

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИС-
СЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет
Кафедра общей физики

Ботникова Елизавета Евгеньевна
КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение характеристик фотоэлектронного умножителя

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18309

Научный руководитель:

м. н. с. Осинных И.В.
Оценка научного руководителя

«_____» декабря _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

доцент Костюрина А.Г.
Оценка преподавателя практикума

«_____» декабря _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к. т. н. доцент Астрелин В. Т.
Итоговая оценка

«_____» декабря _____ 2019 г.

Новосибирск, 2019г

Аннотация

В работе рассмотрен принцип работы фотоэлектронного умножителя. Найдены и учтены эффекты, искажающие прямо пропорциональную зависимость между световым потоком, падающим на фотокатод, числом зарегистрированных анодных импульсов тока. Построены спектральные зависимости интенсивности излучения источника света от длины волны с учетом темнового тока.

Рассмотрен способ нахождения яркости излучения галогеновой лампы и построены спектральные зависимости. Найдена спектральная зависимость коэффициента усиления системы, включающей монохроматор, оптическую систему и ФЭУ, представлен способ выявления из этого спектра коэффициента усиления ФЭУ. Рассчитаны коэффициенты усиления ФЭУ $6 \cdot 10^{20}$ и $1,4 \cdot 10^{18}$ для излучений, длины волн которых равны 638 нм и 532 нм соответственно.

Ключевые слова: фотоэлектронный умножитель, коэффициент усиления, спектральная зависимость, темновой ток.

Содержание

1. Введение	3
2. Теоретическая часть.....	3
2.1. Устройство и принцип работы фотоэлектронного умножителя	4
2.2. Темновой ток и шумы	7
2.3. Форма сигнала на выходе ФЭУ	8
2.4. Получение истинного спектра лампы	9
3. Экспериментальная часть	10
3.1. Описание установки.....	10
3.2. Обработка экспериментальных данных	11
4. Вывод	14
5. Список литературы	15

1. Введение

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) электровакуумный прибор, преобразующий поток падающего на него излучения в электронный поток в вакууме, с последующим его усилением. Существует ряд эффектов, искажающих прямо пропорциональную зависимость между световым потоком, падающим на фотокатод, и фототоком или числом зарегистрированных анодных импульсов тока. Целью работы является определение характеристик фотоэлектронного умножителя ФЭУ-79. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выявить эффекты, искажающие сигнал.
2. Учесть их при снятии измеряемого сигнала.
3. Определить спектральную чувствительность ФЭУ.
4. Рассчитать спектр излучения галогеновой лампы.
5. Рассчитать коэффициент усиления ФЭУ.

2. Теоретическая часть

2.1. Устройство и принцип работы фотоэлектронного умножителя

В данной работе изучаются характеристики ФЭУ-79, с электростатической фокусировкой электронов для измерения предельно малых световых потоков в широкой области спектра. На рис.1 представлена схема ФЭУ-79.

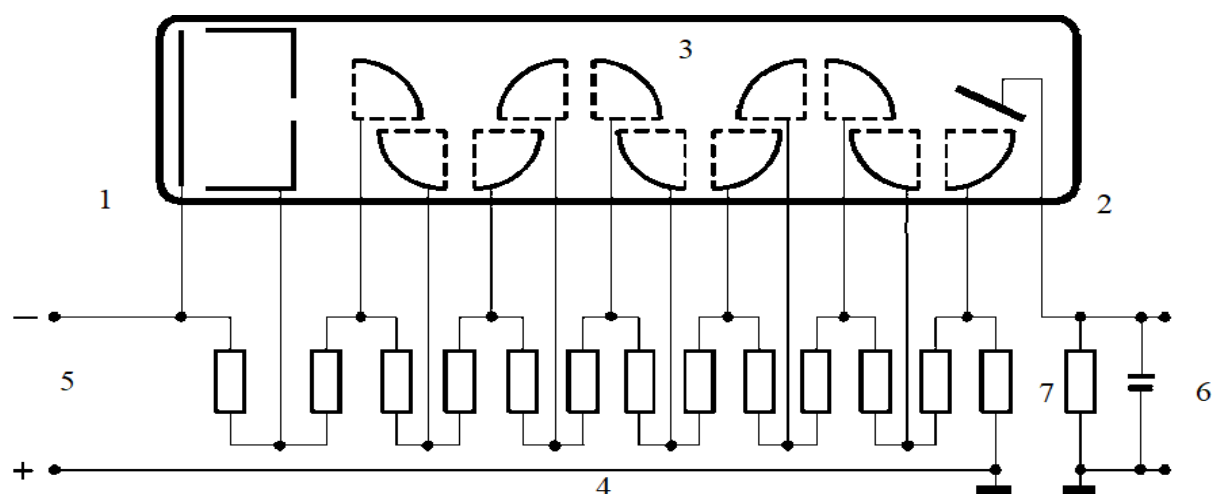


Рис. 1. Схема ФЭУ-79: 1-фотокатод; 2-анод; 3-динодная система; 4-делитель напряжения; 5-питающее напряжение; 6-сигнал к усилителю; 7-нагрузка.

ФЭУ состоит из фотокатода, катодной камеры, диодной системы и анодного узла, размещенных внутри вакуумного объема. Фотокатод – отрицательно заряженный электрод в светочувствительных устройствах, работающих с использованием внешнего фотоэффекта. ФЭУ-79 содержит мультищелочный полупрозрачный фотокатод, нанесенный, изнутри, на верхний торец стеклянной колбы. Фотокатодная камера образуется поверхностями фотокатода и первого динода, а также расположенными между ними электродами, форма и распределение потенциалов на которых определяют ее электронно-оптические свойства. У неё две функции: вытягивание электронов с фотокатода и фокусировка их на первый диод. Отсюда и характеристические параметры:

1. Эффективность – коэффициент сбора электронов с фотокатода на первый диод.
2. Острота фокусировки, определяет допустимое отношение рабочих площадей фотокатода и первого динода.
3. Разброс времен полета, вылетающих с различных точек фотокатода. Он приводит к неопределенности времени задержки импульса на выходе ФЭУ относительно момента поглощения фотона и определяет временную ширину многоэлектронного импульса.

Чувствительность фотокатода определяется величиной квантового выхода фотоэмиссии или квантовой эффективностью, это величины равные отношению эмитированных электронов к числу поглощенных квантов света.

В ФЭУ-79 между фотокатодом и первым динодом расположен еще один электрод, который называется фокусирующей диафрагмой. Работает он как электростатическая линза и служит для того, чтобы фотоэлектроны из периферийных частей фотокатода не смогли попасть в диодную систему для умножения.

Динод – электрод в фотоэлектронном умножителе служащий для усиления электронного потока за счет вторичной эмиссии электронов. Материал динода и энергия падающих на него электронов определяют коэффициент вторичной эмиссии σ . Для того что бы электроны достигли динода, необходимо, что бы по-

тенциал на диноде был на десятки больше фотокатода. С первого динода эмитируются σ электронов, со второго σ^2 . Процесс умножения происходит лавинообразно и до анода доходит $K = \sigma^n$ электронов, где n – число динодов, K – коэффициент усиления. Умножительные свойства каждого каскада и динодной системы в целом зависят и от следующих параметров, чувствительных к конструкции системы:

1. Эффективность – отношение величины усиления динода к коэффициенту вторичной эмиссии применяемого материала.
2. Разброс времен полета электрона на каскад, определяющий быстродействие системы, ширину одноэлектронного импульса на выходе ФЭУ.
3. Величина градиента потенциала у эмитирующей поверхности, от которой зависят и быстродействие, и линейность световой характеристики. Нелинейность возникает на последних каскадах, где велики плотности тока.
4. Острота фокусировки – критичность выполнения заданных геометрических размеров и распределения потенциалов на электродах.
5. Рабочая площадь – токоустойчивость и постоянство характеристик в широком диапазоне интенсивностей, а значит, и величин токов на динодах.
6. Обратная связь в динодной системе, возникающая при переносе возбуждения в сторону фотокатода.

В ФЭУ-79 коробчатая система из 11 динодов. Динод представляет собой часть поверхности цилиндра (в сечении обычно $1/4$ окружности), закрытую с торцов крышками. Эта система характеризуется неострой фокусировкой электронов, малой напряженностью электрического поля у поверхности динода и малой величиной его рабочей площади. Достоинства коробчатой системы высокая эффективность каскада, около 95% при использовании различных типов вторично-эмиссионных поверхностей, жесткость формы динода, почти полная экранировка пролетных промежутков от влияния крепежных изоляторов, компактность. Широко применяется при создании малошумящих механически устойчивых ФЭУ. Для обеспечения подачи необходимых потенциалов на динодную систему используется делитель напряжения, изображенный на рис.1.

Анодный блок состоит из последнего динода и коллектора (анода). От конструкции анодного блока зависит величина линейного участка световой характеристики, быстродействие ФЭУ и возможность правильного согласования с последующей радиотехнической цепью.

Рассмотрим принцип работы фотоэлектронного умножителя. Световой поток Φ поглощается фотокатодом, эмитирующим в вакуум электроны. В электростатическом поле, создаваемом электродами катодной камеры, электроны ускоряются до 50-200 эВ и вытягиваются на первый динод. Там его энергия на очень малой глубине проникновения, порядка размеров атома, целиком рассеивается на возбуждение собственных электронов материала динода, так что возникает уже несколько электронов, возбужденных не столь сильно, но способных преодолеть поверхностный потенциальный барьер и выйти в вакуум. В этом процессе, называемом вторично электронной эмиссией, должна образоваться пачка из 3-5-ти и более электронов на каждый упавший, иначе работа динодной системы будет малоэффективной. Вторичные электроны, так же, как и фотоэлектроны, имеют малые энергии, но междинодное поле их вытягивает, ускоряет и фокусирует на второй динод. Далее этот процесс повторяется на всех каскадах и с последнего динода усиленный электронный поток собирается анодом. Каждый динод работает и анодом, собирая электроны с предыдущего, и катодом, эмитируя усиленный поток.

2.2. Темновой ток и шумы

Существует ряд эффектов, искажающих прямо пропорциональную зависимость между световым потоком, падающим на фотокатод, и фототоком или числом зарегистрированных анодных импульсов тока. Прежде всего, это темновой ток или темновой сигнал n_D — сигнал, который обнаруживается на выходе ФЭУ, даже если прибор находится в полной темноте. Источников для возникновения такого сигнала несколько.

1. При комнатной температуре наиболее существенным является термоэмиссия электронов с фотокатода и динодов. Термоэмиссия обусловлена тем, что распределение электронов по энергиям при ненулевой температуре не ограничено со стороны высоких энергий и, с учетом большого числа электронов в объеме фотокатода, всегда есть электроны, способные эмитировать из фотокатода. Такой электрон не отличим от фотоэлектрона и также приводит к образованию лавины и появлению выходного сигнала. Термоэмиссия с динодов имеет меньшее значение, поскольку число степеней умножения для таких электронов, по крайней мере, на 1 меньше, и выходные импульсы слабее.

2. Автоэмиссия возникает чаще в динодной системе и приводит к возникновению неустойчивостей ФЭУ при больших напряжениях питания.

3. Распад радиоактивных атомов в стекле колбы, космические лучи, автоэмиссия под действием электрического поля и т.д.

При измерении светового потока мы должны учесть присутствие темнового сигнала, и световому потоку на фотокатоде ФЭУ будет соответствовать не полное число n , а разность $n - n_D$. Заметим, что флуктуации n_D неизбежно будут входить в эту разность. Флуктуации темнового сигнала называются собственным шумом ФЭУ, который ограничивает возможность измерения слабых световых потоков.

При низких напряжениях на ФЭУ основной вклад в величину темнового тока вносят токи утечки, при высоких-автоэлектронная эмиссия. В рабочей области основной источник шума-термоэлектронная эмиссия. Рабочей областью является область, в которой изменение величины темнового тока с напряжением пропорционально изменению анодной чувствительности.

2.3. Форма сигнала на выходе ФЭУ

Каждый первичный фотоэлектрон инициирует весь процесс умножения и, независимо от остальных, дает на выходе пачку, среднее число электронов в которой $K = \sigma n$. Обычно в рабочем режиме $K = 10^5 \text{ — } 10^8$.

Реальное распределение из-за особенностей конструкции или условий эксплуатации может несколько отличаться по следующим основным причинам:

1. сквозной пролет электронов, при котором они, минуя n -й динод, попадают сразу на $(n+1)$ -й, приведет к эффективному уменьшению σ и увеличению относительной погрешности за счет увеличения количества импульсов малой амплитуды. Если на первых каскадах его возможность устранена, то этот эффект мало скажется на конечном результате;

2. обратная связь уширит распределение за счет увеличения доли больших импульсов;

3. ограничение амплитуды пачки из-за взаимного расталкивания электронов (часть из них может быть потеряна) или из-за ограниченной емкости динода и цепи его питания уменьшит долю больших импульсов и сузит распределение;

4. разброс времен пролета равномерно уширит распределение, если регистрируется не количество электричества, а ток.

Существует 3 режима работы ФЭУ:

1. Режим счета одноэлектронных импульсов

2. Режим постоянного тока

3. Режим счета многоэлектронных импульсов

Спектральная область чувствительности ФЭУ ограничивается с длинноволновой стороны порогом чувствительности фотокатода, а с коротковолновой – границей пропускания оптического окна. Во всей видимой области спектра (400-700нм) можно работать со стеклянным окном.

2.4. Получение истинного спектра лампы

При измерении спектров необходимо учитывать искажение спектральной зависимости пропускания оптической системы, монохроматора, чувствительности ФЭУ. Для нормировки спектров можно воспользоваться спектром эталонного источника, излучение которого близко к излучению абсолютно черного тела. По закону Кирхгофа выражение для яркости излучения галогеновой лампы $B(\lambda, T)$ можно записать в виде:

$$B(\lambda, T) = \tau(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot R(\lambda, T), \quad (1)$$

где $R(\lambda, T)$ – яркость излучения абсолютно черного тела, $\varepsilon(\lambda, T)$ – коэффициент излучения не абсолютно черного тела, $\varepsilon(\lambda, T) < 1$, $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания стекла.

Функция Планка определяет лучеиспускательную способность абсолютно черного тела $R(\lambda, T)$, то есть мощность излучения с единичной поверхности в единичном интервале длин волн и имеет вид:

$$R(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}, \quad (2)$$

где $R(\lambda, T)$ – мощность излучения абсолютно черного тела при температуре T , $C_1 = 2\pi h c^2 (\text{Вт} \cdot \text{м}^2)$ – первая постоянная излучения, $C_2 = \frac{hc}{k} (\text{м} \cdot \text{К})$ – вторая постоянная излучения, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ – постоянная Планка, $c = 2,999 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ – скорость света, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – постоянная Больцмана.

Интегрируя функцию Планка по всему спектру излучения, получим закон Стефана-Больцмана:

$$R(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda, T) d\nu = \sigma T^4 \quad (3)$$

где $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Для нагрева нити накала, лампу включают в цепь переменного тока. Мощность, затрачиваемую на поддержания нагрева нити, снимают с амперметра и вольтметра, подключенных к цепи лампы. Приравнивая эту мощность к количеству энергии по закону Стефана-Больцмана получаем:

$$IU = \sigma S \cdot (T^4 - T_c^4) \quad (4)$$

где S – общая поверхность раскаленной нити, м^2 , T_c – температура окружающей среды.

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание установки

Установка для измерения спектров стационарной фотолюминесценции (ФЛ), использованная при проведении данной работы, была построена на базе промышленных спектрометров с использованием галогеновой лампы в качестве источника света. Блок схема установки представлена на рис.2.

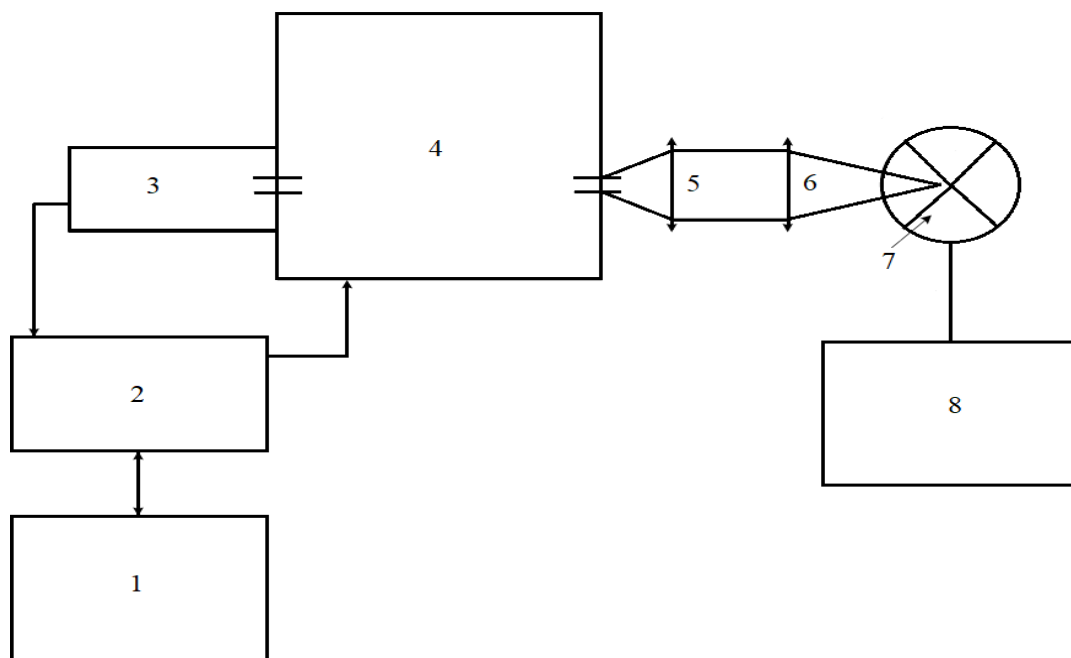


Рис.2. Схема установки: 1-ЭВМ; 2-КАМАК; 3-ФЭУ; 4-монохроматор; 5,6-линзы; 7-галогеновая лампа; 8-блок питания.

Основными ее элементами являются монохроматор, галогеновая лампа, система регистрации ФЛ и управление установкой на основе ЭВМ. Для разложения излучения ФЛ в спектр использовался двойной дифракционный монохроматор СДЛ-1. Собранное линзой 5 рекомбинационное излучение линзой 6 фокусировалось на входную щель монохроматора. Излучение регистрировалось ФЭУ-79. Управление разверткой монохроматора по длинам волн, последующая обработка измеренных спектров осуществлялись при помощи ЭВМ. Соединение управляющей ЭВМ с компонентами измерительной схемы выполнялось с использованием системы автоматизации КАМАК.

3.2. Обработка экспериментальных данных

Для выявления эффектов, искажающих сигнал, проводим измерения спектра без источника света. В нашей установке использовалось охлаждение ФЭУ, это

значит, что автоэлектронной эмиссией мы можем пренебречь, а основной вклад в темновой ток вносит термоэлектронная эмиссия. На рис.3 приведен результат измерения темнового тока.

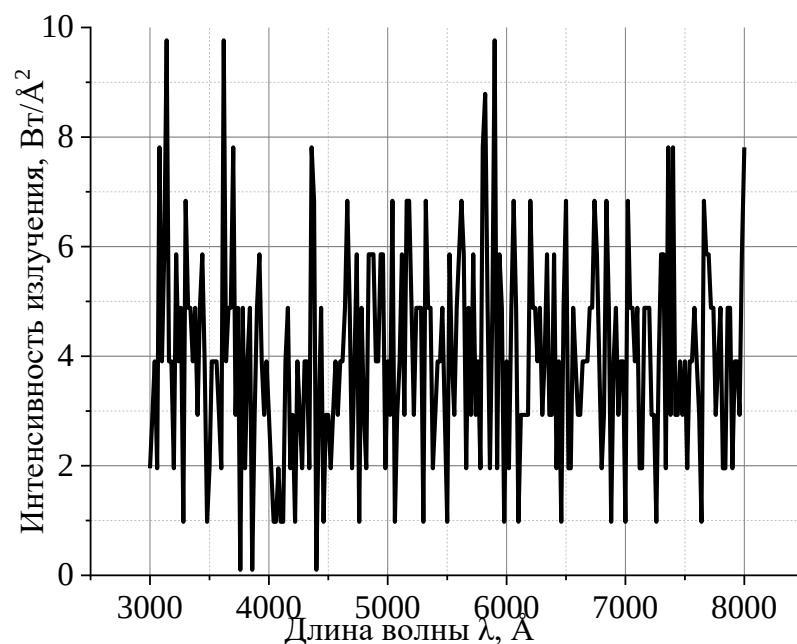


Рис.3. Темновой ток.

Что бы получить спектральную зависимость плотности потока излучения лампы от длины волны, мы подключаем лампу к блоку питания. От полученного спектра отнимаем спектр темнового тока. На рис.4 представлены спектры, при 2А и 1,5 А на лампе, с учетом темнового тока.

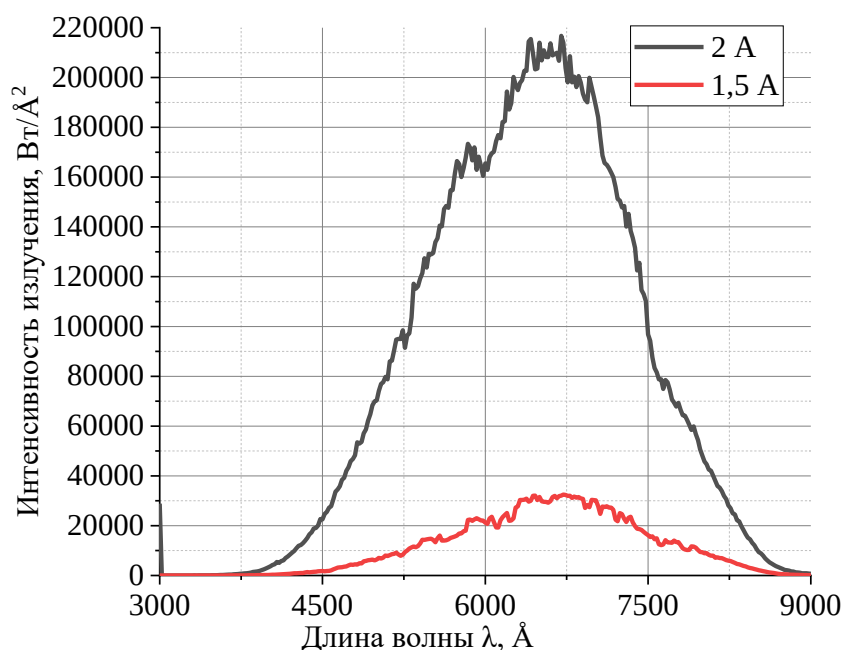


Рис.4. Спектр с учетом темнового тока при силе тока 2 А и 1,5 А подаваемой на лампу.

Измерим истинный спектр лампы. Так как температура нагрева нити галогеновой лампы много больше температуры среды, мы можем пренебречь температурой T_c . Коэффициент излучения стекла как не абсолютно черного тела равен $\varepsilon(\lambda, T)=0,92$, спектральный коэффициент пропускания стекла равен $\tau(\lambda)=0,9$. На рис. 5 представлены истинные спектры галогеновой лампы при подаче на нее различного тока.

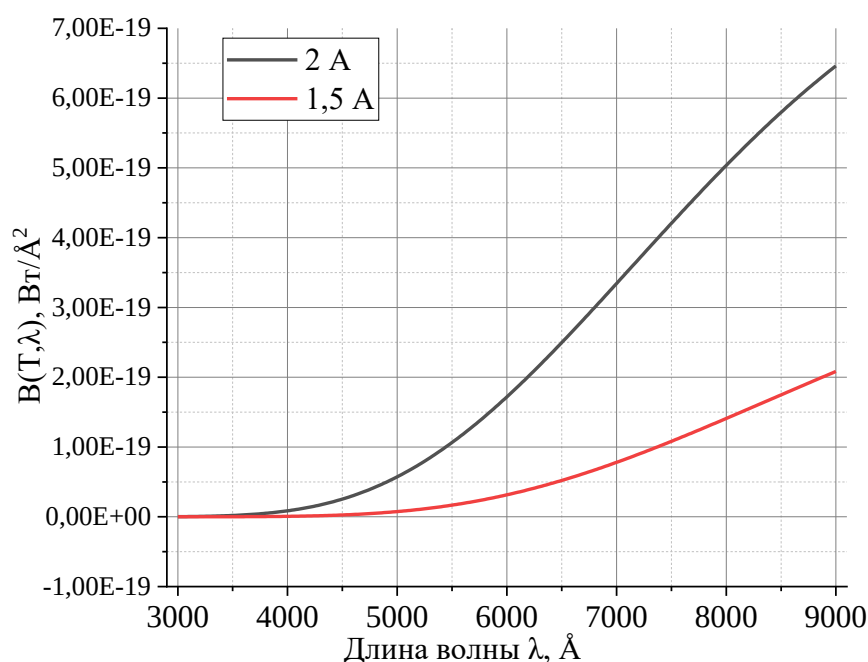


Рис. 5. Истинный спектр галогеновой лампы при 2 А и 1,5 А

Поделив значения измеренного спектра на истинный спектр, мы получим зависимость от длины волны коэффициента усиления всей установки: оптической системы, монохроматора и ФЭУ. На рис. 6 представлены зависимости коэффициентов усиления от длины волны при 2 А и 1,5 А.

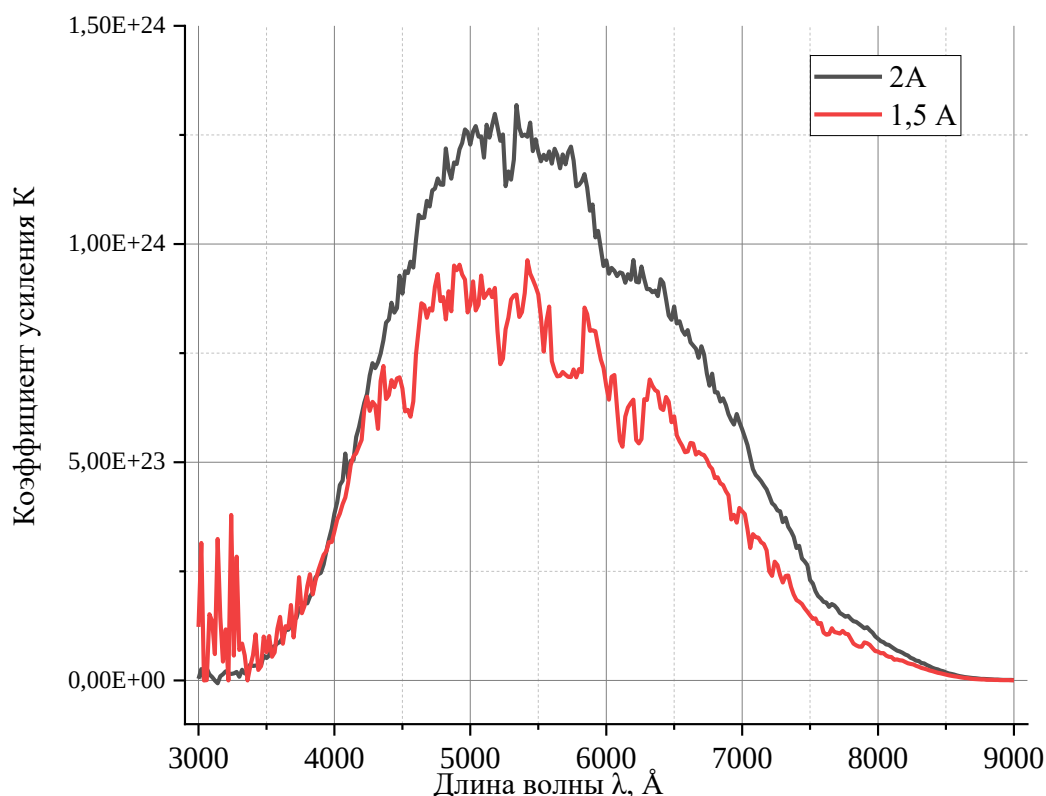


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления от длины волны при 2А и 1,5 А на источнике света

Необходимо определить коэффициент усиления только ФЭУ, для этого нужно исключить вклад оптической системы и монохроматора. В таблице 1. представлены данные измеренные с помощью измерителя мощности на входе монохроматора и на выходе монохроматора, где S_1 - размер входной щели; S_2 - размер выходной щели; P_1 – мощность, измеренная на входе монохроматора; P_2 - мощность измеренная на выходе монохроматора; K_m - коэффициент монохроматора.

красная часть спектра, 638 нм					зеленая часть спектра, 532 нм				
S_1 , мкм	S_2 , мкм	P_1 , мкВт	P_2 , мкВт	K_m	S_1 , мкм	S_2 , мкм	P_1 , мкВт	P_2 , мкВт	K_m
0,2	2,7	510	0,37	1378,37	0,2	2,7	560	77	7,27
0,2	2,2	510	0,37	1378,37	0,2	2,2	560	0,5	1120
0,2	1,5	510	0,37	1378,37	0,2	1,5	560	0,0095	58947,37
0,2	1	510	0,35	1457,14	0,2	1,2	560	0,0065	86153,85
0,2	0,5	510	0,25	2040	0,2	1	560	0,0052	107692,3
0,2	0,2	510	0,14	3642,85	0,2	0,2	560	0,001	560000

Таблица 1. Определение коэффициента усиления монохроматора

Коэффициент увеличения для длины волны 638 нм составляет порядка $6 \cdot 10^{20}$, для части спектра с длиной волны 532 нм составляет порядка $1,4 \cdot 10^{18}$.

На рис. 7. Приведен спектры интенсивности излучений с длиной волны 638 нм и 532 нм.

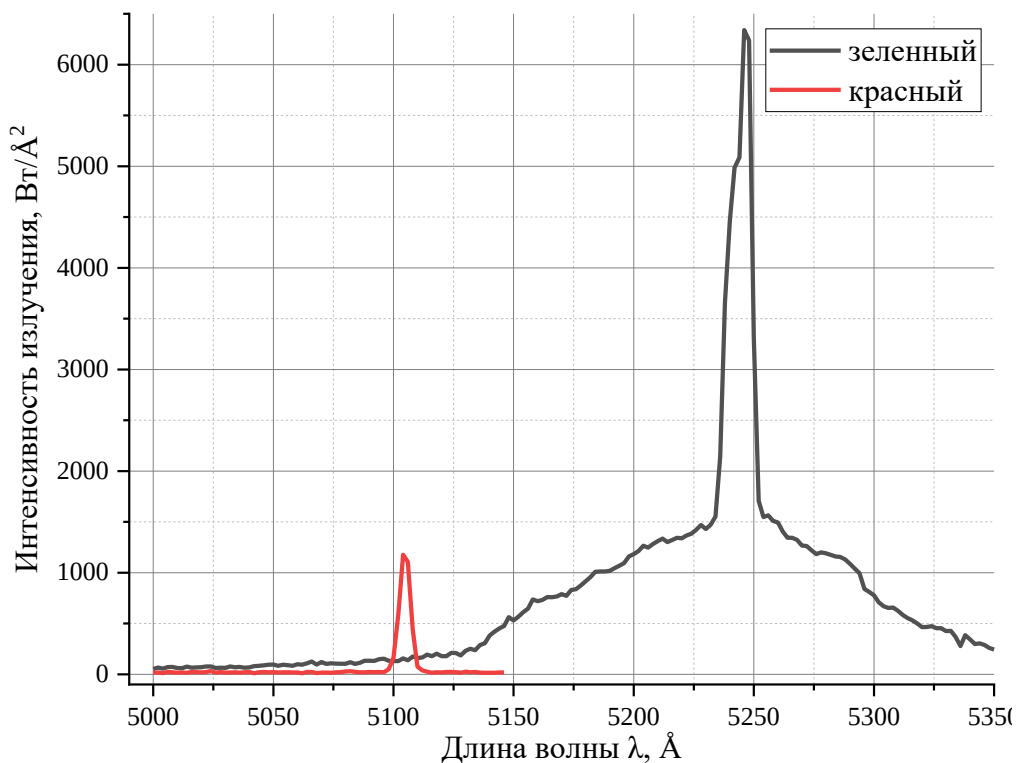


Рис. 7. Спектры интенсивности излучений с длиной волны 638 нм и 532 нм

4. Вывод

В работе был рассмотрен принцип работы фотоэлектронного умножителя. Определены эффекты искажающие ожидаемые результаты измерений. Найден и учтен темновой ток, при постройке спектральных зависимостей интенсивности излучения источника света от длины волны.

Рассмотрен способ нахождения яркости излучения галогеновой лампы. Построены зависимости излучения галогеновой лампы от длины волны. Найдены спектральные зависимости коэффициента усиления системы, включающей монохроматор, оптическую систему и ФЭУ, а также коэффициента только ФЭУ. Рассчитаны коэффициенты усиления ФЭУ $6 \cdot 10^{20}$ и $1,4 \cdot 10^{18}$ для излучений, длины волн которых равны 638 нм и 532 нм соответственно.

5. Список литературы

1. Д. Ф. Кузьмичев, И. А. Радкевич, А. Д. Смирнов Автоматизация экспериментальных исследований. Издательство: «Наука», 1983 г., 342 с.
2. В. И. Малышев Введение в экспериментальную спектроскопию. Издательство: «Наука», 1979 г., 480 с.
3. А. А. Жигарев Г. Т. Шамаева Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы: Учебник для вузов. Издательство «Высшая школа», 1982 г., 463 с.
4. А. М. Прохоров Физический энциклопедический словарь. Издательство «Сов. энциклопедия», 1983 г., 982 с.
5. И. М. Бронштейн Б. С. Фрайман Вторичная электронная эмиссия. Издательство: «Наука», 1969 г., 407 с.