



НОВГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯРОСЛАВА МУДРОГО

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Великий Новгород
2023**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯРОСЛАВА МУДРОГО»

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лабораторный практикум

Великий Новгород
2023

УДК 621.383(075.8)
ББК 32.854я73
П53

Печатается по решению
РИС НовГУ

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук **А. М. Чупраков**
(ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург)

доктор технических наук, профессор **Б. И. Селезнев**
(Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,
г. Великий Новгород)

Полупроводниковые приемники оптического излучения:
П53 лабораторный практикум / авт.-сост.: В. В. Гаврушко, В. А. Ласткин,
А. А. Сапожников; Новгородский гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. –
Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2023. – 59 с.
ISBN 978-5-89896-855-7

Пособие подготовлено на основе опыта проведения учебных занятий по курсу «Полупроводниковые приемники оптического излучения» для магистрантов НовГУ различных специальностей.

В пособии представлены руководства к выполнению комплекса работ для изучения и практического освоения методов измерения важнейших характеристик полупроводниковых фотоприемников. Пособие содержит описание 7 лабораторных работ, включающих вопросы градуировки метрологических источников оптического излучения, определения спектральной чувствительности и диаграммы направленности фотоприемников, исследования пороговых характеристик фотоприемников.

Пособие прежде всего рассчитано на магистрантов, изучающих курс «Полупроводниковые приемники оптического излучения». Пособие также может быть полезным для студентов, осваивающих другие курсы, связанные с фотоникой и оптоэлектроникой, а также для начинающих разработчиков оптоэлектронных устройств, знакомых с принципами действия и физическими основами работы фотоприемников.

УДК 621.383(075.8)
ББК 32.854я73

ISBN 978-5-89896-855-7

© Новгородский государственный
университет им. Ярослава Мудрого,
2023

© В. В. Гаврушко, В. А. Ласткин,
А. А. Сапожников, составление,
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа 1. Определение спектральных характеристик источников оптического излучения	5
Лабораторная работа 2. Измерение спектральной характеристики фотоприемника.....	17
Лабораторная работа 3. Исследование диаграммы направленности фотоприемника.....	26
Лабораторная работа 4. Определение токовой чувствительности фотоприемников.....	33
Лабораторная работа 5. Измерение дифференциального сопротивления фотоприемников.....	41
Лабораторная работа 6. Измерение эквивалентной шумовой полосы измерительного тракта.....	44
Лабораторная работа 7. Определение порога чувствительности и обнаружительной способности фотоприемников	47
Литература.....	52
Приложения.....	53
Приложение 1. Приемник излучения двухцветный ФДМ-11-24. Технические условия ТУ-6349-001-45259072-07 (извлечение).....	53
Приложение 2. Габаритный чертёж	55
Приложение 3. Диафрагма АЧТ.....	56
Приложение 4. Чертеж диска модулятора.....	57
Приложение 5. Параметры операционного усилителя TL071 (извлечение).....	58
Приложение 6. Спектральная характеристика эталонного фотоприемника ЛФТИ	59

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время фотоприемники находят широкое применение в различных отраслях науки, техники, бытовых приборах, а также для обеспечения обороноспособности страны. При разработке новых современных радиоэлектронных комплексов ожидается дальнейшее усиление в них роли оптоэлектронных устройств. Знание физических принципов, характеристик, методов использования фотоприемников является актуальным для инженера радиоэлектронного профиля. Целью настоящего пособия является практическое освоение методов измерения комплекса важнейших характеристик полупроводниковых фотоприемников. Пособие рассчитано прежде всего на студентов и магистров, изучающих дисциплину «Полупроводниковые приемники оптического излучения» или выполняющих курсовые и выпускные квалификационные работы по близкой тематике. Пособие также может быть полезным для начинающих разработчиков оптоэлектронных устройств, знакомых с принципами действия и физическими основами работы фотоприемников.

Лабораторная работа 1

Определение спектральных характеристик источников оптического излучения

Введение

Для определения ряда основных характеристик фотоприемников необходимо использовать источники оптического излучения.

Важнейшей характеристикой любого источника излучения является распределение энергии по длинам волн, или его спектральная характеристика. Определение такой характеристики требует применения специального оборудования и разработанной методики измерений.

В данной работе учащимся предлагается освоить способы определения спектрального распределения излучательной способности двух источников, часто используемых в измерениях оптических характеристик элементов оптоэлектроники: лампы накаливания с вольфрамовой нитью и водородной лампы.

Цель работы. Практическое освоение методов измерения спектров источников излучения.

Задачи:

- ознакомиться с основными сведениями о спектрах источников излучения;
- изучить методику экспериментального нахождения спектров источников излучения;
- овладеть практическими навыками использования оборудования измерительных стендов;
- измерить и графически представить спектральные характеристики двух источников излучения.

Теоретическая часть

К оптическому диапазону обычно относят электромагнитное излучение с длинами волн (λ) от 10^{-3} мкм до 10^3 мкм. Весьма широкий оптический диапазон в свою очередь принято подразделять на ультрафиолетовую (УФ) область (от 10^{-3} до 0,4 мкм), видимую (от 0,4 до 0,76 мкм), инфракрасную (ИК) область (от 0,76 до 10^3 мкм). Эффективных источников, работающих в таком широком диапазоне, нет. В связи с этим, в зависимости от требуемого спектрального диапазона, используют различные источники излучения.

По виду спектральной характеристики источники излучения принято делить на следующие типы:

- источники со сплошным спектром, к которым относят нагретые тела в конденсированном (обычно твердом) состоянии;

- источники с полосовыми или линейчатыми спектрами. В таких источниках излучают разреженные газы, возбуждаемые потоком фотонов, электронов или электрическим полем, а также холодные твердые или жидкие люминофоры;

- источники смешанного типа, излучение которых наряду со сплошным спектром имеет отдельные выделяющиеся полосы или линии, например дуговые лампы высокого давления.

В сплошном спектре представлены все длины волн. Сплошные спектры обычно получают в результате свечения нагретых твердых или жидких тел. Количественной характеристикой спектрального распределения энергии нагретого тела является излучательная способность ($r_{\lambda T}$). Под излучательной способностью тела (спектральной плотностью потока излучения) понимают энергию (ΔW), излучаемую с единицы площади поверхности тела (S) за 1 секунду в узком интервале длин волн ($\Delta \lambda$), отнесенную к величине этого интервала:

$$r_{\lambda T} = \frac{\Delta W}{S t \Delta \lambda}. \quad (1.1)$$

Для размерности $r_{\lambda T}$ обычно используют внесистемные единицы: $[r_{\lambda T}] = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$.

Примеры спектров излучения при различных температурах для абсолютно черного тела, который считается идеальным тепловым излучателем, приведены на рисунке 1.1.

Как видно, рост температуры приводит к значительному увеличению излучательной способности источника и расширению его спектрального диапазона. Тепловые источники с температурой выше 6000 К могли бы явиться идеальными для диагностики широкого класса фотоприемников от УФ- до ИК-диапазона. Однако при технической реализации наиболее распространенным источником сплошного спектра является лампа накаливания. Поскольку максимальная температура нити накала находится около 3000 К, то она может быть успешно использована для инфракрасного и видимого диапазонов. Однако в коротковолновой области энергии излучения лампы накаливания недостаточно и для УФ-спектра требуются другие источники.

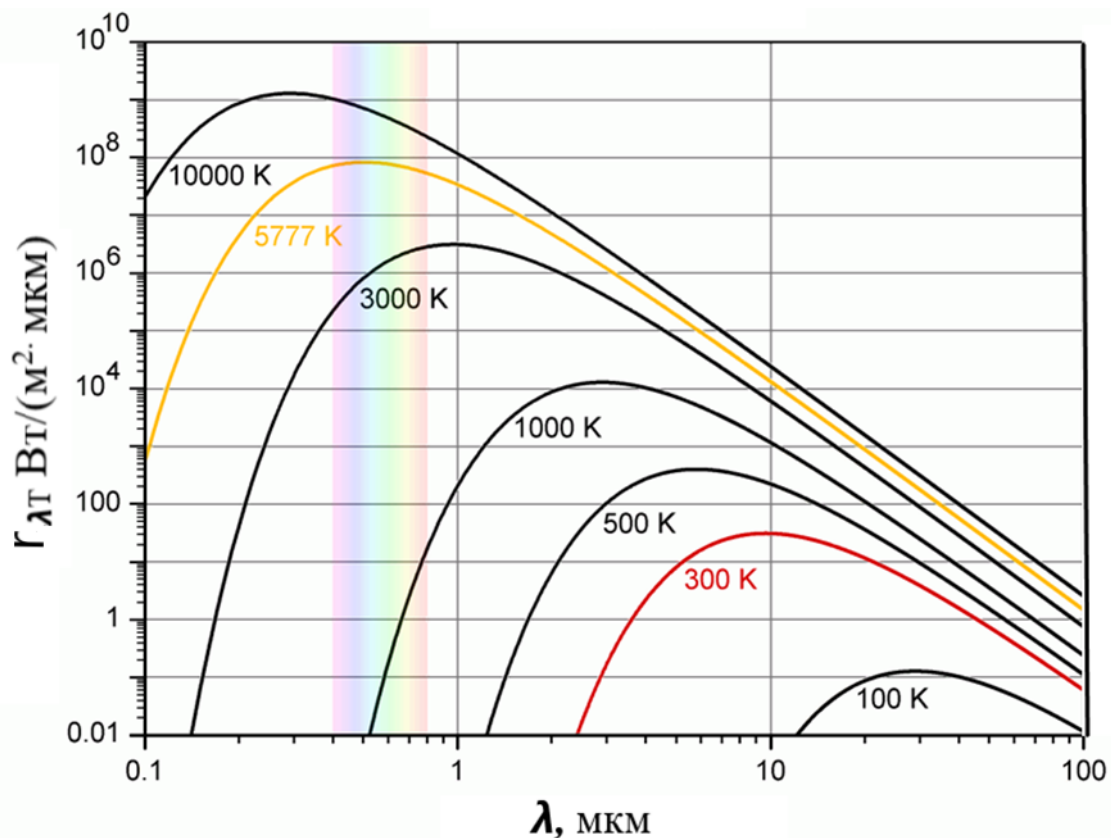


Рисунок 1.1. Излучательная способность абсолютно черного тела при различных температурах

Если источником излучения является светящийся газ или пары малой плотности, спектр такого источника будет иметь вид отдельных резких линий. Такие спектры называют линейчатыми. Разные пары и газы могут давать спектры, отличающиеся интенсивностью и длиной волны, а также их числом. Пример линейчатого спектра приведен на рисунке 1.2.

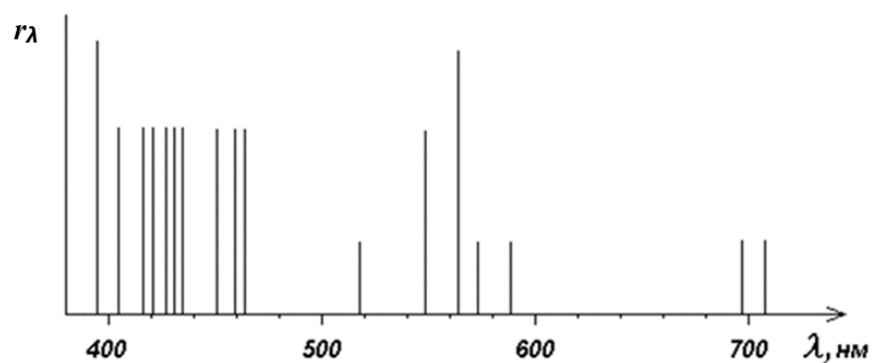


Рисунок 1.2. Спектр излучения аргона

Светодиоды обладают спектрами излучения в виде относительно узких полос, ширина которых составляет обычно 20–80 нм. Такое узкополосное излучение называют квазимонохроматическим. Примеры спектров излучения светодиодов приведены на рисунке 1.3.

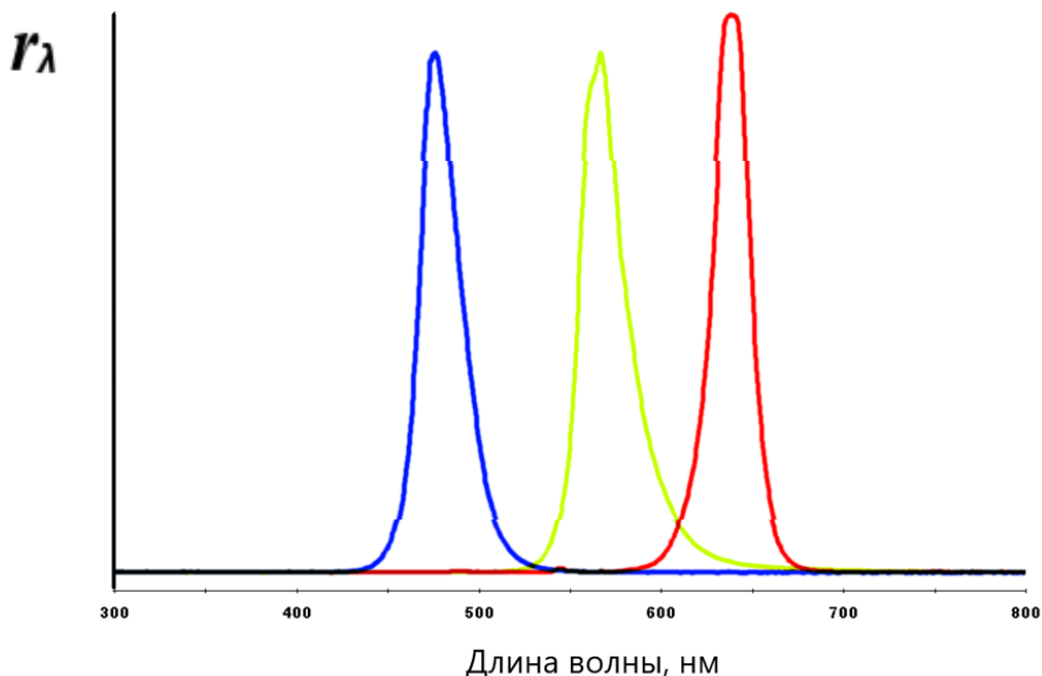


Рисунок 1.3. Спектры излучения светодиодов

Положение узких линий четко известно, и они могут быть использованы для градуировки спектральных приборов по длинам волн. В ряде случаев для этих целей можно использовать светодиоды, если не требуется высокая точность. Однако для энергетических измерений спектральной чувствительности фотоприемников такие источники малопригодны.

Если повышать давление светящегося пара или газа, то спектральные линии начинают расширяться, захватывая больший спектральный интервал. При очень больших давлениях (десятки МПа) линейчатый спектр постепенно переходит в сплошной, характерный для сжатых газов.

На рисунке 1.4 приведен спектр излучения дейтериевой лампы высокого давления. Как видно, высокая интенсивность излучения наблюдается в УФ-области, что делает целесообразным их применение для исследования спектральных характеристик фотоприемников в диапазоне коротких длин волн.

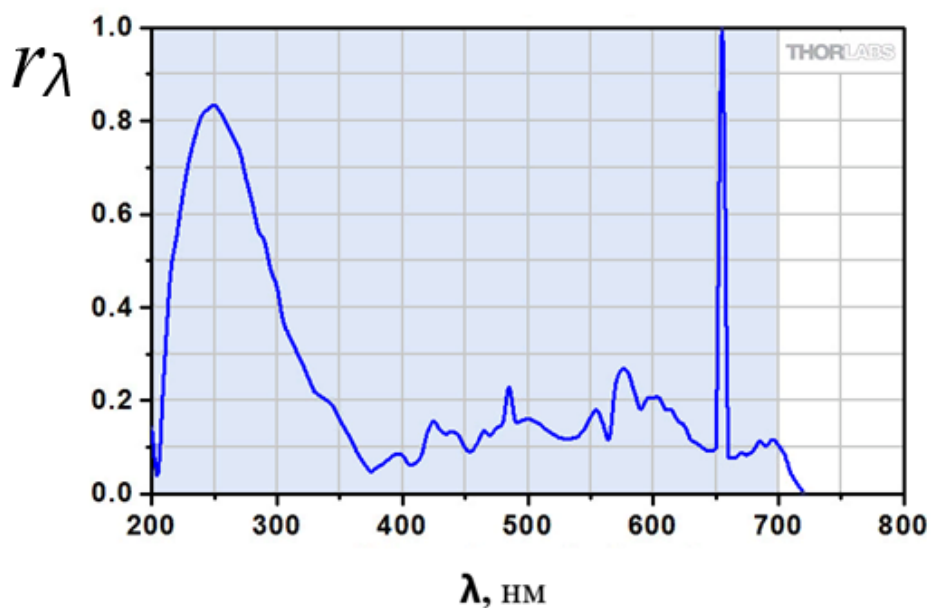


Рисунок 1.4. Спектр излучения дейтериевой лампы

В связи с индивидуальными характеристиками любого источника излучения, связанных с особенностями их конструкций и сильной зависимостью от режимов эксплуатации, возникает необходимость определения спектральной плотности излучения каждого источника излучения при их использовании в метрологических целях.

Описание установки

Стенд измерения спектральной чувствительности

Установка, используемая в данной работе для исследования спектральных характеристик источников излучения, представлена на рисунке 1.5.

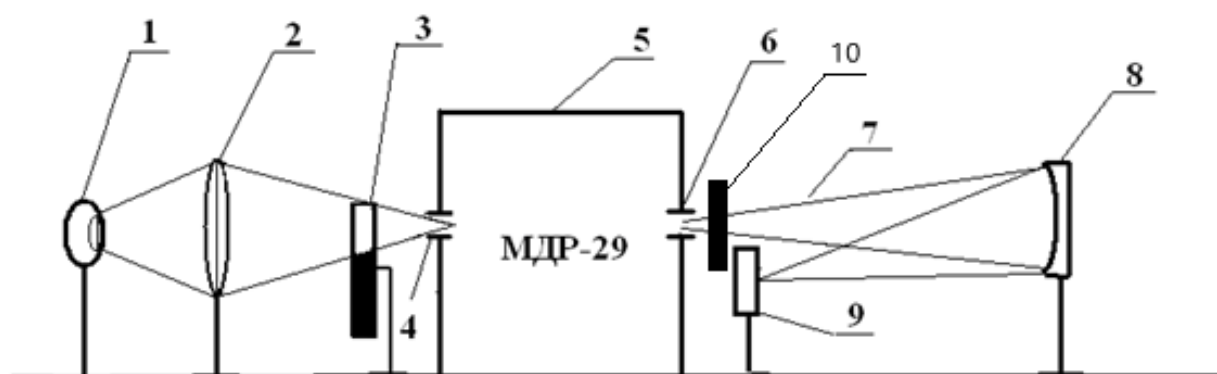


Рисунок 1.5. Стенд измерения спектральной чувствительности фотоприемников

Источник света 1 через фокусирующий элемент 2, модулятор 3, прерывающий световой поток с заданной частотой, освещает входную щель 4 монохроматора 5. На выходной щели устанавливается фильтр 10, соответствующий рабочему спектральному диапазону. Далее поток монохроматического света 7 попадает на отражающее вогнутое зеркало 8, с помощью которого фокусируется на фотоприемник 9.

Модулятор в данной схеме предназначен для преобразования непрерывного потока излучения в импульсный. Это делается для возможности последующей фильтрации полезного переменного сигнала от помех. Частота модуляции устанавливается в зависимости от вида используемого в установке фотоприемника (9). Если в качестве фотоприемника используется болометр, то в связи с его высокой инертностью частота низкая, около 10 Гц. Более высокая частота (800 Гц) устанавливаются для малоинерционных полупроводниковых фотоприемников.

Описание используемого в лабораторной работе монохроматора МДР-29

Внешний вид монохроматора МДР-29 представлен на рисунке 1.6.

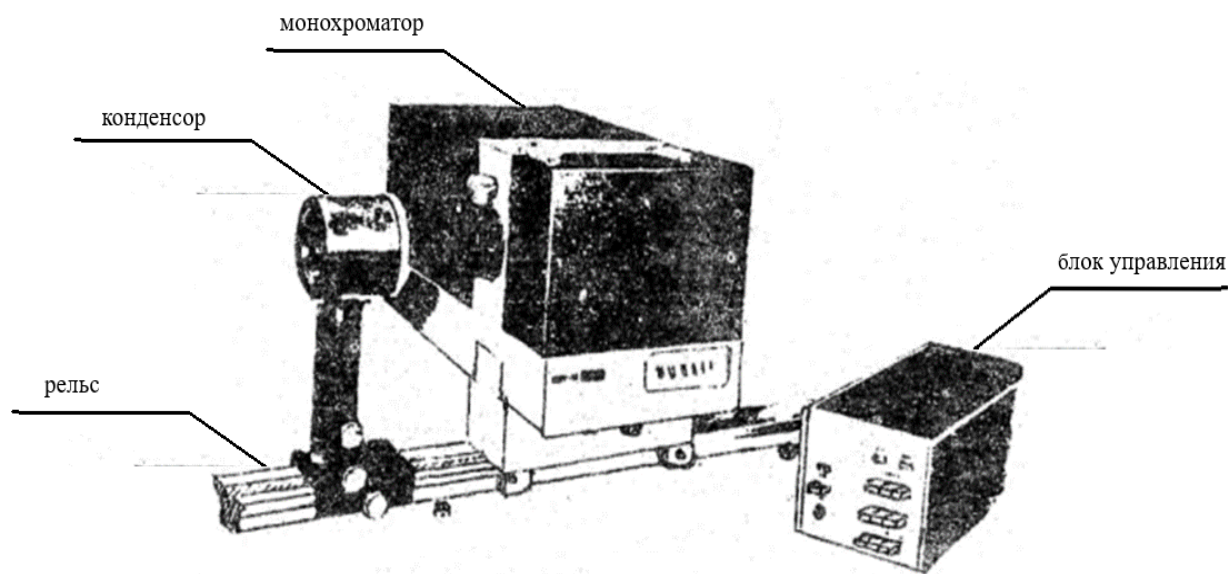


Рисунок 1.6. Монохроматор МДР-29

Технические данные монохроматора МДР-29:

Спектральный диапазон, нмот 200 до 25 000.

При работе в разных спектральных областях используются сменные дифракционные решетки, данные о которых приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Сменные дифракционные решетки монохроматора МДР-29

Число штрихов на миллиметр	1200 (II)	1200 (I)	600	300	150	75	37,5
Рабочая область, нм	200–500	350–1000	700–2000	1400–4000	2800–8000	5600–16 000	11 200–25 000
Область максимальной концентрации энергии, нм	250	500	1000	2000	4000	8000	20 000

Устройство и работа монохроматора

В состав прибора входят собственно монохроматор со сменными дифракционными решетками, блок управления, рельс, конденсор (рисунок 1.6). Оптическая схема монохроматора показана на рисунке 1.7.

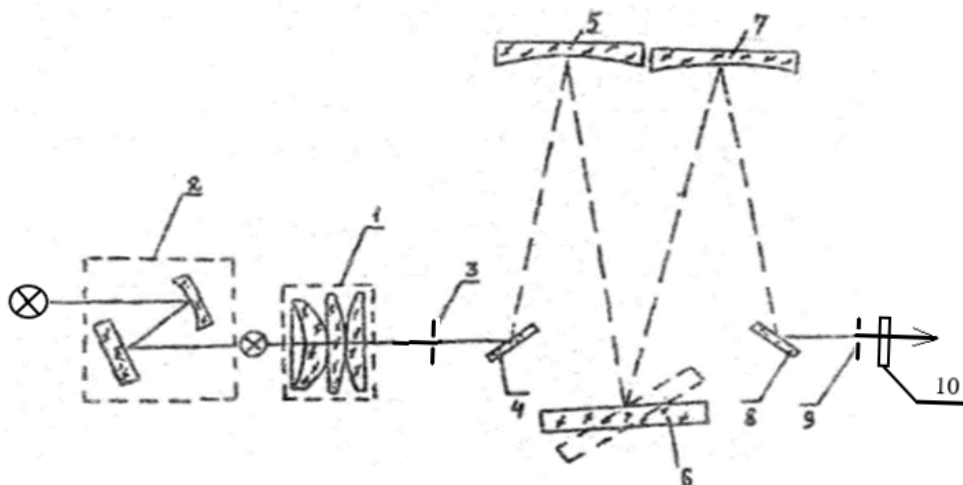


Рисунок 1.7. Оптическая схема монохроматора МДР-29

Источник света через конденсор 1 (или зеркальный осветитель 2) освещает входную щель 3. Поворотное зеркало 4 и параболический объектив 5 формируют параллельный поток световых лучей, направляемых на дифракционную решетку 6, которая поворачивается вокруг вертикальной оси с помощью шагового двигателя. Диспергированный свет параболическим объективом 7 и поворотным зеркалом 8 собирается в плоскости выходной щели 9. Размеры входной и выходной щелей влияют на энергию и монохроматичность выходного луча. Спектральный интервал длин волн светового потока $\Delta\lambda$ определяется параметрами монохроматора:

$$\Delta\lambda = l_0 \frac{d\lambda}{dl}, \quad (1.2)$$

где l_0 – ширина выходной щели, $\frac{d\lambda}{d\lambda}$ – обратная линейная дисперсия монохроматора.

С увеличением ширины щели растет энергия, однако при этом расширяется спектральный диапазон выходного излучения. Если не требуется выполнять тонкие спектральные измерения, то ширину входной и выходной щелей целесообразно устанавливать максимальную. Вместе с тем рекомендуется оценить значение $\Delta\lambda$ и сравнить его с шагом выполняемых измерений.

Дифракционная решетка монохроматора позволяет настроить устройство на определенную длину волны выходного излучения путем изменения угла, под которым свет падает на поверхность решетки.

Для срезания высших порядков спектра, накладывающихся на рабочую область, в комплекте монохроматора предусмотрены сменные светофильтры (10), работающие в следующих спектральных диапазонах:

0,36–0,6 мкм	0,6–1,0 мкм	1,0–1,5 мкм
1,5–2,5 мкм	2,0–3,2 мкм	3,2–5,3 мкм
5,3–9,3 мкм	9,3–15,8 мкм	15,8–25 мкм

Задание на работу

В данной работе нужно определить спектральные характеристики двух источников излучения: лампы накаливания и водородной лампы.

Для исследования спектральных характеристик излучателей используются два эталонных фотоприемника: фотонный кремниевый фотоприемник (фотодиод) ЛФТИ и металлический болометр марки БМК-3.

В диапазоне 0,36–1,0 мкм спектральная характеристика лампы накаливания снимается высокочувствительным кремниевым фотоприемником ЛФТИ. Спектральная характеристика эталонного приемника ЛФТИ известна (таблица Приложения 6). Значения $r_{\lambda T}$ лампы накаливания в произвольных единицах определяются из следующего выражения:

$$r_{\lambda T} = \frac{U_c}{S_3}, \quad (1.3)$$

где $r_{\lambda T}$ – спектральная плотность излучения лампы накаливания;

U_c – напряжение полученного сигнала;

S_3 – чувствительность эталонного фотоприемника.

Рассчитанная таким образом спектральная плотность излучения будет выражена в произвольных единицах ($r_{\lambda_{\text{Тпр}}}$). Такую характеристику удобно нормировать и представить ее в относительных единицах ($r_{\lambda_{\text{Тотн}}}$):

$$r_{\lambda_{\text{Тотн}}} = \frac{r_{\lambda_{\text{Тпр}}}}{r_{\lambda_{\text{Тпрmax}}}}. \quad (1.4)$$

Для больших длин волн ($\lambda > 1$ мкм) чувствительность этого приемника резко падает, что связано с шириной запрещенной зоны кремния, и дальнейшее его применение становится невозможным. В диапазоне 0,9–4,0 мкм измерения необходимо провести с использованием болометра. Так как болометр обладает равномерной чувствительностью во всем спектральном диапазоне, то его показания будут соответствовать спектральной плотности излучения источника света (выраженной в произвольных единицах):

$$r_{\lambda_{\text{Тпр}}} = U_c. \quad (1.5)$$

Для того, чтобы получить общую результирующую характеристику лампы накаливания, необходимо сшить оба участка характеристики (0,36–1,0 мкм) и (0,9–4,0 мкм). Для этого нужно найти коэффициент пересчета K :

$$K = \frac{U_{c(\text{фд})}}{U_{c(\text{бол})}}, \quad (1.6)$$

где $U_{c(\text{фд})}$ и $U_{c(\text{бол})}$ – сигналы, полученные на одинаковой длине волны для фотодиода и болометра соответственно, например 0,9 мкм, где обе характеристики пересекаются.

Все значения, полученные далее с помощью болометра, необходимо умножить на коэффициент K . Тогда результаты на участках спектральных диапазонов (0,36–1,0 мкм) и (0,9–4,0 мкм) будут находиться в одном масштабе. При смене оптических фильтров может изменяться их коэффициент пропускания. Это следует учитывать, используя корректирующие коэффициенты $K_{\text{ф}}$, определяемые отношением сигналов на граничных значениях спектрального диапазона двух соседних фильтров:

$$K_{\text{ф}1,2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (1.7)$$

Тогда суммарный коэффициент пересчета при смене фотоприемника и очередного фильтра составит $K_{\Sigma} = K \cdot K_{\text{ф}1,2} \cdot K_{\text{ф}2,3}$ и т. д.

Для исследования спектральной чувствительности фотоприемников в ультрафиолетовой области спектра в качестве источника излучения используется водородная лампа. Она излучает значительно большую

энергию в коротковолновом участке спектра по сравнению с лампой накаливания.

Измерения спектральной характеристики водородной лампы производятся только фотоприемником ЛФТИ в диапазоне 0,28–0,5 мкм.

Порядок выполнения работы

Определение спектральной характеристики лампы накаливания

1. Включить питание приборов.
2. Включить источник питания лампы накаливания.
3. С помощью магазина сопротивления, включенного последовательно с лампой накаливания, по измерительному прибору установить на лампе значение тока, указанного преподавателем.
4. На оптической скамье установить фотоприемник ЛФТИ.
5. Подключить фотоприемник к регистрирующему прибору, в качестве которого используется аналоговый селективный вольтметр.
6. С помощью пульта управления шаговым двигателем установить на монохроматоре хорошо наблюдаемое глазом значение длины волны ($\lambda \approx 0,5$ мкм).
7. Произвести визуальную фокусировку излучения на фотоприемник с решеткой монохроматора 1200 (I) штрихов на мм.
8. Включить модулятор с частотой 800 Гц.
9. Выходную и входную щели установить равными 4 мм.
10. Для срезания высших порядков спектра, налагающихся на рабочую область, необходимо при работе с монохроматором использовать сменные фильтры. Для данных измерений используются следующие их разновидности: 0,36...0,6; 0,6...1,0; 1,0...1,5; 1,5...2,5 мкм. После прохождения каждого поддиапазона фильтры следует менять. Необходимо записать показания вольтметра на границах поддиапазонов для расчета корректирующих коэффициентов K_f по выражению (1.7).
11. С помощью фокусирующего зеркала по показаниям аналогового селективного вольтметра и подключенного к его выходу осциллографа добиться максимальных сигналов. При грубой настройке полезно использовать сигналы осциллографа, отличающиеся высоким быстродействием. Точную настройку лучше производить по показаниям вольтметра.
12. С помощью ручек «частота грубо и плавно» подстроить полосу пропускания селективного вольтметра. В дальнейшем при измерениях

следует контролировать наличие максимума в показаниях вольтметра (лучше только с помощью ручки «плавно»).

13. Используя пульт управления шаговым двигателем, установить на монохроматоре длину волны 0,35 мкм.

14. Записать показания аналогового вольтметра.

15. Продолжить измерения до длины волны около 0,7 мкм с рекомендуемым шагом 0,05 мкм, не забывая по завершению каждого из поддиапазонов менять фильтр.

16. На длине волны 0,7 мкм необходимо поменять дифракционную решетку (на 600 штрихов/мм). При этом показания шкалы длин волн монохроматора увеличатся в 2 раза. Теперь для выбора длины волны 0,7 мкм необходимо установить счетчик на 0,35 делений. Также необходимо записать показания вольтметра при решетках 1200 и 600 штрих/мм на длине волны 0,7 мкм для расчета корректирующего коэффициента K_f аналогично пункту (10).

17. Продолжить измерения до 1 мкм с рекомендуемым шагом 0,1 мкм (что будет соответствовать интервалу 0,05 по шкале счетчика).

18. Вместо фотодиода установить на оптическую скамью болометр.

19. Частоту модулятора установить равной 10 Гц.

20. Подключить фотоприемник к вольтметру.

21. Произвести фокусировку излучения на приемную площадку болометра (только по показаниям аналогового прибора).

22. Продолжить измерения при тех же щелях и токах лампы накаливания, что и в предыдущих пунктах, в заданном спектральном диапазоне. Шаг измерений можно изменить относительно рекомендованных значений и выбирать его с целью получения около 20 точек, необходимых для построения графика. Не забывать о смене соответствующих фильтров.

Определение спектральной характеристики водородной лампы

1. Установить вместо лампы накаливания водородную лампу.

2. Включить лампу через специальный источник питания.

3. Установить частоту модулятора равной 800 Гц.

4. Установить на оптическую скамью фотоприемник ЛФТИ.

5. Выходную и входную щели установить равными 4 мм.

6. Поставить соответствующий фильтр.

7. Произвести фокусировку излучения на фотоприемник.

8. Установить на монохроматоре значение длины волны 0,28 мкм.

9. Произвести измерения в диапазоне 0,28–0,5 мкм с шагом 0,01 мкм при решетке 1200 (II) штрих/мм.

Пример рекомендуемой таблицы измерений:

λ , мкм	Решетка	Фильтр	U_c , мкВ	$K\phi$	K_Σ	$S_\circ$, А/Вт	$r_{\lambda T}$, пр. ед	$r_{\lambda T}$, отн. ед

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) схему измерительного стенда;
- 3) основные рабочие формулы;
- 4) таблицы полученных результатов;
- 5) график спектральной характеристики лампы накаливания в относительных единицах;
- 6) спектральную характеристику водородной лампы в диапазоне 0,28–0,5 мкм в относительных единицах.

Контрольные вопросы

1. Что такое спектральная характеристика источника излучения?
2. Какие виды фотоприемников целесообразно использовать в разных спектральных диапазонах?
3. Зачем в монохроматоре используются сменные оптические фильтры?
4. Поясните принцип действия рабочего стенда.
5. Почему при изменении тока лампы накаливания может происходить смещение максимума ее спектральной характеристики? Поясните, в каких случаях будет наблюдаться смещение максимума в длинноволновую или коротковолновую области спектра?
6. Какими преимуществами и недостатками обладают широкие щели монохроматора?
7. Чем интересен спектр водородной лампы для оптоэлектроники?
8. С какой целью в стенде используется модулятор?

Лабораторная работа 2

Измерение спектральной характеристики фотоприемника

Цель работы. Освоение метода измерения спектральной чувствительности полупроводниковых фотоприемников.

Теоретические сведения

Приемники можно разделить на две большие группы: биологические (глаз, кожный покров, растительность и др.) и физические, к которым относят устройства, преобразующие видимое, инфракрасное (ИК) или ультрафиолетовое (УФ) излучение в электрический сигнал.

Физические приемники излучения (ПИ) разделяются на два основных класса – фотоэлектрические (фотонные) и тепловые. Принцип действия фотоэлектрических ПИ основан на внешнем или внутреннем фотоэффекте. Все фотоэлектрические приемники являются селективными, т. е. их чувствительность зависит от частоты (или длины волны) излучения, падающего на приемник. Действие тепловых приемников основано сначала на преобразовании чувствительным элементом фотоприемника энергии оптического излучения в тепловую, а затем на регистрации повышения его температуры, обычно электрическими методами. Тепловые приемники неселективны.

Тепловые приемники. Известен ряд вариантов конструктивного исполнения тепловых фотоприемников. К наиболее распространенным относятся:

а) *болометры*, использующие изменение электрического сопротивления тонкой металлической или полупроводниковой пленки при нагреве излучением;

б) *термоэлектрические* – детекторы типа термопар, или термостолбиков, использующие эффект возникновения термо-ЭДС на контакте двух разнородных материалов;

в) *пироэлектрические* приемники, основанные на температурной зависимости вектора поляризации в пироэлектриках вблизи температуры Кюри.

Тепловые фотоприемники нашли применение в радиометрии, спектроскопии, в аппаратуре пеленгации, в системах астроориентации и других устройствах. Применение болометров обусловлено их сравнительной

простотой и высокой надежностью. Достоинством тепловых приемников является постоянство их чувствительности для разных длин волн, что может быть использовано для метрологических целей. Инертность тепловых приемников сравнительно велика. Типичные значения постоянной времени $\tau \approx 10\text{--}100$ мс, поэтому в системах передачи информации они не используются.

Фотонные приемники отличаются от тепловых более высокой чувствительностью и высоким быстродействием. Постоянная времени обычно менее 1 мкс. Фотонные приемники значительно шире используются в различных оптоэлектронных системах и приборах. Среди фотонных фотоприемников наиболее распространены:

- а) фоторезисторы, действие которых основано на явлении фотопроводимости;
- б) фотодиоды, использующие явление генерации фототока при освещении области вблизи р–n-перехода;
- в) фототранзисторы, в которых осуществляется усиление фототока, за счет чего повышается чувствительность фотоприемника.

Важнейшей характеристикой любого фотоприемника является чувствительность, под которой понимают отношение фотосигнала к падающему на него потоку излучения. Фотосигналы могут быть выражены в виде напряжения или тока. В связи с этим различают вольтовую или токовую чувствительность фотоприемника:

$$S_u = U/\Phi \text{ [B/Bm] } , \quad (2.1)$$

$$S_i = I/\Phi \text{ [A/Bm] } . \quad (2.2)$$

В зависимости от спектрального состава регистрируемого излучения различают **интегральную** и **монохроматическую** чувствительность. Интегральная чувствительность $S_{инт}$ – чувствительность фотоприемника к немонахроматическому излучению заданного спектрального состава, например к излучению абсолютно черного тела, нагретого до заданной температуры. Монохроматическая чувствительность S_λ – чувствительность фотоприемника к излучению на заданной длине волны λ .

Поскольку фотонные приемники реагируют именно на поток фотонов, то их спектральная характеристика всегда является селективной. Каждый фотодиод имеет предельную длинноволновую границу фоточувствительности, при которой энергия кванта становится равной ширине запрещенной зоны:

$$\begin{aligned}
h\nu &= E_g ; \\
\lambda &= \frac{hc}{E_g} ; \\
\lambda &= \frac{1,24}{E_g} ;
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

здесь λ будет выражена в мкм, если E_g подставить в эВ.

Примеры спектральных характеристик наиболее распространенных фотонных приемников представлены на рисунке 2.1.

Как видно, для каждой спектральной области оптимальным является свой фотоприемник. Следует отметить еще одну особенность фотонных приемников. Они эффективно работают в той области спектра, где энергия фотона существенно превышает kT (по обычно принятому критерию Мооса $h\nu > 20 kT$). В случае, когда тепловая энергия становится сравнимой с энергией фотона $h\nu$, тепловое возбуждение действует активнее оптического и эффективность фотонного приемника резко падает. Поэтому фотонные приемники, предназначенные для работы в области $\lambda \geq 3$ мкм, как правило, требуют охлаждения тем большего, чем больше рабочая длина волны.

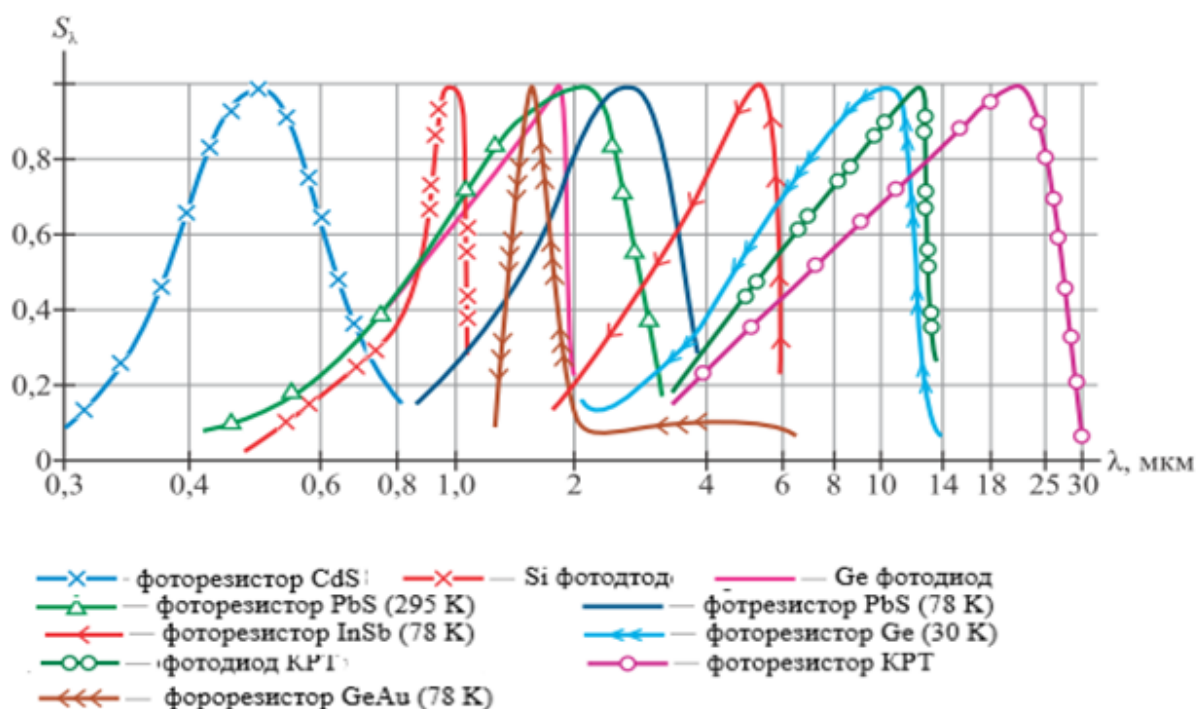


Рисунок 2.1. Спектральные характеристики фотонных приемников

Наиболее распространенным типом фотонных приемников является фотодиод (ФД). Рассмотрим принцип действия фотонного фотоприемника на

его примере. На рисунке 2.2 представлена структура фотодиода, его обозначение и типичная ВАХ.

Основным элементом фотодиода является р–n-переход. При его освещении происходит генерация электронно-дырочных пар. Электрическое поле перехода разделяет неравновесные носители заряда. Ток, образованный фотоносителями, совпадает по направлению с обратным током р–n-перехода. Фотоприемник может работать в трех режимах:

- 1 – режим генерации фотоЭДС (вентильном);
- 2 – режиме короткого замыкания;
- 3 – фотодиодном.

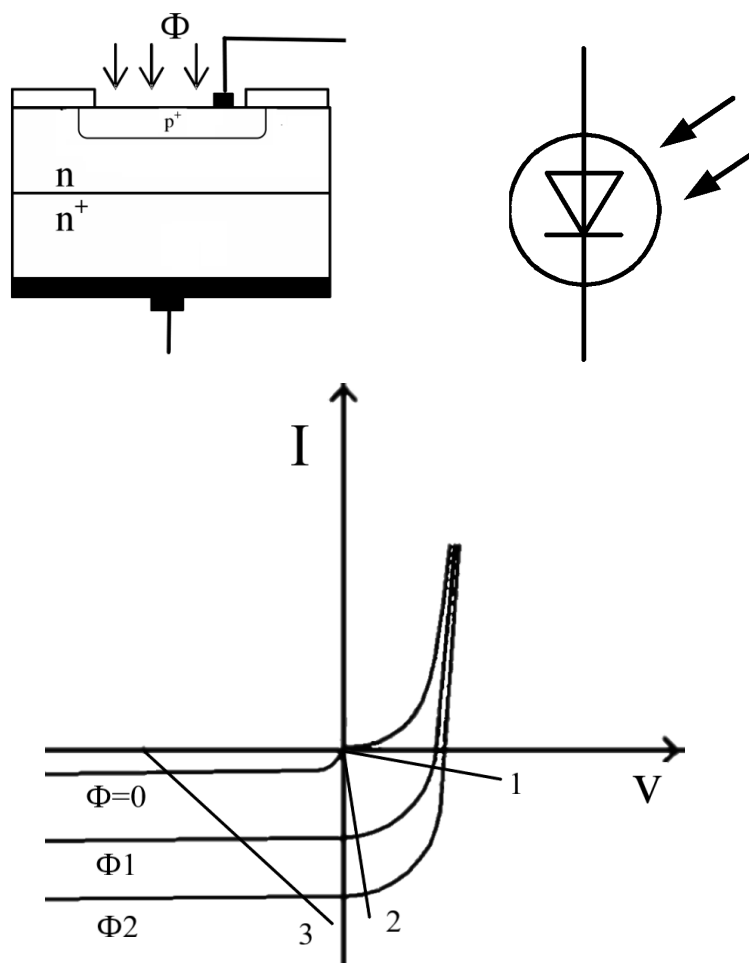


Рисунок 2.2. Структура, обозначение и ВАХ фотодиода

Режимы, близкие к указанным, обозначены на рисунке 2.2. В первом случае р–n-переход используется в качестве источника ЭДС, во втором – как источник тока, в третьем реализуется классический фотодиодный режим. Для его реализации фотодиод смещается внешним источником ЭДС в обратном

направлении. Важным преимуществом фотодиодов является линейная зависимость фототока от интенсивности света при работе в режимах 2 и 3 в широком диапазоне освещенностей. Толщина освещаемой области фотодиодов выполняется меньшей по сравнению с диффузионной длиной неосновных носителей заряда. В этом случае большая часть носителей, генерируемых светом вблизи поверхности, доходит до р–n-перехода.

Чувствительность фотодиода определяется следующим выражением:

$$S_{\lambda} = (1 - R) q \eta k \lambda / h c , \quad (2.3)$$

где R – коэффициент отражения;

q – заряд электрона;

η – квантовый выход фотоэффекта;

k – коэффициент собирания носителей заряда;

λ – длина волны;

h – постоянная Планка;

c – скорость света.

Если в фотодиоде есть защитное окно, то необходимо еще учесть коэффициент пропускания окна.

Монохроматическая чувствительность S_{λ} зависит от длины волны и является важнейшей характеристикой фотоприемника. Проведение измерений таких характеристик с использованием абсолютных единиц оказывается технически сложным из-за трудностей измерения падающего на фотоприемник светового потока. В связи с этим обычно измерения сначала проводят в произвольных единицах $S_{\lambda \text{ пр}}$, а затем строят характеристику в относительных единицах:

$$S_{\lambda \text{ отн}} = S_{\lambda \text{ пр}} / S_{\lambda \text{ пр max}} . \quad (2.4)$$

Тогда максимальное значение $S_{\lambda \text{ отн}}$ всегда будет равно единице. Схематическое изображение типичной спектральной характеристики приведено на рисунке 2.3.

Иногда в технических характеристиках фотоприемников приводят не полный вид спектральной зависимости, а в качестве параметров дают значения трех длин волн: положение максимума (λ_{max}), коротковолновую границу чувствительности (λ') и длинноволновую границу (λ''). Значения λ' и λ'' принимают на уровне 0,1 от максимального значения.

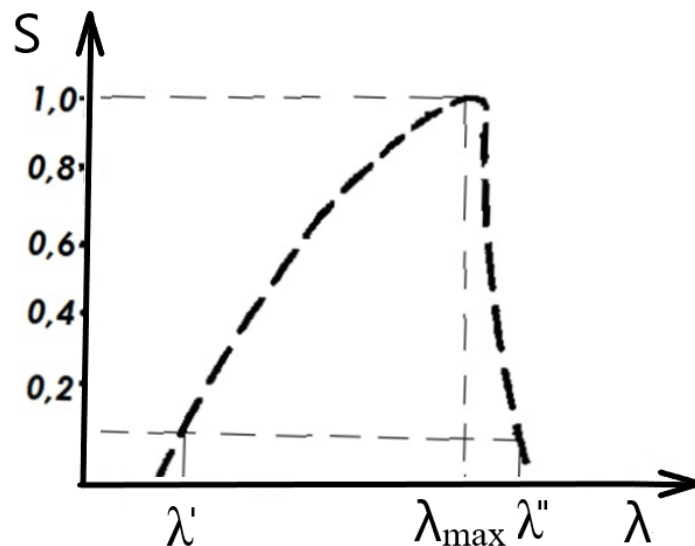


Рисунок 2.3. Типичная спектральная характеристика фотоприемника

В общем случае определение спектральной чувствительности – это последовательное измерение на разных длинах волн реакции фотоприемника на монохроматическое излучение известной мощности. Например, для вольтовой чувствительности:

$$S_{\lambda} = U_{\lambda} / \Phi_{\lambda}, \text{ при этом } \Phi_{\lambda} \approx r_{\lambda T}, \quad (2.5)$$

где S_{λ} – монохроматическая чувствительность на заданной длине волны;

U_{λ} – сигнал исследуемого фотоприемника;

Φ_{λ} – мощность монохроматического потока, падающего на фоточувствительный элемент фотоприемника.

Зависимость мощности светового потока от длины волны должна быть исследована заранее (лабораторная работа № 1).

Поскольку сигналы фотонных приемников излучения пропорциональны потоку фотонов, а не падающей энергии, то удобной для анализа эффективности фотоприемника является спектральная характеристика, построенная для равного числа падающих квантов.

Поток квантов (n_{ϕ}) может быть рассчитан как отношение потока энергии (Φ) к энергии одного кванта ($h\nu$):

$$n_{\phi} = \Phi / h\nu = \Phi \cdot \lambda / h \cdot c, \quad (2.6)$$

где c – скорость света, h – постоянная Планка.

Тогда для чувствительности, выраженной в произвольных единицах, к равному потоку падающих квантов получим:

$$S_{\lambda \text{ фот}} \sim U_{\lambda} \cdot \lambda / \Phi_{\lambda}. \quad (2.7)$$

Обычно эту характеристику принято также строить в относительных единицах:

$$S_{\lambda \text{ фот отн}} = S_{\lambda \text{ фот}} / S_{\lambda \text{ фот max}}. \quad (2.8)$$

Описание установки

Схема установки для измерения спектральной чувствительности приведена на рисунке 2.4. Измерительная установка включает в себя следующие основные компоненты:

1 – источник, обладающий широким спектром излучения, содержащим длины волн, необходимые для исследования чувствительности фотоприемника;

2 – фокусирующий элемент, обеспечивающий фокусировку потока излучения на входную щель монохроматора (4);

3 – оптический модулятор, представляющий собой диск с прорезями, позволяющий прерывать поток излучения с заданной частотой;

4 – входная щель монохроматора;

5 – монохроматор, обеспечивающий выделение требуемого участка спектра источника излучения;

7 – зеркальный объектив, в фокусе которого расположена выходная щель (6) и направляющий излучение через оптический фильтр (9) на исследуемый фотоприемник (8).

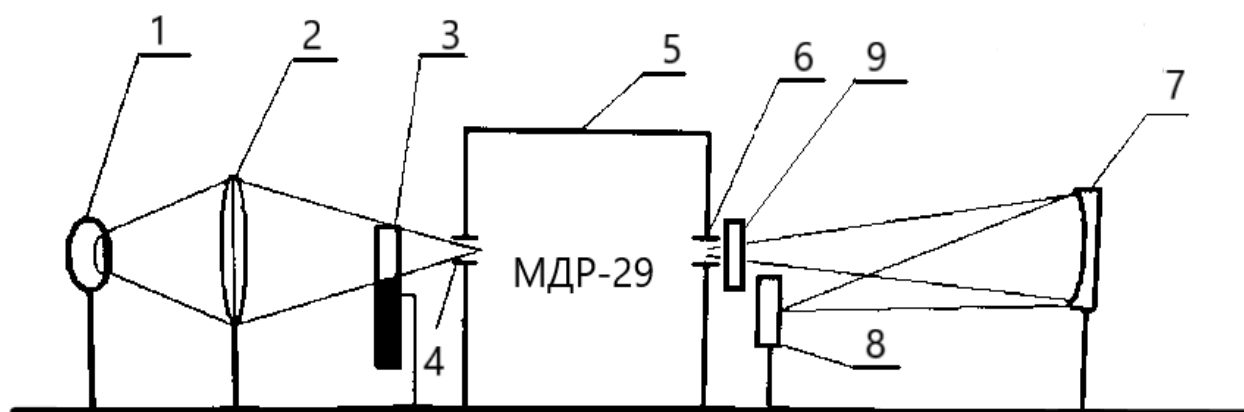


Рисунок 2.4. Структурная схема установки для измерения спектральной чувствительности: 1 – источник света; 2 – фокусирующий элемент; 3 – модулятор; 4 – входная щель монохроматора; 5 – монохроматор МДР-29; 6 – выходная щель; 7 – вогнутое зеркало; 8 – фотоприемник; 9 – оптический фильтр

Методические указания к выполнению работы

1. Установить фотоприемник в измерительную колодку.
2. При остановленном модуляторе около выходной щели расположить лист белой бумаги и визуально выбрать яркую спектральную линию на выходе монохроматора.
3. Используя подстроечные элементы зеркала (7), сфокусировать изображение щели на чувствительной площадке фотоприемника.
4. Включить модулятор. Установить на монохроматоре минимальное значение длины волны, при котором уровень сигнала более чем в 3 раза превышает уровень шума.
5. Провести измерения сигналов при различных длинах волн. Измерения проводить до максимального значения λ , при котором полезный сигнал в три раза превышает шумовой.
6. Рекомендуется выбирать значения длин волн, соответствующее таблице градуировки источника излучения. Дифракционные решетки и оптические фильтры должны выбираться в соответствии с техническими требованиями монохроматора.
7. Данные занести в таблицу. Рекомендуется приведенная ниже форма таблицы.

Пример записи данных и итога обработки полученных результатов:

Дата _____ . Ток накала лампы _____ .

Ширина входной щели _____ мм. Ширина выходной щели _____ мм.

Таблица для записи экспериментальных результатов:

λ , мкм	$r_{\lambda T}$, пр. ед.	Uc	K коэф. пересчета при смене решетки или светофильтра	$Uc \cdot K$	S_{λ} пр. ед.	S_{λ} отн. ед.	$S_{\lambda \text{ фот}}$ пр. ед.	$S_{\lambda \text{ фот}}$ отн. ед.

Требования к отчету

Отчет должен включать в себя:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) схему измерительной установки;

- 4) таблицу экспериментальных данных;
- 5) график спектральной чувствительности фотоприемника для энергетических единиц;
- 6) график спектральной чувствительности фотоприемника для равного потока падающих квантов.

Контрольные вопросы

1. Что называется чувствительностью фотоприемника?
2. Чем отличается вольтовая чувствительность от токовой? Как, зная токовую чувствительность, определить вольтовую?
3. Что такое интегральная и спектральная характеристика чувствительности?
4. Объясните устройство стенда для измерения спектральной чувствительности. Какое назначение у модулятора, монохроматора?
5. Какие требования предъявляются к источнику излучения?
6. Почему принято строить спектральные характеристики в относительных единицах?

Лабораторная работа 3

Исследование диаграммы направленности фотоприемника

Введение

Диаграмма направленности (ДН) отражает зависимость чувствительности фотоприемника от направления на источник сигнала и является одной из важных характеристик прибора. Обычно она представляет собой графическое изображение зависимости чувствительности от угла между данным направлением и нормалью к поверхности входного окна фотоприемника. В некоторых случаях, особенно при симметричной характеристике, может использоваться как параметр, отражающий ширину диаграммы, угол (2β), при котором чувствительность снижается на 3 дБ (составляет половину от ее максимального значения).

Диаграмма направленности определяется конструкцией фотоприемника, наличием линз, оптическими свойствами полупроводниковых материалов и защитных покрытий. В зависимости от решаемых технических задач требуются фотоприемники как с широкими ДН (например, для обзорных устройств), так и с узкими ДН, обеспечивающими повышение чувствительности и помехозащищенности устройства.

Цель работы. Знакомство с устройством высокоточного гониометра ГС-5, получение навыков измерения диаграммы направленности фотоприемников, исследование диаграммы направленности заданного фотодиода, графическое представление данных, определение угловой ширины диаграммы (2β).

Описание экспериментальной установки

Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рисунке 3.1. На подвижной части 2 гониометра 3 установлен излучатель оптического сигнала. В качестве излучателя сигнала для видимого и ближнего инфракрасного диапазона используется полупроводниковый светодиод, а для среднего инфракрасного диапазона – лампа накаливания. С целью повышения помехоустойчивости оптический сигнал модулируется по интенсивности. Для этого в качестве источника питания светодиода используется генератор сигналов с рекомендуемой частотой около 1 кГц. В случае лампы накаливания используется механический прерыватель светового потока. Сигнал регистрируется селективным микровольтметром 5.

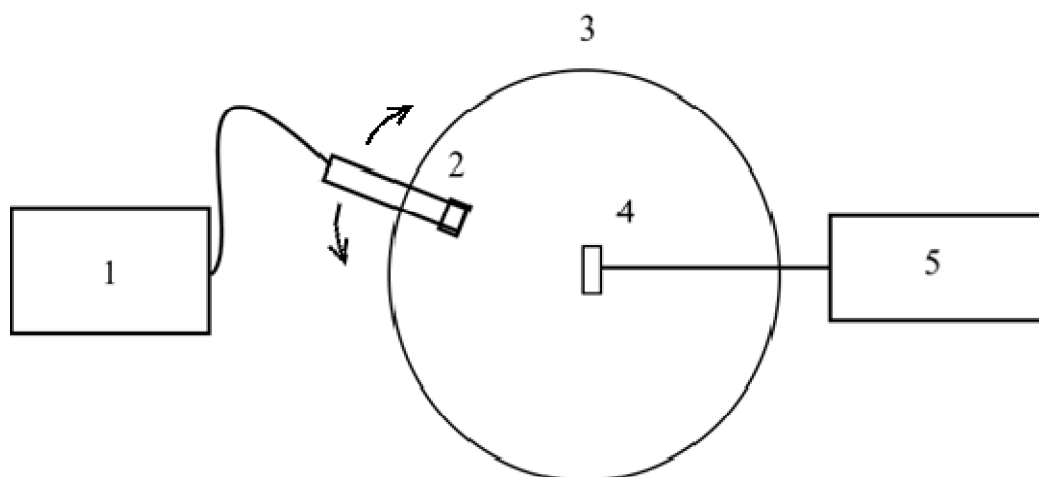


Рисунок 3.1. Схема установки: 1 – источник питания излучателя; 2 – излучатель; 3 – гониометр; 4 – фотодиод; 5 – регистратор фотосигнала

Устройство гониометра

Основной частью установки является гониометр. Гониометр состоит из массивного основания 24 (рисунок 3.2) с вертикальной колонкой 28, коллиматором 3 и осевым устройством с алидадой 19 (вращающаяся часть угломерных инструментов), на которой расположена зрительная труба 14. Последнюю, вместе с алидадой, можно вращать вокруг вертикальной оси прибора вручную или микрометрическим винтом 15 (после закрепления алидады зажимным винтом 23).

Зрительная труба и коллиматор имеют внутреннюю фокусировку, осуществляемую с помощью маховичков 4, 13 и одинаковые объективы 16, 14. Для регистрации положения установок трубы снабжены фокусировочными отсчетными шкалами. Наклон коллиматора и зрительной трубы к горизонтальной оси изменяется юстировочными винтами у массивного основания.

На верхней части вертикальной оси гониометра установлен предметный столик 8 (верхняя часть), свободно вращающийся вручную, а после скрепления с нижней частью зажимным винтом 31 он может вращаться вместе с лимбом относительно алидады. На столике размещается колодка для установки фотоприемника.

Винтом 29 столик прижимается к центральной неподвижной оси прибора и тогда поворот его в небольших пределах осуществляется микрометрическим винтом 30.

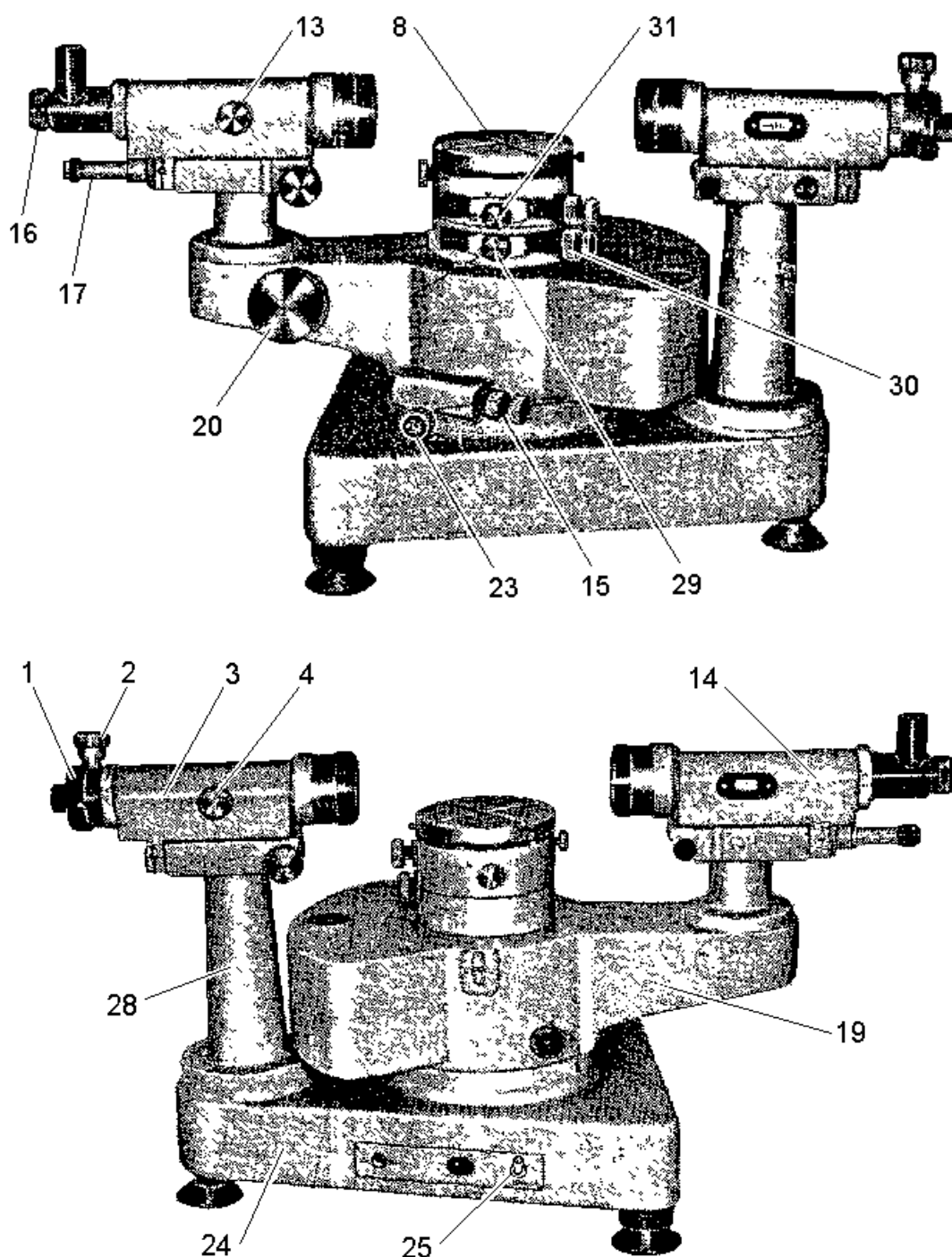


Рисунок 3.2. Гониометр

Отсчет угла производится по стеклянному лимбу. Лимб посажен на вертикальную ось прибора и фрикционно соединен с нижней частью столика. Лимб имеет шкалу с ценой деления $20'$, оцифрованную через каждый градус от 0° до 359° . Лимб можно повернуть относительно алидады и столика нажимным маховичком 21 (рисунок 3.3).

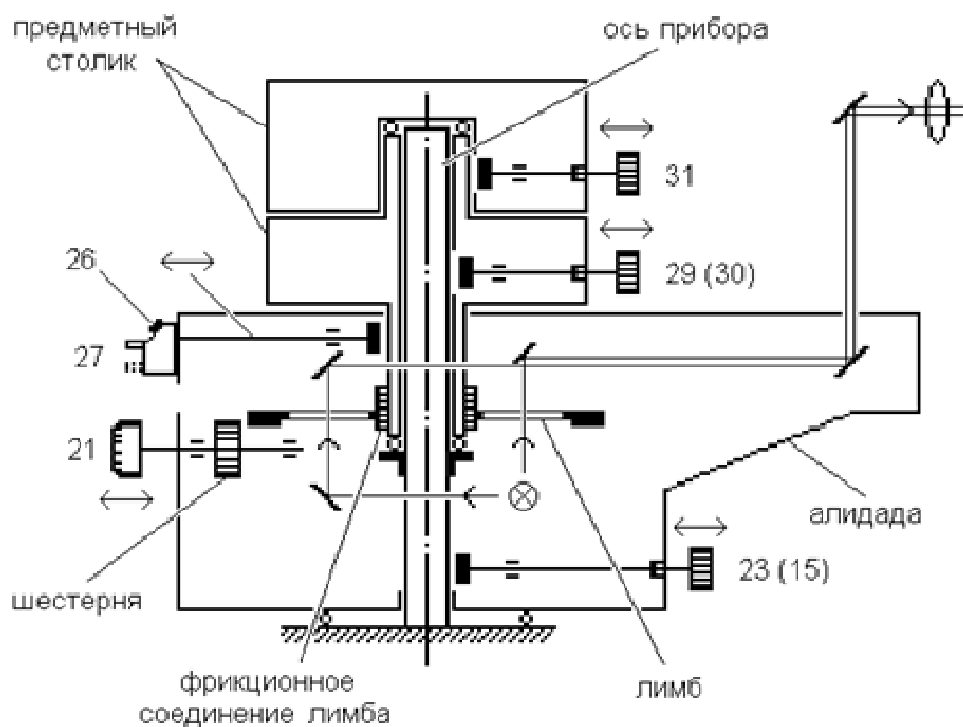


Рисунок 3.3. Упрощенная механическая схема гониометра

Шкалу лимба можно наблюдать через окуляр отсчетного устройства *17* при включенном освещении прибора (выключатель *25*). Оптическая схема отсчетного устройства собрана так, что через окуляр можно наблюдать изображение штрихов двух диаметрально противоположных участков лимба, причем одно изображение прямое, а другое обратное (рисунок 3.4). Кроме того, оптическая схема позволяет перемещать эти изображения друг относительно друга, оставляя в покое как лимб, так и алидаду со зрительной трубой. Это перемещение измеряется при помощи оптического микрометра, цена деления шкалы которого равна $1''$. При нажатии рычажка *27* (рисунок 3.3) происходит соединение алидады со столиком (и лимбом). В этом случае при вращении алидады шкала лимба в окуляре остается неподвижной. Отключается механизм сцепки нажатием кнопки *26*.

Снятие отсчета угла на гониометре

Отсчет направлений, определяемых гониометром, производится с помощью отсчетного устройства *17*, расположенного ниже зрительной трубы. Оптическая схема отсчетного устройства собрана так, что через его окуляр можно наблюдать шкалу лимба, связанного с поворотом зрительной трубы (или нижней частью предметного столика). Шкала подсвечивается лампочкой, включаемой тумблером *25*, расположенным в нижней части

основания прибора. Резкость изображения шкалы регулируется вращением оправы окуляра отсчетного устройства 17.

Поле зрения отсчетного устройства приведено на рисунке 3.4 и представляет собой два окна.

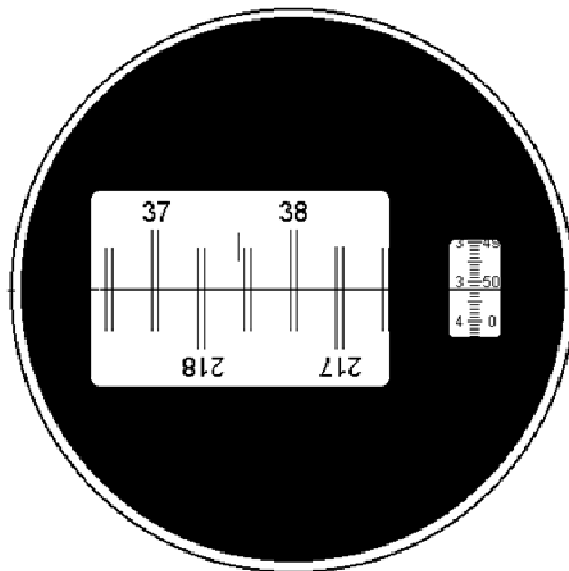


Рисунок 3.4. Поле зрения отсчетного микроскопа

В левом (большом) окне наблюдаются изображения диаметрально противоположных участков лимба с делениями в виде двойных штрихов (биштрихов) и отсчетный вертикальный индекс. Это окно служит для отсчета градусов и десятков минут.

В правом (маленьком) окне видны деления шкалы оптического микрометра и горизонтальный индекс (линия). Оно служит для отсчета единиц минут (левая часть шкалы) и секунд (правая часть шкалы).

Перед снятием отсчета необходимо совместить верхнюю и нижнюю шкалы по биштрихам с помощью маховика 20 (рисунок 3.2).

Число градусов (по верхней шкале) будет равно ближайшему числу **слева** от вертикального индекса (в данном случае 37°).

Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между биштрихом, соответствующим найденному числу градусов, и биштрихом перевернутого числа на нижней шкале, которое оканчивается на такую же цифру, как и найденное число градусов. На рисунке это 37° и перевернутое 217° (в данном случае 40°).

Число единиц минут отсчитывается по шкале правого окошка по левому вертикальному ряду цифр. Выбирается та, которая находится выше неподвижной горизонтальной линии ($3'$).

Число секунд отсчитывается в том же окне по правому ряду чисел относительно горизонтальной линии (52").

Положение, показанное на рисунке 3.4, соответствует отсчету $37^{\circ}43'52''$.

Порядок выполнения измерений

1. Включите гониометр тумблером 25 «Сеть» (рисунок 3.2). Вращением оправы окуляра 16 добейтесь резкого изображения отсчетного перекрестия в поле зрения окуляра.

2. Установите фотодиод в измерительной колодке. Выберите некоторую ориентацию корпуса фотодиода, например условно 0 градусов.

3. Установите на зрительной трубе источник излучения, в качестве которого для видимого и ближнего инфракрасного диапазона можно использовать светодиод, а для среднего инфракрасного диапазона – лампу накаливания с механическим модулятором.

4. Включите источник излучения и расположите его примерно на оси диаграммы направленности фотодиода.

5. Включите селективный вольтметр. Настройте ручками «грубо» и «точно» частоту для получения максимального уровня выходного сигнала. Если сигналы достаточно большие, то для селективного микровольтметра можно использовать режим «широкая полоса».

6. Перемещая трубу 14, найдите положение оси диаграммы направленности фотодиода, которое соответствует максимальному значению фотосигнала. Произведите отсчет угла и данные занесите в таблицу.

7. Перемещая трубу 14 сначала в одну, а затем в другую сторону, найдите углы, при которых величина фотосигнала уменьшается в 10 раз относительно максимальной.

8. Выберите шаг задания углов для исследования диаграммы направленности, исходя из требования получения около 20 экспериментальных точек.

9. Проведите измерение диаграммы направленности (с выбранным шагом изменения углов) от минимального значения сигналов с одной стороны через максимум до минимального значения сигналов с другой стороны. Данные занесите в таблицу.

10. Измените ориентацию корпуса фотодиода, повернув измерительную колодку на 90 градусов относительно первоначального положения.

11. Проведите измерение диаграммы направленности в перпендикулярной плоскости (пункты 6–9).

12. Постройте диаграммы направленности фотодиода в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в линейном масштабе и в угловых координатах. Диаграммы следует построить в относительных единицах: U/U_{max} .

13. Определите по графикам поле зрения фотоприемника на уровне $U = 0,5 U_{max}$. Для двух взаимно перпендикулярных плоскостей.

14. Дайте заключение относительно симметричности диаграммы направленности.

Исследование диаграммы направленности фотодиода

Тип фотодиода _____ Дата измерения _____

Примерная форма таблицы для записи экспериментальных результатов:

φ , град.	$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{max}$, град.	U, мВ	U/U_{max}

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) схему установки;
- 4) таблицу экспериментальных данных;
- 5) диаграммы направленности фотодиода для двух взаимно перпендикулярных плоскостей в линейных и угловых координатах.

Контрольные вопросы

1. Что называется диаграммой направленности фотоприемника?
2. Почему для фотоприемников среднего инфракрасного диапазона целесообразно использовать в качестве источника сигнала лампу накаливания?
3. С какой целью применяется механический модулятор?
4. Какие причины могут вызвать несимметричность диаграммы направленности?
5. Почему принято строить характеристики в относительных единицах?

Лабораторная работа 4

Определение токовой чувствительности фотоприемников

Введение

Чувствительность относится к числу важнейших параметров фотоприемников. В общем случае под чувствительностью фотоприемника (S) понимается отношение измеренной электрической величины на выходе фотоприемника, вызванного падающим на него потоком излучения, к величине этого потока.

В зависимости от спектрального состава падающего излучения различают монохроматическую (S_λ) и интегральную ($S_{инт}$) чувствительности фотоприемника. Во втором случае источник излучения должен иметь заданный спектральный состав.

В зависимости от характера изменения величины падающего на фотоприемник излучения различают статическую ($S_{ст}$), дифференциальную (S_d) и импульсную ($S_{имп}$) чувствительности:

- статическая чувствительность определяется как отношение значений измеряемого параметра фотоприемника и потока излучения, падающего на фотоприемник. При этом поток излучения может быть как модулированным, так и немодулированным. Это наиболее часто используемый вид чувствительности;

- дифференциальная чувствительность определяется как отношение малых приращений (на фоне больших потоков) измеряемого параметра фотоприемника и потока излучения. Применяется для нелинейных фотоприемников;

- импульсная чувствительность определяется как отношение амплитудных значений электрической величины на выходе фотоприемника и импульсного потока излучения заданной формы.

Обычно в качестве (информационной) электрической величины на выходе фотоприемника выступает ток или напряжение фотосигнала. Соответственно, в качестве параметра чувствительности используется токовая (S_I) или вольтовая (S_U) чувствительность фотоприемника.

Таким образом, определение чувствительности фотоприемников заключается в измерении информационной электрической величины на его выходе при воздействии оптического излучения с известной интенсивностью и заданной спектральной характеристикой.

Необходимая спектральная характеристика излучения обеспечивается использованием специально для этого предназначенных видов источников излучения. В зависимости от области спектральной чувствительности фотоприемника ГОСТ 17772-88 рекомендует применять следующие источники излучения:

- лампы накаливания типа СИС или РН при цветовой температуре тела накаливания $T_C = (2856 \pm 100) \text{ К}$;
- полный излучатель – абсолютно черное тело (АЧТ) – с температурой полости $T = (500 \pm 2) \text{ К}$ или $T = (1000 \pm 5) \text{ К}$.

Указанным стандартом допускается применение АЧТ и с другими температурами полости (например, $100 \text{ }^\circ\text{C}$, $300 \text{ }^\circ\text{C}$ или 800 К), если это установлено ТУ на конкретный фотоприемник.

Интенсивность воздействующего на фотоприемник оптического излучения определяется одним из двух способов:

- расчетным;
- измерением интенсивности излучения в плоскости расположения приемной площадки фотоприемника стандартным средством измерения (СИ).

Расчетный способ применяется при использовании в качестве излучателя аттестованного источника излучения (например, светоизмерительной лампы) или АЧТ.

Для ламп накаливания падающий на фотоприемник поток излучения ($\Phi_{\text{э}}$) рассчитывается по формуле

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{I \cdot A}{l^2}, [\text{лм}], \quad (4.1)$$

где I – сила света лампы (значение приведено в «Свидетельстве о поверке»), кд;

A – площадь приемной площадки фотоприемника, м^2 ;

l – расстояние между центром тела накала источника излучения и плоскостью приемной площадки фотоприемника, м.

Для АЧТ поток рассчитывается по формуле:

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{\sigma \cdot (\varepsilon_1 \cdot T_1^4 - \varepsilon_0 \cdot T_0^4) \cdot F \cdot A}{\pi \cdot l^2}, [\text{Вт}], \quad (4.2)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

ε_1 и ε_0 – коэффициенты излучения полости АЧТ и диска модулятора соответственно;

T_1 и T_0 – температура излучающей полости АЧТ и модулятора соответственно, К;

l – расстояние между диафрагмой АЧТ и плоскостью приемной площадки фотоприемника, м;

F – площадь отверстия диафрагмы АЧТ, м²;

A – площадь приемной площадки фотоприемника, м².

Формулы (1) и (2) применимы только в случае отсутствия в оптической схеме каких-либо оптических элементов (линз, зеркал, фильтров, ослабителей и др.), а также если l не менее чем в 5 раз превышает максимальный из линейных размеров излучателя. При выполнении указанных условий методическая погрешность использования формул (4.1) и (4.2) не превышает 1%. Чувствительность фотоприемника рассчитывается:

– если информационной электрической величиной на выходе фотоприемника является ток фотосигнала (I_C) по формуле:

$$S_I = \frac{I_C}{\Phi_{\Sigma}}, \quad (4.3)$$

– если информационной электрической величиной на выходе фотоприемника является напряжение фотосигнала (U_C):

$$S_U = \frac{U_C}{\Phi_{\Sigma}}. \quad (4.4)$$

При измерении чувствительности серийно выпускаемых фотоприемников часто применяется метод замещения (метод сравнения). В качестве меры (контрольного образца) в этом случае используется фотоприемник того же типа, что и испытуемые. В этом случае чувствительность испытуемого фотоприемника определяется как произведение чувствительности контрольного образца на отношение выходной электрической величины испытуемого приемника и контрольного образца. Например, если выходной информационной электрической величиной фотоприемника и меры является ток фотосигнала, а измеряемой величиной – токовая чувствительность фотоприемника, то последняя определяется по формуле:

$$S_I = S_{IKO} \cdot \frac{I_C}{I_{KO}}, \quad (4.5)$$

где S_{IKO} – токовая чувствительность контрольного образца;

I_C – измеренный ток фотосигнала испытуемого фотоприемника;

I_{KO} – измеренный ток фотосигнала контрольного образца.

Следует отметить, что при высокой временной стабильности параметров установки измерения чувствительности необходимость в измерении тока фотосигнала контрольного образца может возникать через достаточно

длительный (до нескольких месяцев) промежуток времени. В этом случае токовая чувствительность испытуемых фотоприемников определяется по формуле:

$$S_I = K_S \cdot I_C, \quad (4.6)$$

где K_S – коэффициент преобразования измерительной установки:

$$K_S = S_{IKO}/I_{KO}.$$

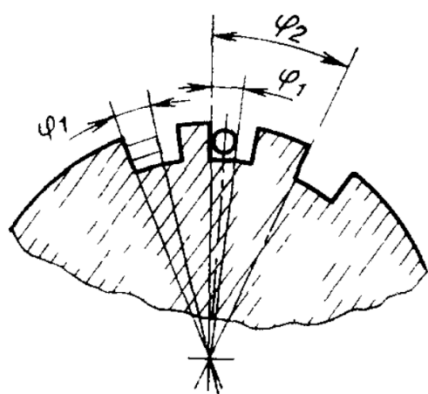
Основным недостатком данного способа измерения чувствительности, существенно ограничивающим его применимость, является обязательное наличие фотоприемника-меры (контрольного образца) для каждого конкретного типа измеряемых фотоприемников. Этот недостаток усугубляется необходимостью периодической перепроверки чувствительности фотоприемника-меры (контрольного образца) способом, обеспечивающим погрешность измерения не более 1/3 требуемой при контроле испытуемых фотоприемников.

При измерении чувствительности фотоприемников с использованием модулированного потока излучения действующее значение его первой гармоники определяется по формуле:

$$\Phi_{\Sigma 1} = \beta \cdot \Phi_{\Sigma}, \quad (4.7)$$

где β – коэффициент формы модуляции.

Для электромеханического модулятора с вращающимся диском и использования селективного вольтметра (усилителя) при измерении фотосигнала коэффициент модуляции определяется в соответствии с таблицей, ГОСТ 17772-88 (рисунок 4.1).



φ_1/φ_2	Коэффициент формы модуляции, β	
	При круглой диафрагме источника	При прямоугольной диафрагме источника
0,1	0,444	0,442
0,15	0,438	0,433
0,2	0,428	0,421
0,25	0,416	0,405
0,3	0,402	0,386
0,35	0,385	0,365
0,4	0,367	0,341
0,45	0,347	0,314
0,5	0,328	0,286

Рисунок 4.1. Значения коэффициента формы модуляции

Токовая и вольтовая чувствительности при измерении на модулированном потоке излучения определяются по формулам:

$$S_I = I_{C1} / \Phi_{Э1} ; \quad (4.8)$$

$$S_u = U_{C1} / \Phi_{Э1} , \quad (4.9)$$

где I_{C1} и U_{C1} – эффективное значение первой гармоники соответственно тока фотосигнала и напряжения фотосигнала.

В лабораторной работе реализовано измерение статической токовой чувствительности на модулированном потоке в соответствии с методом п. 1.10 ГОСТ 17772-88. Измерение выполняется посредством установки, структурная схема которой приведена на рисунке 4.2.

В установке используются:

- АЧТ типа М-305;
- электромеханический модулятор излучения с вращающимся диском;
- преобразователь ток–напряжение;
- селективный микровольтметр (усилитель У2-8);
- сетевой источник питания.

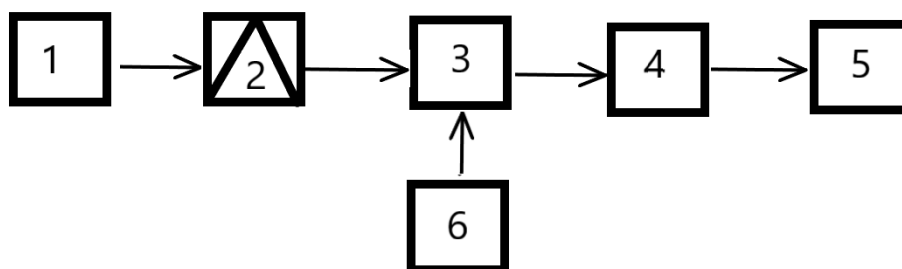


Рисунок 4.2. Структурная схема установки для измерения статической токовой чувствительности: 1 – источник излучения (АЧТ); 2 – модулятор; 3 – испытуемый фотоприемник; 4 – преобразователь ток–напряжение; 5 – селективный вольтметр; 6 – источник питания

Поток излучения, падающий на фотоприемник, определяется расчетным способом:

- полный поток излучения ($\Phi_{Э}$), падающий на фотоприемник в отсутствии модуляции, рассчитывается по формуле (4.2);
- действующее значение первой гармоники модулированного потока излучения – по формуле (4.7).

Селективный вольтметр 5 позволяет выделить из спектра переменного выходного напряжения преобразователя ток–напряжение 4 только первую гармонику и измерить эффективное значение этой первой гармоники.

Эффективное значение первой гармоники тока фотосигнала определяется по формуле:

$$I_{C1} = \frac{U_{ПУ}}{K_{П}}, \quad (4.10)$$

где $U_{ПУ}$ – эффективное напряжение первой гармоники фотосигнала, измеренное селективным вольтметром на выходе преобразователя ток–напряжение;

$K_{П}$ – коэффициент преобразования преобразователя ток–напряжение.

Схема измерительного блока (без цепей питания) приведена на рисунке 4.3. Преобразователь ток–напряжение этого блока выполнен по схеме трансимпендансного усилителя на операционном усилителе А1 типа К140УД17. Коэффициент преобразования ($K_{П}$) трансимпендансного усилителя равен R_{OC} , т. е., $K_{П} = R_{OC} = 1,0 \cdot 10^6$ В/А.

G1 – вход генератора для контроля коэффициента преобразования трансимпендансного усилителя (преобразователя ток–напряжение).

G2 – вход генератора при измерении дифференциального электрического сопротивления фотоприемника.

ХТ1 и ХТ2 – клеммы для подключения испытуемого фотоприемника.

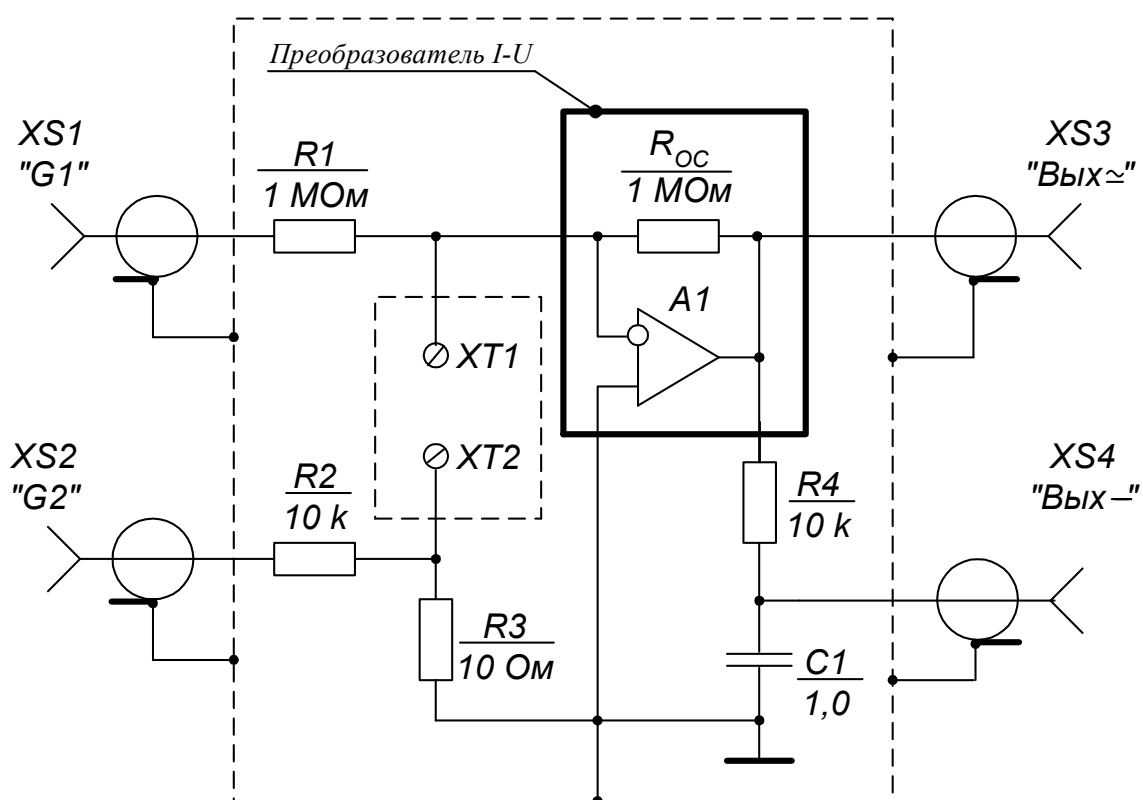


Рисунок 4.3. Схема измерительного блока

Порядок выполнения измерений

1. Включить питание АЧТ и на его табло задать требуемую температуру излучающей полости в соответствии с ТУ на фотоприемник (см. Приложение 1).

2. Включить питание селективного усилителя и измерительного блока.

3. Используя специальное приспособление и линейку металлическую измерительную, измерить расстояние от диафрагмы АЧТ до опорной плоскости посадочного места фотоприемника.

4. Рассчитать расстояние (l) от диафрагмы АЧТ до приемной площадки фотоприемника, используя результат измерения п. 3 и необходимые дополнительные данные из габаритного чертежа фотоприемника (Приложение 2) и чертежа диафрагмы АЧТ (Приложение 3).

5. Используя габаритный чертеж фотоприемника (Приложение 2) и чертеж диафрагмы АЧТ (Приложение 3), рассчитать площадь приемной площадки фотоприемника (A) и площадь отверстия диафрагмы АЧТ (F).

6. Используя чертеж диафрагмы АЧТ (Приложение 3) и чертеж диска модулятора (Приложение 4), определить коэффициент формы модуляции (β).

7. По формулам (4.2) и (4.7) рассчитать эффективное значение первой гармоники потока излучения, падающего на приемную площадку фотоприемника ($\Phi_{\Sigma 1}$). Значения коэффициентов излучения принять равными единице ($\varepsilon_1 = \varepsilon_0 = 1$), а T_0 – равной температуре окружающей среды.

8. Откалибровать коэффициент преобразования тракта измерения входного тока (тока фотоприемника). Для этого:

- установить переключатель пределов измерения селективного усилителя У2-8 в положение «10 мВ»;

- соединить кабелем выход «Вых» (XS3) измерительного блока и вход селективного усилителя;

- установить на выходе «II» генератора ГЗ-117 (дополнительно используемый стандартный генератор) сигнал с частотой 800 Гц $\pm 1,5\%$ напряжением 10 мВ $\pm 2\%$;

- соединить кабелем выход «II» генератора ГЗ-117 и вход G1 («1 МОм») измерительного блока;

- настройкой частоты селективного усилителя У2-8 получить максимальные показания его измерительного прибора;

- при необходимости регулятором «▷» селективного усилителя У2-8 установить его показания равными 10 мВ;

– отсоединить разъем сигнального кабеля от входа G1 («1 МОм») измерительного блока.

9. Включить питание модулятора АЧТ.

10. Установить фотоприемник в контактное устройство. Контактное устройство с фотоприемником установить в посадочное место и прижать планкой.

11. Подключить выводы контактного устройства к клеммам (ХТ1 и ХТ2) измерительного блока.

12. Если температура полости АЧТ достигла требуемого значения, селективным усилителем У2-8 (при необходимости настроив его в резонанс) измерить напряжение сигнала на выходе измерительного блока ($U_{ПУ}$).

13. Отключить выводы контактного устройства от клемм (ХТ1 и ХТ2) измерительного блока и снять контактное устройство с фотоприемником.

14. Извлечь фотоприемник из контактного устройства.

15. Выключить питание АЧТ.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать ток фотосигнала фотоприемника по формуле (4.10).
2. Рассчитать токовую чувствительность фотоприемника по формуле (4.8).

Контрольные вопросы

1. В чем отличие интегральной чувствительности фотоприемника от монохроматической?
2. Дайте определение статической, дифференциальной и импульсной чувствительности.
3. Какой источник можно отнести к полному излучателю?
4. Для каких источников интенсивность воздействующего на фотоприемник оптического излучения определяется расчетным способом?
5. Какие трудности могут возникать при использовании стандартных средств измерения интенсивности излучения?
6. Зачем требуется определять коэффициент формы модуляции?
7. С какой целью в установке используется преобразователь ток–напряжение?

Лабораторная работа 5

Измерение дифференциального сопротивления фотоприемников

Введение

Дифференциальное электрическое сопротивление также относится к числу основных параметров фотоприемников и играет определяющую роль при решении задачи согласования фотоприемника с предварительным усилителем по шумам. Важно также отметить, что при измерении шумовых параметров фотоприемника именно дифференциальное электрическое сопротивление фотоприемника определяет:

- применимость средства для измерения шумов данного конкретного фотоприемника;
- возможность пренебрежения собственными шумами средства измерения при измерении шумов фотоприемника.

Дифференциальное сопротивление (R_d) определяется как отношение малых приращений напряжения на фотоприемнике к вызываемому этим приращением изменению тока.

Цель работы. Знакомство с методами определения дифференциального электрического сопротивления фотоприемников, получение навыков работы с экспериментальной установкой, определение дифференциального электрического сопротивления заданного образца фотоприемника.

Методика исследования и экспериментальная установка

В лабораторной работе для измерения дифференциального сопротивления используется метод п. 1.3 ГОСТ 17772-88, в соответствии с которым измерение следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 5.1.

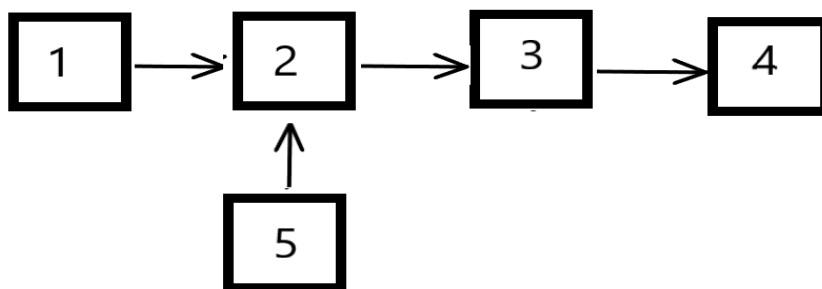


Рисунок 5.1. Структурная схема установки:

- 1 – генератор напряжения переменного тока; 2 – испытуемый фотоприемник;
3 – преобразователь ток–напряжение; 4 – селективный вольтметр;
5 – источник питания

Как и при измерении чувствительности, в качестве согласующего устройства в измерительной установке использован аналогичный измерительный блок. Особенностью этого блока (см. рисунок 4.3) является делитель напряжения R_2 – R_3 , позволяющий снизить выходное сопротивление генератора напряжения переменного тока. С учетом этого делителя формула для расчета дифференциального электрического сопротивления фотоприемника имеет вид:

$$R_D = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot K_{\Pi}, \quad (5.1)$$

где R_2 и R_3 – сопротивления резисторов делителя. $R_2 = 10$ кОм и $R_3 = 10$ Ом соответственно;

U_1 – напряжение на выходе генератора, подключенного к входу G2 измерительного блока;

U_2 – напряжение на выходе преобразователя ток–напряжение (напряжение на выходе «Вых» (XS3) измерительного блока), измеренное селективным вольтметром;

K_{Π} – коэффициент преобразования преобразователя ток–напряжение измерительного блока; $K_{\Pi} = 1 \cdot 10^6$ В/А.

Порядок измерения

дифференциального электрического сопротивления

1. Включить питание генератора сигналов низкой частоты, селективного усилителя У2-8 и измерительного блока.

2. Соединить кабелем выход II генератора Г3-117 и вход G2 («10кОм / 10 Ом») измерительного блока.

3. Соединить кабелем выход «Вых» (XS3) измерительного блока и вход селективного усилителя У2-8.

4. Установить фотоприемник в контактное устройство. Контактное устройство с фотоприемником установить в посадочное место и прижать планкой.

5. Подключить выводы контактного устройства к клеммам (ХТ1 и ХТ2) измерительного блока.

6. Установить на выходе генератора сигнал (U_1) частотой (800 ± 20) Гц и напряжением $(10 \pm 0,25)$ В. Селективным усилителем (при необходимости настроив его в резонанс) измерить напряжение сигнала на выходе «Вых» (XS3) измерительного блока (U_2).

7. Отключить выводы контактного устройства от клемм (ХТ1 и ХТ2) измерительного блока и снять контактное устройство с фотоприемником с установки.

8. Вынуть фотоприемник из контактного устройства.

9. Выключить питание генератора сигналов низкой частоты, селективного усилителя У2-8 и измерительного блока.

Обработка результатов измерений

Рассчитать дифференциальное электрическое сопротивление фотоприемника по формуле (5.1).

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) структурную схему установки;
- 4) полученные экспериментальные данные;
- 5) рассчитанное значение дифференциального электрического сопротивления.

Лабораторная работа 6

Измерение эквивалентной шумовой полосы измерительного тракта

Введение

Электрические шумы – это случайные колебания токов и напряжений в электронных устройствах, имеющие, в общем случае, сложную временную и спектральную структуры. Поскольку шумовой сигнал – это случайная величина, то под его измерением понимают количественную оценку характеризующего его параметра (например, напряжения), определяемую статистическими методами. Для стационарных шумов обычно используют усредненное по времени значение измеряемого параметра. Величина шумового сигнала зависит от полосы пропускания измерительного устройства. Если коэффициент усиления измерительного тракта зависит от частоты, то для расчета шумовых характеристик используется эквивалентная шумовая полоса пропускания.

Цель работы. Знакомство с методами определения эквивалентной шумовой полосы измерительного тракта, получение навыков работы с экспериментальной установкой, определение эквивалентной шумовой полосы измерительного тракта экспериментальной установки.

Методика исследования

Для шумовых сигналов со спектром, равномерным в пределах полосы пропускания измерительного тракта, эквивалентная шумовая полоса пропускания определяется как

$$\Delta f_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{|K_0|^2} \cdot \int_0^{\infty} |K_{\Pi}(f)|^2 df, \quad (6.1)$$

где $\Delta f_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентная шумовая полоса пропускания измерительного тракта;

$|K_{\Pi}(f)|$ – модуль коэффициента передачи измерительного тракта на частоте f ;

$|K_0|$ – модуль максимального значения коэффициента передачи измерительного тракта в полосе пропускания.

В данной работе измерение эквивалентной шумовой полосы пропускания измерительного тракта производится по упрощенной методике, изложенной в приложении 6 ГОСТа 17772-88. В соответствии с этой

методикой эквивалентная шумовая полоса пропускания измерительного тракта определяется по результатам измерения частот, на которых модуль коэффициента передачи принимает значения 0,9; 0,8; 0,7; ...; 0,1 от модуля его максимального значения в полосе пропускания измерительного тракта.

Порядок измерения эквивалентной шумовой полосы измерительного тракта

1. Соединить кабелем «Выход II» генератора ГЗ-117 и вход селективного вольтметра У2-8.
2. Установить частоту генератора (800 ± 20) Гц и выходное напряжение (9 ± 1) мВ;
3. Включить питание генератора ГЗ-117 и селективного вольтметра У2-8.
4. На пределе «10 мВ» селективного усилителя У2-8, меняя частоту генератора ГЗ-117, добиться максимальных показаний прибора.
5. Не изменяя частоты генератора, установить на его выходе напряжение (U_{IN}), при котором показания селективного вольтметра (U_{S0}) составят $(10,0 \pm 0,1)$ мВ.
6. Уменьшая частоту генератора при неизменном напряжении (U_{IN}), зарегистрировать значения нижних граничных частот, на которых напряжение, измеряемое селективным усилителем U_S , становится последовательно равным 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2 и 0,1 от его максимального значения U_{S0} .
7. Аналогично, увеличивая частоту генератора относительно резонансной частоты, зарегистрировать значения верхних граничных частот, на которых напряжение, измеряемое вольтметром на контрольном выходе входного блока, становится последовательно равным 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2 и 0,1 от U_{S0} .
8. Выключить питание генератора ГЗ-117 и селективного вольтметра У2-8.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать эквивалентную шумовую полосу измерительного тракта по формуле:

$$\Delta f_{\text{ЭКВ}} = \sum_{I=0,1}^{0,9} M_I \cdot \Delta f_I, \quad (6.2)$$

где Δf_I – ширина полосы пропускания, соответствующая I -му уровню. Определяется как разница между значениями частоты на границах предыдущего и последующего уровней;

M_I – безразмерный коэффициент, значения которого приведены в таблице:

Уровень	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
M_I	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,025

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) таблицу экспериментальных данных;
- 4) полученное значение эквивалентной шумовой полосы измерительного тракта экспериментальной установки.

Лабораторная работа 7

Определение порога чувствительности и обнаружительной способности фотоприемников

Введение

Чувствительность и обнаружительная способность относятся к числу важнейших параметров фотоприемников и часто являются основными показателями их качества.

Способность фотоприемника регистрировать малые потоки излучения характеризуется порогом чувствительности (Φ_{Π}) или обратной величиной – обнаружительной способностью (D).

Под порогом чувствительности понимают среднее квадратичное значение первой гармоники действующего на фотоприемник модулированного потока излучения, при котором ток (или напряжение) фотосигнала равно среднему квадратичному значению тока (или напряжения) шума в заданной полосе.

Порог чувствительности для одного и того же фотоприемника зависит от ширины полосы пропускания регистрирующего устройства и от размеров его приемной площадки. В силу этого обычно используется удельный порог чувствительности фотоприемника (Φ_{Π}^*) – порог чувствительности фотоприемника в единичной полосе частот, приведенный к единичному по площади фоточувствительному элементу.

Удельный порог чувствительности фотоприемника определяется по результатам измерения тока сигнала и тока шума фотоприемника по формуле:

$$\Phi_{\Pi}^* = \Phi_{\Sigma 1} \cdot \frac{I_{\text{ш}}}{I_{C1} \cdot \sqrt{A_{\text{эфф}} \cdot \Delta f_{\text{экв}}}} = \frac{1}{S_I} \cdot \frac{I_{\text{ш}}}{\sqrt{\Delta f_{\text{экв}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{A_{\text{эфф}}}}. \quad (7.1)$$

Аналогично для удельной обнаружительной способности:

$$D^* \frac{I_{C1}}{\Phi_{\Sigma 1}} \cdot \left(\frac{I_{\text{ш}}}{\sqrt{\Delta f_{\text{экв}}}} \right)^{-1} \cdot \sqrt{A_{\text{эфф}}} = S_I \cdot \left(\frac{I_{\text{ш}}}{\sqrt{\Delta f_{\text{экв}}}} \right)^{-1} \cdot \sqrt{A_{\text{эфф}}}, \quad (7.2)$$

где

$\Phi_{\Sigma 1}$ – среднеквадратическое значение 1-ой гармоники потока излучения, Вт;

$I_{\text{ш}}$ – ток шума фотоприемника, А;

I_{C1} – ток первой гармоники фотосигнала, А;

$A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь чувствительной площадки фотоприемника, см²;

$\Delta f_{\text{экв}}$ – эквивалентная шумовая полоса пропускания тракта измерения, Гц.

Тогда размерность удельного порога чувствительности будет выражаться в следующих единицах: $[\Phi_{\Pi}^*] = \text{Вт/см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, а удельная обнаружительная способность: $[D^*] = \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$.

Таким образом, для определения удельного порога чувствительности (удельной обнаружительной способности) фотоприемника необходимо измерить ток шума фотоприемника, знать токовую чувствительность и эквивалентную шумовую полосу пропускания тракта измерения.

Цель работы. Знакомство с методами определения порога чувствительности и обнаружительной способности фотоприемников, получение навыков работы с экспериментальной установкой, определение порога чувствительности и обнаружительной способности заданного образца фотоприемника.

Методика исследования и экспериментальная установка

Ток шума фотоприемника измеряют посредством установки, структурная схема которой приведена на рисунке 7.1.

В соответствии с ГОСТ 17772-88 средство измерения допустимо применять для измерения шумов данного конкретного фотоприемника, если нормированная ЭДС шума (приведенное ко входу напряжение шума в единичной полосе частот на частоте измерения) его измерительного тракта ($e_{\text{ш}}$):

$$e_{\text{ш}} \leq 1,5 \cdot \sqrt{4 \cdot k \cdot T_0 \cdot R_{\text{д}}}, \quad (7.3)$$

а приведенный ко входу измерительного тракта средства измерения собственный шумовой ток в единичной полосе ($i_{\text{ш}}$):

$$i_{\text{ш}} \leq 1,5 \cdot \sqrt{4 \cdot k \cdot T_0 / R_{\text{д}}}, \quad (7.4)$$

где k – постоянная Больцмана. $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T_0 – температура фотоприемника, К;

$R_{\text{д}}$ – дифференциальное электрическое сопротивление фотоприемника, Ом.

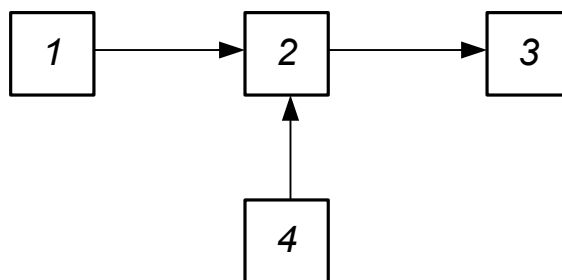


Рисунок 7.1. Структурная схема установки для измерения шумового тока фотоприемника: 1 – испытуемый фотоприемник; 2 – преобразователь ток–напряжение; 3 – селективный вольтметр; 4 – источник питания

Важно также отметить, что в случае, если выполняются более жесткие условия:

$$e_{ш} \leq \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot k \cdot T_0 \cdot R_d} \text{ и } i_{ш} \leq \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot k \cdot T_0 / R_d}, \quad (7.5)$$

то собственными шумами средства измерений можно пренебречь.

Если выполняется условие (7.5), то шумовой ток фотоприемника принимается равным измеренному, определяемому по формуле:

$$I_{ш} = I_{шл} = \frac{U_{ш}}{K_{шш}}, \quad (7.6)$$

где $U_{шл}$ – напряжение шума, измеренное селективным вольтметром на выходе измерителя шума;

$K_{шш}$ – коэффициент преобразования преобразователя ток–напряжение измерителя шума.

Если условие (7.5) не выполняется, то шумовой ток фотоприемника определяется по формуле:

$$I_{ш} = \sqrt{(I_{шл})^2 - (I_{шс})^2}, \quad (7.7)$$

где $I_{шл}$ – измеренный шумовой ток, приведенный ко входу;

$I_{шс}$ – собственный шумовой ток измерительного тракта, приведенный ко входу:

$$I_{шс} = \Delta f_{ЭКВ} \cdot \sqrt{(i_u)^2 + (e_u / R_d)^2}, \quad (7.8)$$

где R_d ранее измененное дифференциальное сопротивление фотодиода;

e_u – Equivalent input noise voltage на частоте $f = 1$ kHz операционного усилителя (TL071).

Приведенный ко входу измерительного тракта средства измерения собственный шумовой ток в единичной полосе ($i_{ш}$) определяется во формуле:

$$i_{ш} = \frac{U_{шхх}}{K_{пш} \cdot \sqrt{\Delta f_{ЭКВ}}}, \quad (7.9)$$

где $U_{шхх}$ – напряжение шума, измеренное селективным вольтметром на выходе преобразователя ток–напряжение измерителя шума при разомкнутом входе последнего;

$K_{пш}$ – коэффициент преобразования преобразователя ток–напряжение измерителя шума.

Порядок измерения шумового тока фотоприемника

1. Включить питание селективного усилителя У2-8.
2. Включить источник питания измерителя шумов.
3. Соединить кабелем выход измерителя шумов со входом селективного усилителя У2-8.
4. Подключить к входным клеммам измерителя шумов выход генератора сигналов посредством калибровочного кабеля (содержащим последовательно включенный) резистор сопротивлением $R_{\Sigma} = 10 \text{ МОм} \pm 1\%$.
5. Установить на выходе генератора сигнал ($U_{Г}$) напряжением $(10 \pm 0,1) \text{ мВ}$ частотой $(800 \pm 20) \text{ Гц}$.
6. Измерить напряжение сигнала ($U_{С}$) на выходе измерителя шумов селективным усилителем У2-8 (при необходимости подстроив его частоту).
7. Рассчитать коэффициент преобразования ($K_{пш}$) преобразователя ток–напряжение измерителя шума по формуле:

$$K_{пш} = R_{\Sigma} \cdot \frac{U_{С}}{U_{Г}}. \quad (7.10)$$

8. Отключить от входных клемм калибровочный кабель, выключить генератор и измерить посредством селективного усилителя У2-8 напряжение шума на выходе измерителя шумов ($U_{хх}$) при его разомкнутом входе.

9. Рассчитать приведенный ко входу измерительного тракта собственный шумовой ток измерителя шумов в единичной полосе ($i_{ш}$) по формуле (7.9).

10. $e_{ш}$ принять равным Equivalent input noise voltage на частоте $f = 1 \text{ kHz}$ операционного усилителя (TL071), используемого в качестве активного элемента в измерителе шумов (Приложение 5).

11. Установить фотоприемник в контактное устройство. Подключить выводы контактного устройства к клеммам измерителя шумов и установить экран, защищающий фотоприемник от внешних наводок.

12. Отключить кабель, соединяющий выход измерителя шумов со входом селективного усилителя У2-8.

13. Включить встроенный в измерительный блок источник света, направляющий фоновый поток на фотоприемник. Для этого подключить к выходу измерителя шумов вольтметр постоянного тока, включить тумблер «ФОН» и регулятором «ФОН» установить постоянное напряжение (U_{Φ}) на выходе измерителя шумов в интервале от 0,5 до 10 В.

14. Рассчитать фоновый фототок фотодиода ($I_{\Phi OH}$) и дробовый шумовой ток этого фонового фототока ($i_{дрфон}$) по формулам:

$$I_{\Phi OH} = \frac{U_{\Phi}}{K_{ПШ}} ; \quad (7.11)$$

$$i_{дрфон} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I_{\Phi OH}} , \quad (7.12)$$

где q – заряд электрона.

15. Отключить от выхода измерителя шумов вольтметр постоянного тока. Соединить кабелем выход измерителя шумов со входом селективного усилителя У2-8.

16. Селективным усилителем У2-8 измерить напряжение шума $U_{ш}$ на выходе измерителя шума.

17. Выключить тумблер «ФОН» и снять экран.

18. Отключить выводы контактного устройства от клемм измерителя шумов и снять контактное устройство с фотоприемником.

19. Вынуть фотоприемник из контактного устройства.

Обработка результатов измерений

1. Проверить выполнение условий (7.4) и (7.5).

2. В зависимости от результатов проверки указанных условий рассчитать ток шума фотоприемника по формуле (7.6) или по формуле (7.7).

3. Рассчитать ток шума фотоприемника в единичной полосе по формуле

$$i_{шФП} = \frac{I_{ш}}{\sqrt{\Delta f_{ЭКВ}}} \quad (7.13)$$

и сравнить полученный результат с результатом, рассчитанным по формуле (7.12).

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Зайтов Ф. А., Курмашев Ш. Д. Полупроводниковые фотоприемники. Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / под ред. В. И. Стафеева. Москва: Радио и связь, 1984. 216 с.
2. Гаврушко В. В. Физико-химические методы анализа веществ: лабораторный практикум. Новгородский гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород: ИПЦ НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2000. 68 с.
3. Козелкин В. В., Усольцев И. Ф. Основы инфракрасной техники. Москва: Машиностроение, 1974. 336 с.
4. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. Москва: Советское радио, 1978. 400 с.
5. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. Москва: Высшая школа, 2001. 573 с.
6. Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора: учеб. пособие. Москва: Изд-во МИИГАиК, 2017. 58 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХЦВЕТНЫЙ ФДМ-11-24 ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТУ-6349-001-45259072-07 (извлечение)

4.3.1 Электрические и фотоэлектрические параметры при приемке и поставке, измеренные согласно ГОСТ 17772 при температуре окружающей среды $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$, должны соответствовать следующим нормам:

Таблица 1 – Нормы параметров при приемке и поставке

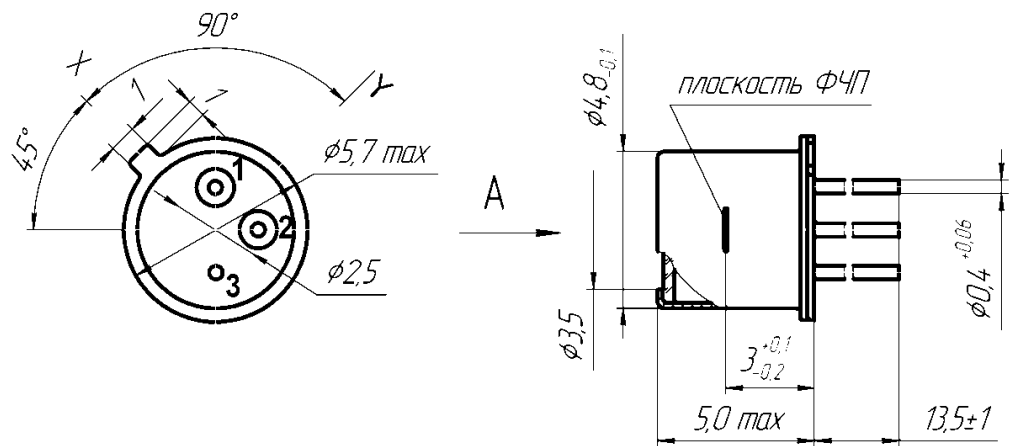
Наименование параметра	Букв. обозн.	Канал А		Канал Б	
		не менее	не более	не менее	не более
1 Коротковолновая граница чувствительности, мкм ФДМ-11-24-2 ФДМ-11-24-3	λ'		0,6		1,5 1,8
2 Длинноволновая граница чувствительности, мкм	λ''	1,0		2,3	—
3 Интегральная токовая чувствительность к излучению АЧТ 1000 К, А/Вт	S_I	$5 \cdot 10^{-4}$			
4 Интегральная токовая чувствительность к излучению АЧТ 800 К, А/Вт ФДМ-11-24-2 ФДМ-11-24-3	S_I			$1,5 \cdot 10^{-2}$ $0,8 \cdot 10^{-2}$	
5 Темновой ток при напряжении смещения 10 В, мкА а) при $T_{oc} = (20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ б) при $T_{oc} = (50 \pm 3) ^\circ\text{C}$	I_T		0,1 0,3		
6 Дифференциальное сопротивление при нулевом смещении, кОм а) при $T_{oc} = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ б) при $T_{oc} = (50 \pm 3) ^\circ\text{C}$	R_d			5 1,5	
7 Площадь фоточувствительной площадки, мм ²	$A_{ФЧП}$	0,25		0,25	

4.3.2 Измерение параметров приемников излучения двухцветных должно производиться в режимах, значения параметров которых приведены в таблице 2.

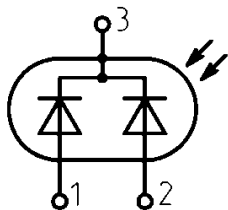
Таблица 2 – Значение параметров режимов измерений

Наименование параметров, единица измерения	Букв. обозн.	Норма	Примеч.
1 Температура полости черного тела, К	$T_{\text{АЧТ}}$	800 ± 2	1
2 Температура полости черного тела, К	$T_{\text{АЧТ}}$	1000 ± 3	2
3 Частота модуляции лучистого потока, Гц	$f_{\text{мод}}$	800 ± 20	
4 Напряжение питания фотодиода при измерении темнового тока (канал А), В	$V_{\text{ПИТ}}$	$10 \pm 0,5$	2
5 Напряжение питания фотодиода при измерении дифференциального сопротивления (канал Б), мВ	$V_{\text{ПИТ}}$	от минус 7 до 7	1
6 Напряжение сигнала генератора при измерении дифференциального сопротивления (канал Б), мВ	V_1	не более 10	1
7 Напряжение питания фотодиода при измерении интегральной токовой чувствительности и относительной спектральной характеристики чувствительности, мВ	$V_{\text{ПИТ}}$	от минус 7 до 7	3
8 Температура окружающей среды, °С	$T_{\text{ос}}$	20 ± 5	
Примечания: 1 Только для канала Б. 2 Только для канала А. 3 Для каналов А и Б.			

Габаритный чертеж

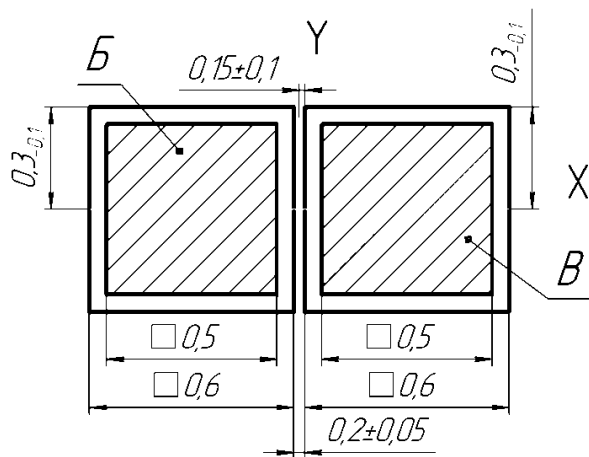


ФДМ-11-24-2

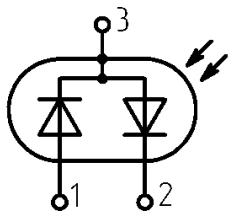


Вывод	Наименование
1	Канал А (анод ФД)
2	Канал Б (анод ФД)
3	Общий. Корпус

А (М50:1)



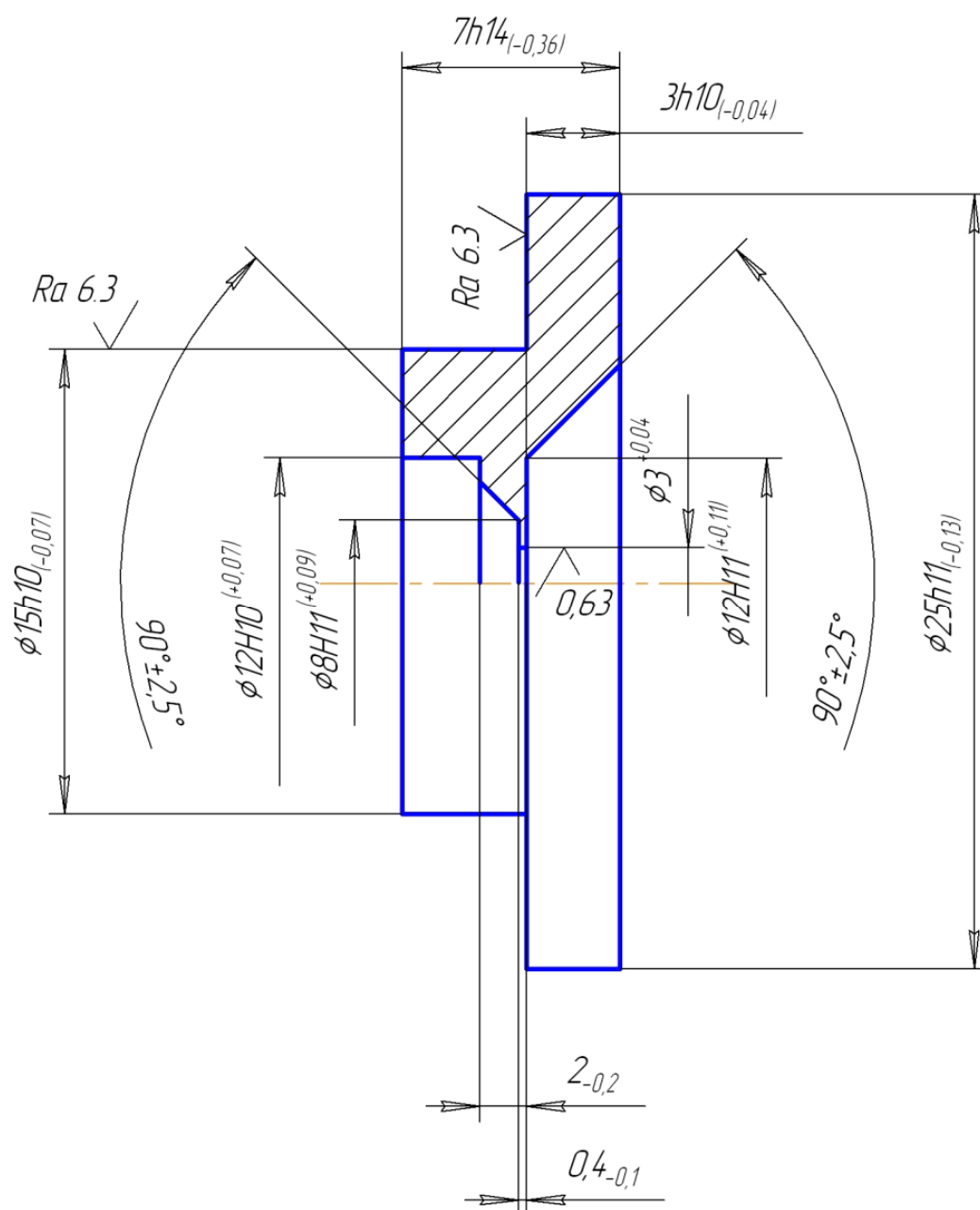
ФДМ-11-24-3



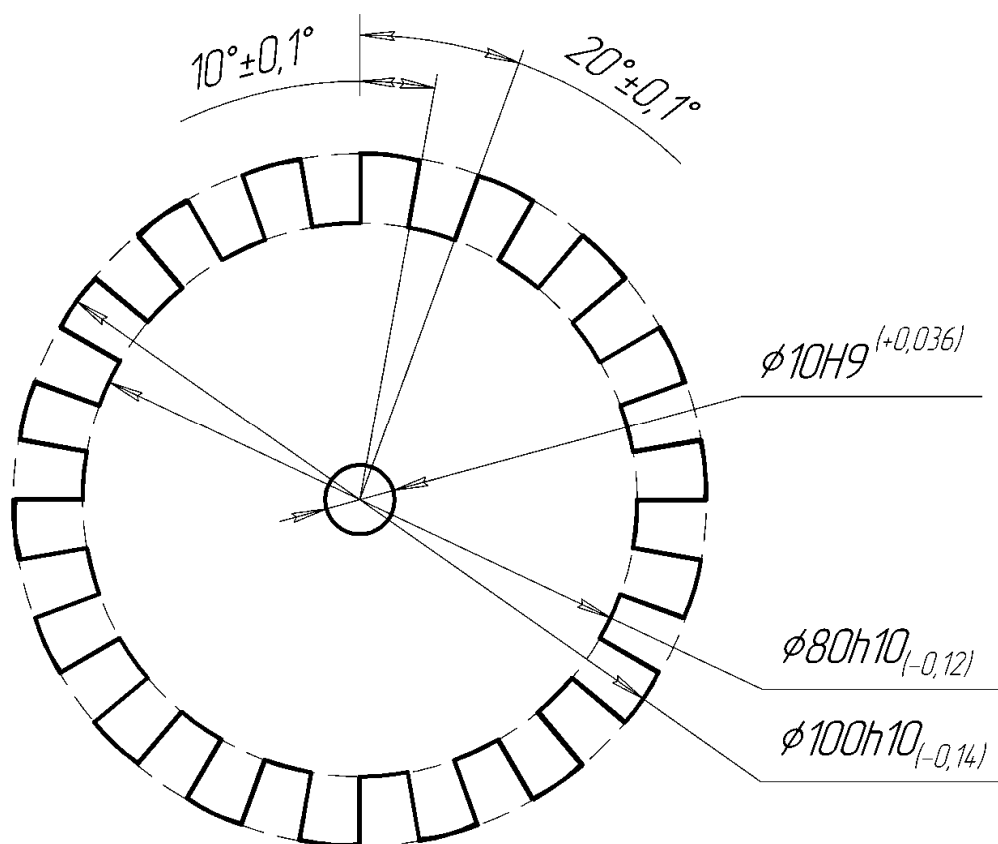
Вывод	Наименование
1	Канал А (анод ФД)
2	Канал Б (катод ФД)
3	Общий. Корпус

1. Все размеры для справок.
2. Номера выводов показаны условно.
3. Область Б – ФЧП канала Б, область В – ФЧП канала А.

Диафрагма АЧТ



Чертеж диска модулятора



Примечание.

Расстояние от центра вращения диска модулятора до центра отверстия диафрагмы АЧТ – $90 \pm 0,1$ мм.

Параметры операционного усилителя TL071 (извлечение)

6.17 Switching Characteristics: TL07xC, TL07xAC, TL07xBC, TL07xI

$V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
SR	Slew rate at unity gain	$V_I = 10 \text{ V}$ $C_L = 100 \text{ pF}$	$R_L = 2 \text{ k}\Omega$ See Figure 21	8	13		V/ μs
t_r	Rise-time overshoot factor	$V_I = 20 \text{ V}$ $C_L = 100 \text{ pF}$	$R_L = 2 \text{ k}\Omega$ See Figure 21		0.1		μs
					20%		
V_n	Equivalent input noise voltage	$R_S = 20 \Omega$	$f = 1 \text{ kHz}$		18		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
			$f = 10 \text{ Hz to } 10 \text{ kHz}$		4		μV
I_n	Equivalent input noise current	$R_S = 20 \Omega$	$f = 1 \text{ kHz}$		0.01		pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
THD	Total harmonic distortion	$V_{rms} = 6 \text{ V}$ $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$ $f = 1 \text{ kHz}$	$A_{VD} = 1$ $R_S \leq 1 \text{ k}\Omega$		0.003%		

Спектральная характеристика эталонного фотоприемника ЛФТИ

Таблица. Зависимость спектральной токовой чувствительности эталонного фотоприемника ЛФТИ от длины волны

λ , мкм	S_{λ} , А/Вт	λ , мкм	S_{λ} , А/Вт
0,36	0,109	0,70	0,342
0,38	0,120	0,72	0,353
0,40	0,145	0,74	0,364
0,42	0,162	0,76	0,379
0,44	0,179	0,78	0,391
0,46	0,192	0,80	0,402
0,48	0,205	0,82	0,416
0,50	0,219	0,84	0,427
0,52	0,232	0,86	0,438
0,54	0,247	0,88	0,451
0,56	0,258	0,90	0,461
0,58	0,272	0,92	0,469
0,60	0,284	0,94	0,479
0,62	0,293	0,96	0,487
0,64	0,304	0,98	0,491
0,66	0,315	1,00	0,470
0,68	0,330	—	—

Учебное издание

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лабораторный практикум

Авторы-составители:

Гаврушко Валерий Владимирович
Ласткин Валентин Александрович
Сапожников Александр Андреевич

Редактор *Е. В. Ефимова*

Компьютерная верстка *И. В. Люля*

Подписано в печать 11.05.2023. Бумага офсетная. Формат 60×84 1/16.

Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,4. Уч.-изд. л. 3,7. Тираж 500 экз. Заказ № 11052023.

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого.

173003, Великий Новгород, ул. Б. Санкт-Петербургская, 41.

Отпечатано: ИП Копыльцов П.И.,

394052, Воронежская область, г. Воронеж,

ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56.

Тел.: 89507656959. E-mail: Kopyltsow_Pavel@mail.ru