \tilde{X}|)}{S},$$

где  $\tilde{X}$  — выборочное среднее (см. п. 2);  $S$  — выборочное СКО (см. п. 3);  $X_{\min} = \min X_i$  ( $1 < i < n$ );  $X_{\max} = \max X_i$  ( $1 < i < n$ ).

6.2. Определить  $I(n, 1-q)$  — квантили распределения, приведенные в табл. 18 [1].

6.3. Результат наблюдений, определяющий наибольшее значение величины  $U$ , является результатом с грубой погрешностью для принятого уровня значимости  $q$ , если  $U > I(n, 1-q)$ .

Выявленный результат наблюдений с грубой погрешностью исключают из выборки и повторяют п.п. 2...6. Эта процедура повторяется, пока все

результаты наблюдений с грубыми погрешностями не будут исключены, то есть пока не будет  $U < l(n, 1-q)$ .

Таблица П4.1

n	$l(n; 1-q)$	n	$l(n; 1-q)$
3	1,414	28	2,929
4	1,710	29	2,944
5	1,917	30	2,958
6	2,067	31	2,972
7	2,182	32	2,985
8	2,273	33	2,998
9	2,349	34	3,010
10	2,414	35	3,022
11	2,470	36	3,033
12	2,519	37	3,044
13	2,563	38	3,055
14	2,602	39	3,065
15	2,638	40	3,074
16	2,670	41	3,084
17	2,701	42	3,094
18	2,728	43	3,103
19	2,754	44	3,112
20	2,779	45	3,120
21	2,801	46	3,129
22	2,823	47	3,137
23	2,843	48	3,145
24	2,862	49	3,152
25	2,880	50	3,160
26	2,897	51	3,167
27	2,913	52	3,175

7. Вычислить доверительные границы случайной погрешности результата измерения для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ :

$$\varepsilon = t(n - 1; \alpha) S(\tilde{X}),$$

где  $t(n - 1; \alpha)$  — коэффициент Стьюдента, определяемый по доверительной вероятности  $\alpha$  и числу результатов наблюдений  $n$  в табл. 19 [3, справочное приложение 2].

Таблица П4.2.

<b>n - 1</b>	<b><math>\alpha = 0,95</math></b>	<b>n - 1</b>	<b><math>\alpha = 0,95</math></b>
3	3,182	16	2,120
4	2,776	18	2,101
5	2,571	20	2,086
6	2,447	22	2,074
7	2,365	24	2,064
8	2,306	26	2,056
9	2,262	28	2,048
10	2,228	30	2,043
12	2,179	$\infty$	1,960
14	2,145		

8. Вычислить доверительные границы неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ , принимая распределения составляющих НСП равномерными:

$$\theta = \theta_i \text{ при } m = 1,$$

где  $m$  — число составляющих НСП;

$$\theta = K(\alpha, m) \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2} \text{ при } m \geq 2,$$

где  $\theta_i$  — граница  $i$ -той составляющей НСП;  $K(0,95; m) = 1,1$  [3].

Ответ следует записать, оставив 1 значащую цифру (или 2 значащие цифры, если цифра старшего разряда меньше или равна 3).

В качестве составляющих НСП результата измерения могут быть НСП метода, средств измерений и НСП, вызванные другими источниками. Например, в качестве границ НСП принимают пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей средств измерений, если случайные составляющие погрешности пренебрежимо малы.

Если измерения проводятся измерительным прибором с НСП  $\theta_n$ , обусловленной его основной погрешностью и погрешностью округления  $\theta_{окр}$ , то [2]:

$$\theta_n = \Delta_d,$$

где  $\Delta_d$  — предел допускаемого значения погрешности прибора, указанный в его технических характеристиках, или:

$$\Delta_d \approx 3\sigma_n,$$

где  $\sigma_n$  — предел допускаемого СКО случайной составляющей основной погрешности прибора, указанный в его технических характеристиках, или:

$$\Delta_d = \frac{X_N \delta}{100},$$

где  $X_N$  — нормирующее значение, равное конечному значению шкалы стрелочного прибора;  $\delta$  — класс точности прибора;

$$\theta_{окр} = \frac{A_{\partial}}{\sqrt{12}},$$

где  $A_{\partial}$  — цена деления шкалы стрелочного прибора.

9. Вычислить доверительные границы погрешности результата измерения:

$$\Delta = \begin{cases} \varepsilon \cdot p_{Ц} \frac{\theta}{S(\tilde{X})} < 0,8; \\ \theta \cdot p_{Ц} \frac{\theta}{S(\tilde{X})} > 8; \\ K S_{\Sigma} \cdot p_{Ц} \quad 0,8 < \frac{\theta}{S(\tilde{X})} < 8, \end{cases}$$

где

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S(\tilde{X}) + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3}}};$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3} + S^2(\tilde{X})};$$

$S_{\Sigma}$  — оценка суммарной СКО результата измерения;  $K$  — коэффициент, зависящий от соотношения доверительных границ случайной погрешности и НСП.

Ответ следует записать, оставив 1 значащую цифру (или 2 значащие цифры, если цифра старшего разряда меньше или равна 3).

10. Записать итог измерения в виде [3]:

$$X = \tilde{X} \pm \Delta, \quad \alpha = 0,95.$$

Значение  $\tilde{X}$  должно быть округлено так, чтобы последняя значащая цифра была в том же разряде, что и у значения  $\Delta$ .

### Пример

Пусть имеются 4 группы результатов наблюдений  $I_1, \dots, I_5$ , полученных при прямых измерениях (табл. 20).

Таблица П4.3.

$\alpha, ^\circ$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$	$I_4, \text{А}$	$I_5, \text{А}$
0	0	0	0	0	0
5	6	5	4	5	6
10	8	9	7	7	9
15	12	11	13	13	11

Измерения проводились стрелочным прибором с классом точности 1,5, диапазоном измерений 100 А и ценой деления 1 А. Обрабатываем результаты наблюдений третьей группы.

1. Результат измерения:

$$\tilde{I} = \frac{I}{5}(8+9+7+7+9) = 8,0 \text{ А}.$$

2. Оценка СКО результата наблюдения:

$$S = \sqrt{\frac{I}{4}(0+1^2+1^2+1^2+1^2)} = 1,0 \text{ А}.$$

3. Оценка СКО результата измерения:

$$S(\tilde{I}) = \sqrt{\frac{I}{5 \cdot 4}(0+1^2+1^2+1^2+1^2)} \approx 0,447 \text{ А} \approx 0,4 \text{ А}.$$

4. Грубые погрешности:

$$U = \frac{\max(|7-8|, |9-8|)}{1} = \frac{1}{1} = 1;$$

$$l(5; 0,95) = 1,917;$$

$$U < l.$$

Следовательно, грубые погрешности отсутствуют.

5. Доверительные границы случайной погрешности результата измерения:

$$\varepsilon = t(0,25; 5) \cdot \frac{1}{\sqrt{5}} = 2,8 \cdot \frac{1}{\sqrt{5}} \approx 1,25 \text{ А}.$$

6. Доверительные границы НСП результата измерения:

$$\Delta_{\text{лб}} = \frac{100 \cdot 1,5}{100} = 1,5 \text{ А};$$

$$\theta_n = \Delta_0 = 1,50 \text{ А};$$

$$\theta_{\text{окр}} = \frac{I}{\sqrt{12}} \approx 0,289 \text{ А};$$

$$\theta = 1,1 \sqrt{1,5^2 + \frac{1}{12}} \approx 1,68 \text{ А} \approx 1,7 \text{ А}.$$

7. Доверительные границы погрешности результата измерения:

$$\frac{\theta}{S(\tilde{I})} = \frac{1,68}{0,447} \approx 3,76 \text{ А};$$

$$0,8 < 3,76 < 8;$$

$$\Delta = \frac{1,25 + 1,68}{0,447 + \sqrt{\frac{1}{3} \left( 1,5^2 + \frac{1}{12} \right)}} \sqrt{\frac{1}{3} \left( 1,5^2 + \frac{1}{12} \right) + 0,447^2} \approx 2,18 \text{ А} \approx 2,2 \text{ А}.$$

8. Итог измерения:

$$I = (8,0 \pm 22,2) \text{ А}; \alpha = 0,95.$$

## Обработка результатов наблюдений при косвенных измерениях [2].

Пусть надо определить величину  $Z = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)$ , где  $Y_1, Y_2, \dots, Y_k$  — параметры величины  $Z$ , определяемые путем прямых измерений. В этом случае необходимо выполнить следующие действия [1].

1. По результатам наблюдений, полученных при прямых измерениях каждого параметра  $Y_1, Y_2, \dots, Y_k$ , рассчитать результат измерения  $\tilde{Y}_j$ , оценку СКО результата измерения  $S(\tilde{Y}_j)$ , доверительную границу случайной погрешности результата измерения  $\varepsilon_{Y_j}$ , доверительную границу НСП результата измерения  $\theta_{Y_j}$  для каждого параметра ( $j = 1, \dots, k$ ).

2. Определить оценку результата косвенного измерения  $\tilde{Z}$ :

$$\tilde{Z} = f(\tilde{Y}_1, \dots, \tilde{Y}_k).$$

3. Для каждого параметра  $Y_j$  рассчитать доверительную границу погрешности результата прямого измерения  $\Delta_{Y_j}$  при доверительной вероятности 0,95:

$$\Delta_{Y_j} = \begin{cases} \varepsilon_{Y_j} \cdot pЦ \frac{\theta_{Y_j}}{S(\tilde{Y}_j)} < 0,8; \\ \theta_{Y_j} \cdot pЦ \frac{\theta_{Y_j}}{S(\tilde{Y}_j)} > 8; \\ KS_\Sigma \cdot pЦ \quad 0,8 < \frac{\theta_{Y_j}}{S(\tilde{Y}_j)} < 8. \end{cases}$$

4. Вычислить значения частных производных  $\frac{\partial f}{\partial Y_j}$  при найденных величинах  $\tilde{Y}_j$ .

5. Определить доверительную границу погрешности результата косвенного измерения при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ :

$$\Delta_Z = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial f}{\partial Y_j} \right)^2 \Delta_{Y_j}^2}.$$

Ответ следует записать, оставив 1 значащую цифру (или 2 значащие цифры, если цифра старшего разряда меньше или равна 3).

6. Записать итог косвенного измерения в виде:

$$Z = \tilde{Z} \pm \Delta_Z ; \alpha = 0,95.$$

Значение  $\tilde{Z}$  должно быть округлено так, чтобы последняя значащая цифра была в том же разряде, что и у значения  $\Delta_Z$ .

### Пример

Пусть по результатам наблюдений, приведенным в табл. 20, надо опре-

делить  $I^* = \frac{I}{I_{max}}$ . Обработаем третью группу результатов наблюдений.

1. Результат измерения, оценку СКО результата измерения, доверительную границу случайной погрешности результата измерения, доверительную границу НСП результата измерения параметра  $I$  возьмем из предыдущего примера:

$$\tilde{I} = 8,0 \text{ A}; S(\tilde{I}) = 0,447 \text{ A}; \varepsilon_I = 1,25 \text{ A}; \theta_I = 1,68 \text{ A}.$$

Аналогично рассчитаем результат измерения, оценку СКО результата измерения, доверительную границу случайной погрешности результата измерения, доверительную границу НСП результата измерения параметра  $I_{max}$  по четвертой группе результатов наблюдений:

$$\tilde{I}_{max} = 12,0 \text{ A}; S(\tilde{I}_{max}) = 0,447 \text{ A}; \varepsilon_{I_{max}} = 1,25 \text{ A}; \theta_{I_{max}} = 1,68 \text{ A}.$$

2. Оценка результата косвенного измерения:

$$\tilde{I}^* = 8,0 / 12,0 \approx 0,667 \text{ A}.$$

3. Доверительную границу погрешности результата прямого измерения параметра  $I$  возьмем из предыдущего примера:

$$\Delta_I \approx 2,18 \text{ A}.$$

Аналогично рассчитаем доверительную границу погрешности результата прямого измерения параметра  $I_{max}$ :

$$\Delta_{I_{max}} \approx 2,18 \text{ A}.$$

4. Значения частных производных измеряемой величины по параметрам:

$$\frac{\partial^*}{\partial I} = \frac{1}{\tilde{I}_{max}} = \frac{1}{12,0} \approx 0,00833 \text{ A}^{-1};$$

$$\frac{\partial^*}{\partial I_{max}} = -\frac{\tilde{I}}{\tilde{I}_{max}^2} = -\frac{8,0}{144,0} \approx -0,0556 \text{ A}^{-1}.$$

5. Доверительная граница погрешности результата косвенного измерения:

$$\Delta_{I^*} = \sqrt{0,00833^2 \cdot 2,18^2 + 0,0556^2 \cdot 2,18^2} \approx 0,218 \text{ A} \approx 0,22 \text{ A}.$$

6. Итог косвенного измерения:

$$I^* = (0,67 \pm 0,22) \text{ A}; \alpha = 0,95.$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

**Таблица основных энергетических, фотонных, световых величин и их единиц**

### *Энергетические величины*

Наименование энергетической величины	Определяющее уравнение	Единица измерения
Поток излучения	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	Вт
Спектральная плотность потока излучения	$\Phi_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$	Вт/мкм
Распределение спектральной плотности потока излучения по длине волны (аналогично для других величин)	$\Phi_{e,\lambda(\lambda)}$	Вт/мкм
Максимальная спектральная плотность потока излучения	$\Phi_{e,\lambda,m}$	Вт/мкм
Относительное распределение спектральной плотности потока излучения по длине волны (аналогично для других величин)	$\varphi_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{\Phi_{e,\lambda(\lambda)}}{\Phi_{e,\lambda,m}}$	отн.ед.
Длина волны оптического излучения	$\lambda$	мкм
$\Phi_e = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda = Q_{e,\lambda,m} \int \varphi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Вт
Энергия излучения	$Q_e = t_1 \int^{t_2} \Phi_e(t) dt$	Дж
Спектральная плотность энергии излучения	$Q_{e,\lambda} = \frac{dQ_e}{d\lambda}$	Дж/мкм
$Q_e = \int Q_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda = Q_{e,\lambda,m} \int q_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Дж
Сила излучения	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}$	Вт/ср
Спектральная плотность силы излучения	$I_{e,\lambda} = \frac{dI_e}{d\lambda}$	Вт/(ср*мкм)
$I_e = \int I_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda = I_{e,\lambda,m} \int i_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Вт/ср
Энергетическая светимость	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	Вт/м <sup>2</sup>
Спектральная плотность энергетической светимости	$M_{e,\lambda} = \frac{dM_e}{d\lambda}$	Вт/(м <sup>2</sup> *мкм)
$M_e = \int M_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda = M_{e,\lambda,m} \int m_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Вт/м <sup>2</sup>
Облучённость	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	Вт/м <sup>2</sup>
Спектральная плотность облучённости	$E_{e,\lambda} = \frac{dE_e}{d\lambda}$	Вт/(м <sup>2</sup> *мкм)
$E_e = \int E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda = E_{e,\lambda,m} \int e_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Вт/м <sup>2</sup>

Энергетическая яркость	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\omega \cdot dA \cdot \cos\theta} = \frac{dI_e}{dA \cdot \cos\theta}$	Вт/(ср*м <sup>2</sup> )
Спектральная плотность энергетической яркости	$L_{e,\lambda} = \frac{dL_e}{d\lambda}$	Вт/(ср*м <sup>2</sup> *мкм)
$L_e = \int L_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda = L_{e,\lambda,m} \int l_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda$		Вт/(ср*м <sup>2</sup> )
Энергетическая экспозиция	$H_e = \int_{t_1}^{t_2} E_e(t)dt$	Вт*с/м <sup>2</sup> =Дж/м <sup>2</sup>
Спектральная плотность энергетической экспозиции	$H_{e,\lambda} = \frac{dH_e}{d\lambda}$	Вт*с/(м <sup>2</sup> *мкм)
$H_e = \int H_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda = H_{e,\lambda,m} \int h_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda$		Дж/м <sup>2</sup>
Энергетическое освечивание	$\theta_e = \int_{t_1}^{t_2} I_e(t)dt$	Вт*с/ср=Дж/ср
Спектральная плотность энергетического освечивания	$\theta_{e,\lambda} = \frac{d\theta_e}{d\lambda}$	Вт*с/(ср*мкм)
$\theta_e = \int \theta_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda = \theta_{e,\lambda,m} \int v_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda$		Дж/ср

### Световые величины

Наименование световой величины	Определяющее уравнение	Единица измерения
Световой поток	$d\Phi_\gamma = I_\gamma d\omega$	лм
Спектральная плотность светового потока	$\Phi_{\gamma,\lambda} = \frac{d\Phi_\gamma}{d\lambda}$	лм/мкм
Спектральная световая эффективность монохроматического излучения	$K(\lambda) = \frac{\Phi_{\gamma,\lambda}}{\Phi_{e,\lambda}}$	лм/Вт
Максимальная спектральная световая эффективность излучения при $\lambda=0.555$ мкм	$K_m = 683$ $\frac{1}{K_m} = 0,00146$	лм/Вт Вт/лм
Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения (старое $k_\lambda$ )	$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{\lambda,m}}$	отн.ед.
$\Phi_\gamma = K_{\lambda,m} \int V(\lambda)\Phi_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda$		лм
Световая энергия	$Q_\gamma = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_\gamma(t)dt$	лм*с
Спектральная плотность световой энергии	$Q_{\gamma,\lambda} = \frac{dQ_\gamma}{d\lambda}$	лм*с/мкм
$Q_\gamma = \int Q_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda = Q_{\gamma,\lambda,m} \int q_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda$		лм*с

Сила света	$I_{\gamma} = \frac{d\Phi_{\gamma}}{d\omega}$	кД=лм/ср
Спектральная плотность силы света	$I_{\gamma,\lambda} = \frac{dI_{\gamma}}{d\lambda}$	кД/мкм
$I_{\gamma} = \int I_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda = I_{\gamma,\lambda,m} \int i_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda$		кД
Светимость (старое R)	$M_{\gamma} = \frac{d\Phi_{\gamma}}{dA}$	лм/м <sup>2</sup>
Спектральная плотность светимости (старое r <sub>λ</sub> )	$M_{\gamma,\lambda} = \frac{dM_{\gamma}}{d\lambda}$	лм/(м <sup>2</sup> *мкм)
$M_{\gamma} = \int M_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda = M_{\gamma,\lambda,m} \int m_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda$		лм/м <sup>2</sup>
Освещенность	$E_{\gamma} = \frac{d\Phi_{\gamma}}{dA}$	лк=лм/м <sup>2</sup>
Спектральная плотность освещенности	$E_{\gamma,\lambda} = \frac{dE_{\gamma}}{d\lambda}$	лк/мкм
$E_{\gamma} = \int E_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda = E_{\gamma,\lambda,m} \int e_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda$		лк
Яркость(старое B)	$L_{\gamma} = \frac{d^2\Phi}{d\omega dA \cos \theta}$	кД/м <sup>2</sup> =лм/(ср*м <sup>2</sup> )
Спектральная плотность яркости	$L_{\gamma,\lambda} = \frac{dL_{\gamma}}{d\lambda}$	кД/(м <sup>2</sup> *мкм)
$L_{\gamma} = \int L_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda = L_{\gamma,\lambda,m} \int l_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda$		кД/м <sup>2</sup>
Световая экспозиция	$H_{\gamma} = \int_{t_1}^{t_2} E_{\gamma}(t)dt$	лк*с
Спектральная плотность световой экспозиции	$H_{\gamma,\lambda} = \frac{dH_{\gamma}}{d\lambda}$	лк*с/мкм
$H_{\gamma} = \int H_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda = H_{\gamma,\lambda,m} \int h_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda$		лк*с
Освечивание	$\Theta_{\gamma} = \int_{t_1}^{t_2} I_{\gamma}(t)dt$	кД*с
Спектральная плотность освечивания	$\Theta_{\gamma,\lambda} = \frac{d\Theta_{\gamma}}{d\lambda}$	кД*с/мкм
$\Theta_{\gamma} = \int \Theta_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda = \Theta_{\gamma,\lambda,m} \int \nu_{\gamma,\lambda}(\lambda)d\lambda$		кД*с

## Фотонные величины

Наименование фотонной величины	Определяющее уравнение	Единица измерения
Поток излучения в фотонах	$\Phi_p = \frac{1}{(hc) \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}$	фотон/с
Спектральная плотность потока излучения в фотонах	$\Phi_{p,\lambda} = \frac{\Phi_{e,\lambda}}{hc}$	фотон/(с*мкм)
$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с = Вт · с <sup>2</sup> – постоянная Планка $c = 2,998 \cdot 10^{14}$ мкм/с = $2,998 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме		
Формула Планка: $M_{e,\lambda}(\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} \left( \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1}$ , где $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-12}$ Вт · см <sup>2</sup> ; $C_2 = 1,438$ см · К = $1,438 \cdot 10^4$ мкм · К		
$\Phi_p = \int \Phi_{p,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Фотон/с
Энергия излучения в фотонах	$Q_p = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_p(t) dt$	Фотон
Спектральная плотность энергии излучения в фотонах	$Q_{p,\lambda} = \frac{dQ_p}{d\lambda}$	Фотон/мкм
$Q_p = \int Q_{p,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Фотон
Сила излучения в фотонах	$I_p = \frac{d\Phi_p}{d\omega}$	Фотон/(с*ср)
Спектральная плотность силы излучения в фотонах	$I_{p,\lambda} = \frac{dI_p}{d\lambda}$	Фотон/(с*ср*мкм)
$I_p = \int I_{p,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Фотон/(с*ср)
Энергетическая светимость в фотонах	$M_p = \frac{d\Phi_p}{dA}$	Фотон/(с*м <sup>2</sup> )
Спектральная плотность энергетической светимости в фотонах	$M_{p,\lambda} = \frac{dM_p}{d\lambda}$	Фотон/(с*м <sup>2</sup> *мкм)
$M_p = \int M_{p,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Фотон/(с*м <sup>2</sup> )
Облученность в фотонах	$E_p = \frac{d\Phi_p}{dA}$	Фотон/(с*м <sup>2</sup> )
Спектральная плотность облученности в фотонах	$E_{p,\lambda} = \frac{dE_p}{d\lambda}$	Фотон/(с*м <sup>2</sup> *мкм)
$E_p = \int E_{p,\lambda}(\lambda) d\lambda$		Фотон/(с*м <sup>2</sup> )
Энергетическая яркость в фотонах	$L_p = \frac{d^2\Phi_p}{d\omega dA \cos\theta}$	Фотон/(с*м <sup>2</sup> *ср)

Спектральная плотность энергетической яркости в фотонах	$L_{p,\lambda} = \frac{dL_p}{d\lambda}$	Фотон/(с*м <sup>2</sup> *ср*мкм)
$L_p = \int L_{p,\lambda}(\lambda)d\lambda$		Фотон/(с*м <sup>2</sup> *ср)
Энергетическая экспозиция в фотонах	$H_p = \int_{t_1}^{t_2} E_p(t)dt$	Фотон/м <sup>2</sup>
Спектральная плотность энергетической экспозиции в фотонах	$H_{p,\lambda} = \frac{dH_p}{d\lambda}$	Фотон/(м <sup>2</sup> *мкм)
$H_p = \int H_{p,\lambda}(\lambda)d\lambda$		Фотон/м <sup>2</sup>
Энергетическое освечивание в фотонах	$\Theta_p = \int_{t_1}^{t_2} I_p(t)dt$	Фотон/ср
Спектральная плотность энергетического освечивания в фотонах	$\Theta_{p,\lambda} = \frac{d\Theta_p}{d\lambda}$	Фотон/(ср*мкм)
$\Theta_p = \int \Theta_{p,\lambda}(\lambda)d\lambda$		Фотон/ср

Схемы, поясняющие некоторые уравнения:



Поток



Сила света



Светимость



Освещенность



Яркость

Примечания:

- Соотношения между старыми и новыми единицами и их старые наименования

$$1 \text{ нит} = 1 \text{ свеча/м}^2 = 10^{-4} \text{ стильб} = 1,005 \text{ кд/м}^2$$

$$1 \text{ лк (старый)} = 1,005 \text{ лк (новый)}$$

$$1 \text{ свеча} = 1,005 \text{ кд (международ.)}$$

$$1 \text{ блист} = 1 \text{ лм/м}^2$$

$$1 \text{ лм (старый)} = 1,005 \text{ лм}$$

2. Допускается возможность не использовать подстрочные индексы “e” или “v”, в обозначениях величин, когда исключается возможность их различного толкования

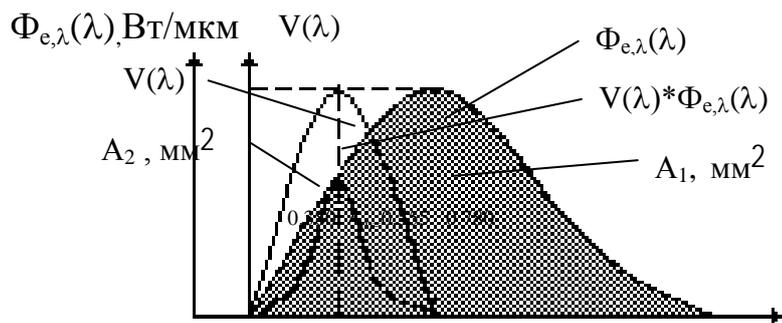
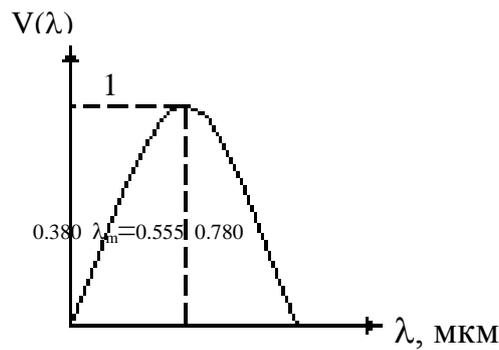
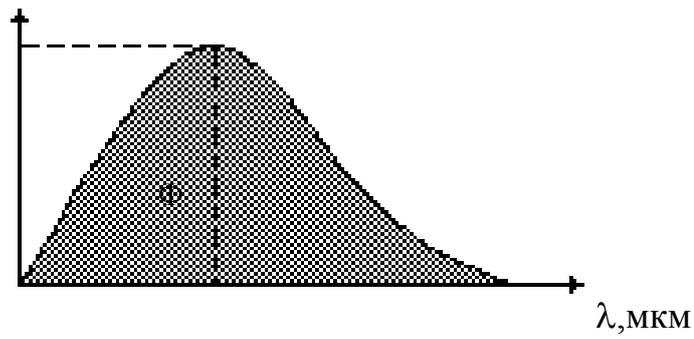
3. Оптическое излучение - излучение с длиной волны от 1 нм до 1 мм. Свет – видимое излучение с длиной волны от 0,380 мкм до 0,780 мкм.

4. Настоящая таблица составлена с учетом ГОСТ 7601-78

### Переход от энергетических величин к световым

$$\begin{aligned} &\Phi_{e,\lambda}(\lambda), \text{Вт/мкм} \\ &\Phi_{e,\lambda} \end{aligned}$$

$$\Phi_{e,\lambda}(\lambda) = f(\lambda)$$



$$\chi_{\text{глаза}} = \frac{\int_{0,38}^{0,78} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{A_2}{A_1}$$

$$\Phi_v [\text{лм}] = \Phi_e [\text{Вт}] \cdot 683 \left[ \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] \cdot \chi_e; \quad \lambda_m = 0,555 \text{ мкм}; \quad K_{\lambda_m} = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}};$$

Перевод справедлив для любой фотометрической величины.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Список сокращений .....	5
Термины и их обозначения.....	5
1. Внешний фотоэффект .....	7
2. Параметры и характеристики приемников излучения на внешнем фотоэф- фекте .....	7
3. Приемники на внешнем фотоэффекте .....	23
3.1 Фотоэлектронный умножитель .....	23
3.1.1 Лабораторная работа «Исследование фотоумножителя» .....	33
3.1.2 Примеры решения задач .....	41
3.1.3 Задачи .....	46
3.2. Электронно-оптический преобразователь .....	47
3.2.1 Лабораторная работа «Исследование электронно-оптического пре- образователя» .....	53
3.2.2 Примеры решения задач .....	56
3.2.3 Задачи.....	56
Список использованных источников .....	57
Приложение 1. Краткое описание контрольно-измерительной аппаратуры ..	59
Приложение 2. Оформление отчета по лабораторной работе .....	62
Приложение 3. Таблицы со справочными данными для решения задач.....	78
Приложение 4. Обработка результатов измерений.....	81
Приложение 5. Таблица основных энергетических, фотонных, световых ве- личин и их единиц .....	88

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.



## **КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

Кафедра ОЭПиС создавалась в 1937-38 годах и существовала под следующими названиями:

- с 1938 по 1958 год - кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год - кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год - кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года - кафедра оптико-электронных приборов и систем.
- Кафедру возглавляли:
  - с 1938 по 1942 год - профессор К.Е. Солодилов;
  - с 1942 по 1945 год профессор А.Н. Захарьевский (по совместительству);
  - с 1945 по 1946 год - профессор М.А. Резунов;
  - с 1947 по 1972 год - профессор С.Т. Цуккерман;
  - с 1972 по 1992 год - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев;
  - с 1992 по 2007 год - заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.
- с 2007 года по настоящее время - почетный работник высшего профессионального образования, профессор В.В. Коротаев.

История кафедры началась с организации в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) кафедры Военных оптических приборов. Организатором кафедры был технический директор Ленинградского оптико-механического завода (1933-1937), заведующий кафедрой оптико-механических приборов ЛИТМО профессор Сергей Иванович Фрейберг. Первым заведующим кафедрой был доцент К.Е. Солодилов, до этого возглавлявший Центральное конструкторское бюро (ЦКБ) Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности (ВООМП) и преподававший на кафедре оптико-механических приборов курс «Спец. приборы». Преподавателями кафедры стали сотрудники этого ЦКБ - М.А. Резунов, М.Я. Кругер, С.Т. Цуккерман, В.А. Егоров, Б.М. Кулежнов.

В годы Великой Отечественной войны (1942-1944 гг) кафедра была эвакуирована в город Черепаново Новосибирской области, где ее объединили с кафедрой оптико-механических приборов под руководством профессора

А.И. Захарьевского. На 1 апреля 1945 года после реэвакуации ЛИТМО в Ленинград преподавателями кафедры состояли д.ф-м. наук, профессор В.М. Чулановский, к.т.н., доцент М.Я. Кругер и старший преподаватель Г.Я. Гриневич, сначала заведовал профессор А.Н. Захарьевский, а позже в 1945-46 годах - начальник КБ ГОИ М.А. Резунов.

После возвращения в Ленинград кафедрой в 1945 - 46 годах по совместительству заведовал начальник конструкторского бюро (КБ) Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ) М.А. Резунов.



## Учебная и научно-исследовательская работа

На кафедре поставлено 53 лабораторных работы из них по:

1. Точным механизмам — 17 работ.
2. Артиллерийским приборам — 15 работ.
3. Авиационным приборам — 13 работ.
4. Морским приборам — 8 работ.

РАЗРАБОТАНО УЧЕБНЫХ И НАГЛЯДНЫХ ПОСОБИЙ — 95.

Из 24<sup>х</sup> научно-исследовательских работ, выполненных кафедрой по заданию военных организаций и промышленности наиболее интересны:

1. Разработка проекта технологии и изготовления 5" гониметра.
2. Креномер.
3. Прибор для определения боковых перемещений.

### Изданы КНИГИ

1. С.Т. Цуккерман „Точные механизмы“
2. А.П. Рифтин и Г.Я. Гриневич — „Исследование по фотозатворам“
3. К.Е. Володцлов — „Военно-оптические приборы“

За время Великой Отечественной войны во время блокады кафедра не прекращала работы. Под непосредственным руководством проф. С.Т. Цуккермана были разработаны и изготовлены новые конструкции прицелов: ЗП-1; МЗП-3; МЗП-2; КУЦ; ПСПЦ; БП-1; Зенитный прицел 1944 г. Прицелы КУЦ, ПСПЦ — изготавливались в серийном производстве. Прицел МЗП-2 принят на вооружении. Проф. Цуккерман С.Т. за успешную работу награжден 2 орденами.

### Стенды кафедры военно-оптических приборов 1945 года

В начале 1947 года кафедру возглавил крупный специалист в области военных оптических приборов и точности механизмов профессор Семен Тобиасович Цуккерман, который руководил ею до 1972 года. В 1958 году кафедра была реорганизована в кафедру специальных оптических приборов, а в 1967 году - в кафедру оптико-электронных приборов (ОЭП).

В предвоенные, военные и послевоенные годы С.Т. Цуккерман работал над созданием прицельных устройств для зенитной и авиационной артиллерии. Он был одним из создателей серийного авиационного гироскопического прицела АСП с автоматической выработкой поправки на упреждение, который устанавливался на истребителях МиГ. Публикация С.Т. Цуккерманом в предвоенные годы книги «Точные механизмы» (М.: Оборонгиз, 1941) является значительным вкладом в развитие отечественного точного приборостроения. С.Т. Цуккерман - автор более 120 научных работ и более 50 изобретений.

В 1958 г. при кафедре была организована отраслевая лаборатория «Специальные оптические приборы» с достаточно сильной группой конструкторов-разработчиков. В 1959 году в лаборатории начал работать Г.Г. Ишанин, позже 1966 по 1972 год он исполнял обязанности заведующего этой лабораторией. С 1960 года в лаборатории под руководством профессора С.Т. Цуккермана и старшего научного сотрудника А.С. Гридин начались работы по созданию приборов управления по лучу (ПУЛ), предназначенных для управления движением различных подвижных объектов по прямой линии или по программе. В этих работах принимал участие Г.Г. Ишанин, разработавший оптико-механическую часть первого прибора управления по лучу ПУЛ-1 и провел его полевые испытания.

В 1965 году Г.Г. Ишанин начал разработку теории, методов расчета и проектирования, а также технологии и конструктивных решений приемников на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце. Приемники на термоупругом эффекте были внедрены в серийное производство. На основе этих приемников для промышленности разрабатывались измерители параметров импульсного и непрерывного лазерного излучения в большом динамическом диапазоне. Научно-исследовательские работы, проведенные в указанном направлении, легли в основу учебной дисциплины «Источники и приемники оптического излучения». В 1978-1987 годах Г.Г. Ишанин являлся научным руководителем ряда НИР по разработке фотометрической аппаратуры, предназначенной для паспортизации оптико-электронных приборов и систем различного назначения.

Значительное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре выдающегося специалиста в области оптико-электронного приборостроения, члена-корреспондента Российской академии наук (РАН), Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии профессора М.М. Мирошникова, который, работая на кафедре ОЭП с 1969 года по 1976 год в должности профессора по совместительству, поставил и читал курс «Теория оптико-электронных приборов».

С 1972 года по 1992 год кафедрой ОЭП заведовал заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Леонид Федорович Порфирьев, известный специалист в области автоматических ОЭПиС в комплексах навигации и управления авиационной и космической техникой. Соответственно тематика выполнения научно-исследовательских работ на кафедре приобрела новые направления, существенно увеличилось число тем, носящих поисковый фундаментальный характер. Были разработаны новый учебный план и программы учебных дисциплин.

Л.Ф. Порфирьев - автор 19 учебников, учебных пособий и монографий, среди которых можно выделить такие как "Теория оптико-электронных приборов и систем" (Л.: Машиностроение, 1980), «Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах» (Л.: Машиностроение, 1989). Результаты его работ можно оценить как значительный вклад в разработку общей теории оптико-электронных систем.

Л.Ф. Порфирьев как руководитель проводил достаточно жесткую кадровую политику, при которой на кафедре оставались работать только те сотрудники, которые отличались преданностью делу. При этом он оказывал всемерную поддержку сотрудникам кафедры по разработке ими различных направлений теории и практики оптико-электронного приборостроения. По результатам научно-исследовательских работ в этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Г.Н. Грязин (1983 г.), Е.Г. Лебедько (1985 г.), Э.Д. Панков (1986 г.), Г.Г. Ишанин (1988 г.), защищено много диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В этот период под руководством Э.Д. Панкова начали проводиться исследования по разработке новых оптико-электронных систем измерения взаимного положения разнесенных в пространстве объектов.

Г.Н. Грязин, перешедший на кафедру с радиотехнического факультета в конце 60-х годов, продолжил свои работы в области прикладного телевидения, в частности, по разработке систем наблюдения за быстродвижущимися объектами и быстропротекающими процессами.

С 1975 года заведующим отраслевой лабораторией стал старший научный сотрудник А.Н. Тимофеев, который продолжил исследования по разработке методов и средств контроля пространственного положения объектов с помощью ОЭП с оптической равносигнальной зоной для машиностроения, энергетики, строительства, судостроения и железнодорожного транспорта.

С 1975 года, после увольнения в запас, из Ленинградской военной инженерной краснознаменной академии (ЛВИКА) им. А.Ф. Можайского на кафедру пришел работать в должности профессора Сергей Павлович Авдеев, известный специалист в области ОЭПиС космических аппаратов. Он поставил курсы и читал лекции по учебным дисциплинам «Оптико-электронные приборы», «Оптико-электронные приборы систем управления», «Оптико-электронные приборы для научных исследований».

Существенное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре лауреата Ленинской и Государственной премий профессора Б.А. Ермакова, известного специалиста в области физической оптики и оптико-электронного приборостроения. Б.А. Ермаков работал на кафедре ОЭП с 1979 года по 1992 год в должности профессора по совместительству и поставил курс «Оптико-электронные приборы с лазерами».

В 70-80 годах под руководством доцента Е.Г. Лебедько проводились исследования законов отражения лазерного излучения от нестационарных поверхностей и протяженных объектов, исследования в области теории идентификации объектов по их излучению в сложной фоновой ситуации. Создан комплекс для лазерной локации крупногабаритных морских объектов сложной конфигурации и водной поверхности. В этих работах принимали участие доценты О.П. Тимофеев и С.Б. Лукин.

В 70-90 годах под руководством Л.Ф. Порфирьева был разработан ряд астродатчиков, систем астроориентации и космической навигации (В.И. Калинин, А.Л. Андреев, С.Н. Ярышев).

С 1992 г. заведующим кафедрой является заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Э.Д. Панков. В 1992 году кафедра была переименована в кафедру оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС). Под руководством Э.Д. Панкова в 70-90-х годах были проведены разработки ряда оптико-электронных приборов и систем специального и гражданского применения, нашедших практическое внедрение и способствующих научно-техническому прогрессу и укреплению обороноспособности нашей страны. В частности, исследования и разработки в области линейных и угловых изме-

рений позволили приступить к решению общей проблемы согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах с помощью оптико-электронных систем.

В рамках указанных работ доцентом И.А. Коняхиным проводились исследования, результаты которых можно классифицировать как разработку теории построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации.

В то же время доцентом В.В. Коротаевым разработан ряд поляризационных приборов и измерительных установок. Теоретическим результатом работ явилась разработка методологии анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов. По результатам указанных работ В.В. Коротаев (в 1997 г.) и И.А. Коняхин (в 1998 г.) защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

Применение многоэлементных приемников в системах пеленгации дало толчок развитию телевизионных систем технического зрения, измерительных телевизионных систем и систем обработки изображений. Результаты этих исследований были использованы доцентом А.Л. Андреевым при постановке учебных курсов «Оптико-электронные системы с ЭВМ», «Специализированные аппаратные и программные средства ОЭП», «Автоматизированные телевизионные вычислительные комплексы», а также доцентом С.Н. Ярышевым при постановке им в 1993 году учебной дисциплины «Видеотехника». Указанные курсы обеспечиваются лабораторным практикумом на базе рабочих мест, оснащенных персональными компьютерами, объединенными в локальную сеть. Рабочие места оснащены аппаратными и программными средствами цифровой видеозаписи и обработки изображений. В этот период профессором Г.Н. Грязиным были подготовлены дисциплины: «Телевизионные системы», «Прикладное телевидение и телевизионно-вычислительные комплексы» (совместно с доцентом А.Л. Андреевым).

На основе обобщения методик расчета оптико-электронных систем различного назначения и принципа действия в 1981 году были развернуты работы по созданию элементов систем автоматизированного проектирования ОЭП. За период с 1981 по 1987 год под руководством И.А. Коняхина были разработаны оригинальные пакеты прикладных программ расчета параметров систем измерения пространственного положения объектов.

С 2007 г. заведующим кафедрой является почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор В.В. Коротаев. На кафедре была открыта подготовка по новой специализации инженеров «Оптико-электронные приборы и системы обработки видеoinформации» и новая магистерская программа «Оптико-электронные методы и средства обработки видеoinформации».

В 2007 году был создан научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения (НОЦ ОЭП), который выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию видеoinформационных и информационно-измерительных приборов различного на-

значения, высокоточных приборов для измерения линейных, угловых и других физических величин в промышленности, энергетике, на транспорте, а также систем технического зрения и обработки видеоинформации. К выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ широко привлекаются студенты, аспиранты, молодые специалисты, молодые кандидаты наук. Научно-образовательный центр является активным участником Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

**При заявлении научно-педагогической школы «Оптико-электронное приборостроение» в 2009 году были сформулированы следующие основные научно-технические результаты, достигнутые в период с 1938 по 2009 годы:**

- разработаны принципы построения военных оптико-механических приборов;
- разработаны принципы построения точных механизмов;
- разработаны принципы построения оптико-электронных приборов с оптической равносигнальной зоной;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения оптико-электронных приборов;
- разработаны методы описания импульсных сигналов, идентификации и классификации объектов в системах нестационарной лазерной локации;
- разработаны теория, принципы построения и методы расчета импульсных телевизионных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- обнаружен термоупругий эффект в кристаллическом кварце и создан новый тип приемников оптического излучения;
- разработана теория построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- разработана методология анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения измерительных систем на основе матричных фотопреобразователей;
- разработаны основы построения ОЭС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах.

**Основоположники научной школы:**

Солодилов Константин Евгеньевич, заведующий кафедрой с 1938 по 1942 год, профессор;

Цуккерман Соломон Тобиасович, заведующий кафедрой с 1947 г. по 1972 г., профессор;

Мирошников Михаил Михайлович, директор ГОИ, д.т.н., профессор, профессор кафедры ОЭП с 1967 г. по 1978 г.; член-корреспондент Российской Академии наук, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии;

Порфирьев Леонид Федорович, заведующий кафедрой с 1972 г. по 1992 г., д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

**Направления научных исследований кафедры ОЭПиС в 2007-2011 годах**  
Развитие теоретических основ и принципов построения оптико-электронных приборов и систем, в том числе:

- видеоинформационных измерительных систем;
- видеоинформационных систем наблюдения;
- видеоинформационных импульсных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- комплексированных телевизионно-тепловизионных систем наблюдения;
- ОЭПиС обеспечения техносферной безопасности;
- ОЭПиС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах;
- автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- ОЭПиС цветового и спектрального анализа объектов;
- фотометрических систем аттестации ОЭПиС, источников и приемников оптического излучения;
- систем лазерной локации с нестационарным облучением;
- ОЭС сепарации полезных ископаемых.

По результатам исследований в этот период на кафедре были защищены 14 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук. Идет активное пополнение преподавательского состава молодыми кандидатами наук. В настоящее время на кафедре работает 7 кандидатов наук в возрасте до 35 лет.

Мы занимаемся разработкой оптико-электронных приборов и систем в целом:

- системотехническое проектирование,
- разработка (выбор) оптической системы,
- разработка конструкции,
- разработка (выбор) электроники и средств обработки информации,
- разработка программного обеспечения,
- сборка, юстировка, настройка и испытания.

По итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов СПбГУ ИТМО 2007-2012 годов кафедра занимала призовые места.

По результатам научных работ сотрудниками кафедры ОЭПиС выпущено в свет 15 монографий, 13 учебников и учебных пособий. На кафедре подготовлено 14 докторов наук, а также более 115 кандидатов наук.

На разработки кафедры получены авторские свидетельства СССР и патенты Российской Федерации на более чем 200 изобретений. Наибольший вклад в изобретательскую деятельность внес профессор Э.Д. Панков – автор 123 изобретений, из которых 33 внедрены в промышленности.

С информацией о кафедре ОЭПиС можно ознакомиться на сайте кафедры:

<http://oeps.ifmo.ru/>

Г.Г. Ишанин,  
Н.К. Мальцева

ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВНЕШНЕМ  
ФОТОЭФФЕКТЕ  
Учебно-методическое пособие

В авторской редакции  
Дизайн  
Верстка

Н.К. Мальцева  
Н.К. Мальцева

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного  
университета информационных технологий, механики и оптики  
Зав. РИО  
Н.Ф. Гусарова  
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99  
Подписано к печати 23.05.2013  
Заказ №  
Тираж 200 экз  
Отпечатано на ризографе