

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Зотьева Анастасия Александровна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование зависимости коэффициента усиления ЭОП от напряжения  
между фотокатодом и анодом**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20304

**Научный руководитель:**

д. ф. – м. н. Дулин В. М.

Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Максимов В. В.

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к. т. н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## Оглавление

Аннотация .....	3
1. Введение.....	4
1.1 Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) .....	4
1.2 Классификация электронно-оптических преобразователей и усилителей .	6
1.3 Задачи .....	7
2. Объект исследования и оборудование .....	8
3. Обработка экспериментальных данных.....	10
4. Результаты.....	14
5. Выводы .....	16
6. Список литературы .....	16

## **Аннотация.**

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) широко применяются в различных областях, таких как медицина, астрономия, ядерная физика, спектроскопия, являются одним из основных элементов приборов ночного видения. Современный ЭОП представляет собой вакуумный оптоэлектронный прибор, позволяющий регистрировать быстропротекающие процессы за короткий промежуток времени (характерное время экспозиции кадра порядка наносекунд).

Целью работы являлось изучение принципа работы фотоэлектронного преобразователя и умножителя, с последующим экспериментальным исследованием зависимости интенсивности регистрируемого сигнала от коэффициента усиления. В ходе работы получены экспериментальные изображения сигнала флуоресценции паров ацетона, зарегистрированные при различном напряжении на микроканальной пластине. Проведена обработка первичных данных с целью улучшения соотношения сигнал/шум, включающая в себя осреднение изображений по времени и вычитание фонового сигнала. В результате получена экспериментально измеренная зависимость регистрируемого сигнала от коэффициента усиления.

Ключевые слова: электронно-оптический преобразователь, микроканальная пластина (MCP), флуоресценция.

Работа выполнена в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

## **1. Введение**

### **1.1. Электронно-оптический преобразователь (ЭОП)**

Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) – это фотоэлектронный вакуумный прибор, преобразующий оптическое изображение из широкой области электромагнитного спектра (от УФ до ИК диапазона) в видимую, а также усиливающий яркость видимого изображения. Широкое применение электронно-оптических преобразователей и умножителей в различных научных исследованиях обуславливается такими возможностями последнего, как регистрация электромагнитного излучения в широкой области спектра (в зависимости от типа ЭОП) с преобразованием в видимую область, высокое временное разрешение при регистрации изображений (наносекунды), высокая чувствительность, позволяющая регистрировать процессы с малой интенсивностью излучения.

На первом рисунке (Рис. 1) представлена принципиальная схема устройства электронно-оптического преобразователя и усилителя. Вакуумный блок прибора, позволяющего осуществлять регистрацию явлений характеризующихся низкой интенсивностью излучения, включает в себя три параллельно расположенных друг за другом электрода: фотокатод, микроканальная пластина (МКП), люминофорный экран (на выходное окно, изготовленное из стекла, наносится тонкий слой люминофора), между которыми осуществляется подача напряжения.

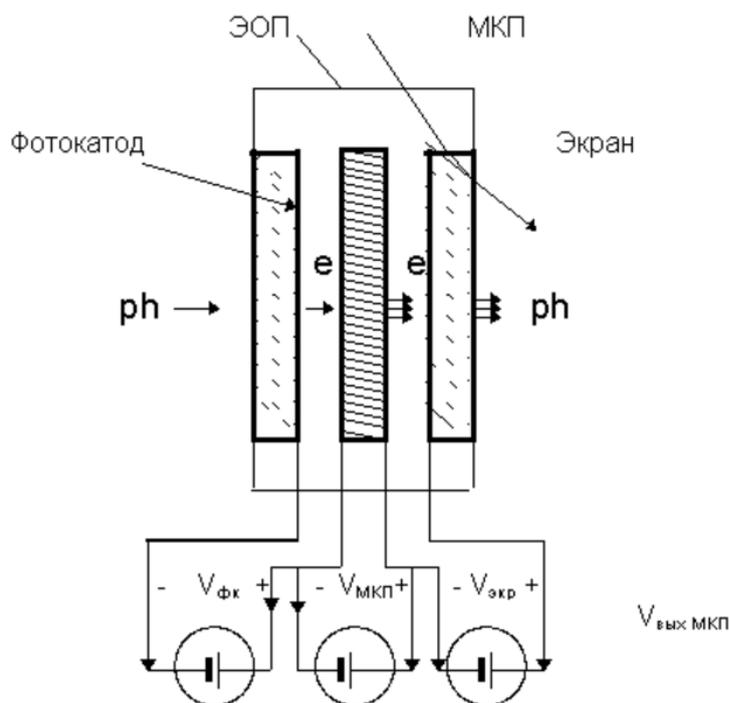


Рис. 1. Принципиальная схема электронно-оптического преобразователя и усилителя

Основной принцип работы ЭОП можно описать так: фотоны, исходящие от источника с малой интенсивностью излучения, проходя через объектив, проецируются на фотокатод. Фотоны, попавшие на фотокатод, изготовленный из полупроводниковых материалов имеющих очень низкую работу выхода, вызывают эмиссию электронов за счёт внешнего фотоэффекта. За счёт электрического поля, вызванного напряжением на фотокатод, электроны направляются в МКП. Микроканальная пластина, в свою очередь, состоит из множества проводящих каналов, имеющих достаточную электрическую проводимость на стенках, для формирования однородного электрического поля. Электрическое поле формируется электродами, расположенными на концах МКП. В каналах МКП электроны ускоряются электрическим полем и перемещаются по параболической траектории, ударяются о стенку канала с более высоким потенциалом и за счёт вторичной электронной эмиссии выбивают электроны (см. Рис. 2).

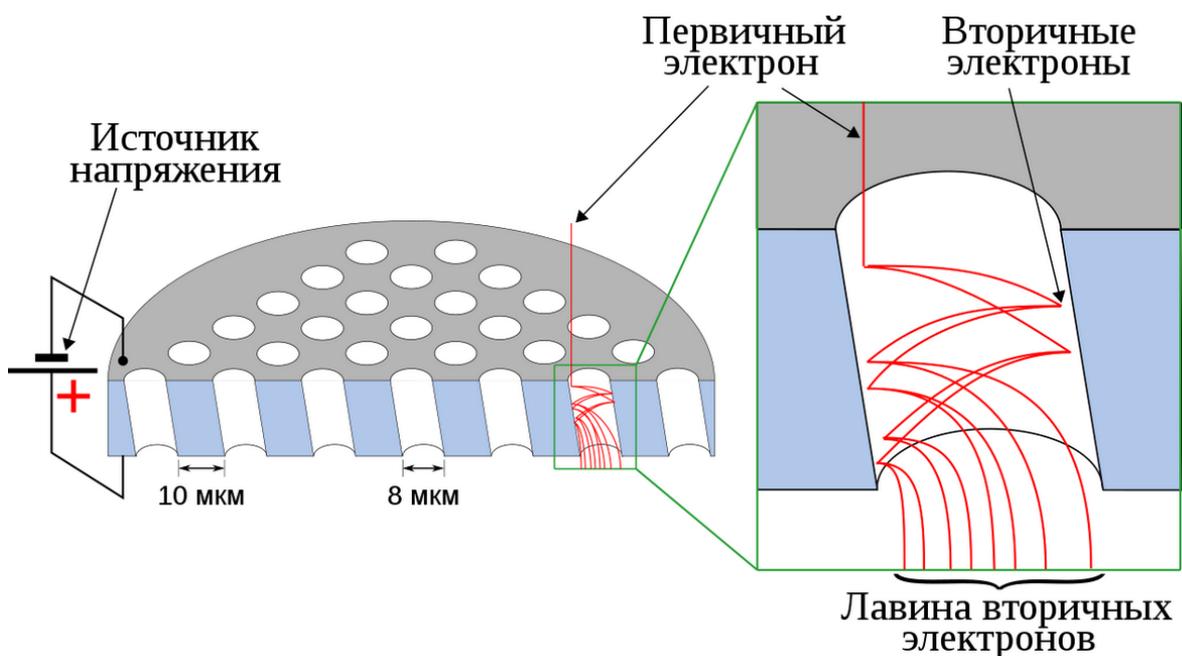


Рис. 2. Схема лавинного умножения потоков электронов на МКП.

Современные МКП устроены таким образом, чтобы каждый электрон, попавший в канал вызывал выброс нескольких электронов из МКП. Однако следует учитывать, что деформация электрического поля, вызванная, например, за счёт возникновения пространственных зарядов на стенках каналов, приводит к ограничению умножения электронов. Электрическое поле, образованное подачей напряжения на люминофорный экран, ускоряет электронный поток и направляет на экран. Люминофорный экран, взаимодействуя с потоком электронов, высвобождает фотоны. Свечение люминофорного экрана будет соответствовать распределению света и теней исходного изображения от источника с малой интенсивностью излучения. Изображение с люминофорного экрана фокусируется линзой окуляра на матрицу цифровой камеры [1-3].

## 1.2 Классификация электронно-оптических преобразователей и усилителей

Электронно-оптические преобразователи, условно делятся на поколения, каждое из которых отличается от предыдущего значительным прогрессом в коэффициенте усиления регистрируемого излучения. Самые ранние устройства, первое поколение, были не в состоянии значительно усиливать регистрируемый

низкоинтенсивный сигнал, поэтому требовали дополнительно инфракрасный источник освещения. Основным фотоэлементом являлся ЭОП с фотокатодом S1 («серебро-кислород-цезий»), который преобразовывал отражение фотонов от объекта, подсвеченного ИК-источником освещения, в изображение в видимом спектре в окуляре устройства. При этом изображение в центре окуляра было более чётким, чем по краям. Фотокатод имел чувствительность около 60 мкА/лм (микроампер на люмен) и квантовую эффективность около 1% и 0,5% в ультрафиолетовой и инфракрасной области спектра, соответственно. Развитие первого поколения ЭОП стало возможным с появлением более эффективных полупроводниковых материалов, из которых изготавливали фотокатоды, повысившие чувствительность и квантовую эффективность, что привело к достижению значительных уровней усиления. Так же, значительно была повышена чёткость изображения проецируемого на окуляре прибора. Второе поколение ознаменовало собой появление в схеме устройства прибора микроканальной пластины, на которую накладывается большая разность потенциалов до 1000 вольт. Устройства этого поколения имеют ручную регулировку яркости, позволяющую выбрать соотношение уровня собственных шумов прибора и усиления яркости. Третье поколение сформировалось с внедрением нового вида полупроводникового фотокатода на основе арсенида галлия, который более чувствителен в диапазоне 800-900 нм, чем фотокатоды второго поколения.

### **1.3. Задачи**

Целью моей курсовой работы являлось исследование зависимости коэффициента усиления ЭОП от напряжения на МКП. Для ее выполнения были поставлены следующие задачи:

1. Изучить принцип работы измерительной системы, состоящей из цифровой камеры и электронно-оптического преобразователя и усилителя.
2. Обработать полученные экспериментальные данные, усреднив для каждого коэффициента усиления ЭОП по сто мгновенных изображений и вычтя соответствующий средний фоновый сигнал.

3. Установить связь между коэффициентом усиления ЭОП и напряжением на МКП, сравнить с теоретической зависимостью.

## **2. Объект исследования и оборудование**

В моей курсовой работе объектом исследования была флуоресценция паров ацетона, зарегистрированная в специальной кювете с оптическим доступом, обеспеченным за счёт окон, изготовленных из кварцевого стекла, оптически прозрачных как в видимой, так и в ультрафиолетовой частях спектра. Флуоресценция — это физический процесс, заключающийся в испускании кванта энергии в виде фотона при переходе электронов в возбужденном атоме на более низкое энергетическое состояние. Пары ацетона поступали в кювету с помощью специального питателя с жидким ацетоном, через который продувается воздух с постоянным расходом 0,5 литра в минуту. Расход воздуха задавался и контролировался с помощью расходомера-регулятора.

В данной работе флуоресценция паров ацетона индуцировалась с использованием ультрафиолетового лазерного излучения. Для создания лазерного излучения использовался лазер на красителе (Sirah Precision Scan), который накачивался с использованием твердотельного Nd:YAG лазера. В качестве красителя использовался родамин 6Ж. Длина волны, генерируемая лазером на красителе, удваивалась и составляла порядка 283 нм с энергией в импульсе порядка 10 мДж. Лазерный луч с использованием системы призм доставлялся в коллиматор, где разворачивался в лазерный нож, высотой порядка 50 мм и толщиной порядка 1 мм. Лазерный нож, проходил через кювету, возбуждая в ней пары ацетона. Флуоресценция паров ацетона регистрировалась цифровой камерой (ImagerPro, разрешение 5 мегапикселей, динамический диапазон 16 бит), сопряжённой с электронно-оптическим преобразователем и усилителем (Intensified Relay Optics). Изображение флуоресценции на фотокатод ЭОП фокусировалось с помощью кварцевого объектива, так как значительная часть спектра флуоресценции паров ацетона приходится на ультрафиолетовую область. Схема экспериментальной системы представлена на рисунке 3.

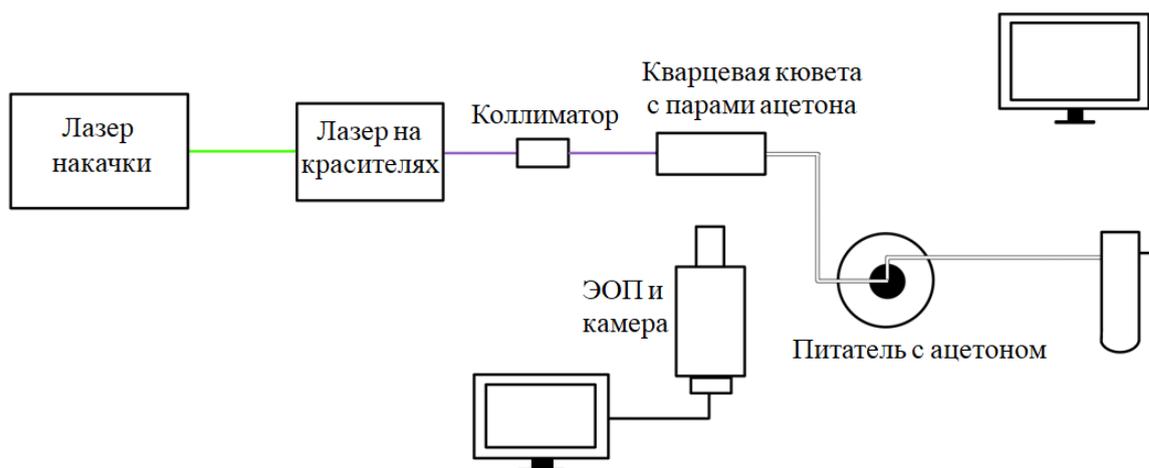


Рис. 3. Схема экспериментальной системы.

Принципиальная схема системы регистрации флуоресценции паров ацетона представлена на рисунке 4. Сигнал флуоресценции фокусируется с помощью объектива на фотокатод, на котором фотоны преобразуются в электроны за счёт внешнего фотоэффекта. За счет подачи напряжения на электроды ЭОП, электроны с помощью электрического поля направляются в МКП, где происходит их умножение, а затем попадают на люминофорный экран и преобразуются обратно в фотоны. Далее фотоны фокусируются системой линз на матрицу цифровой камеры. Записанное камерой изображение передаётся на компьютер. Сигнал флуоресценции паров ацетона регистрировался при различном напряжении на микроканальной пластине. Для используемого в работе оборудования напряжение на МКП пропорционально коэффициенту усиления, которое устанавливается на ЭОП во время регистрации сигнала. Коэффициент усиления варьировался от 20 до 100% с шагом в 5%.

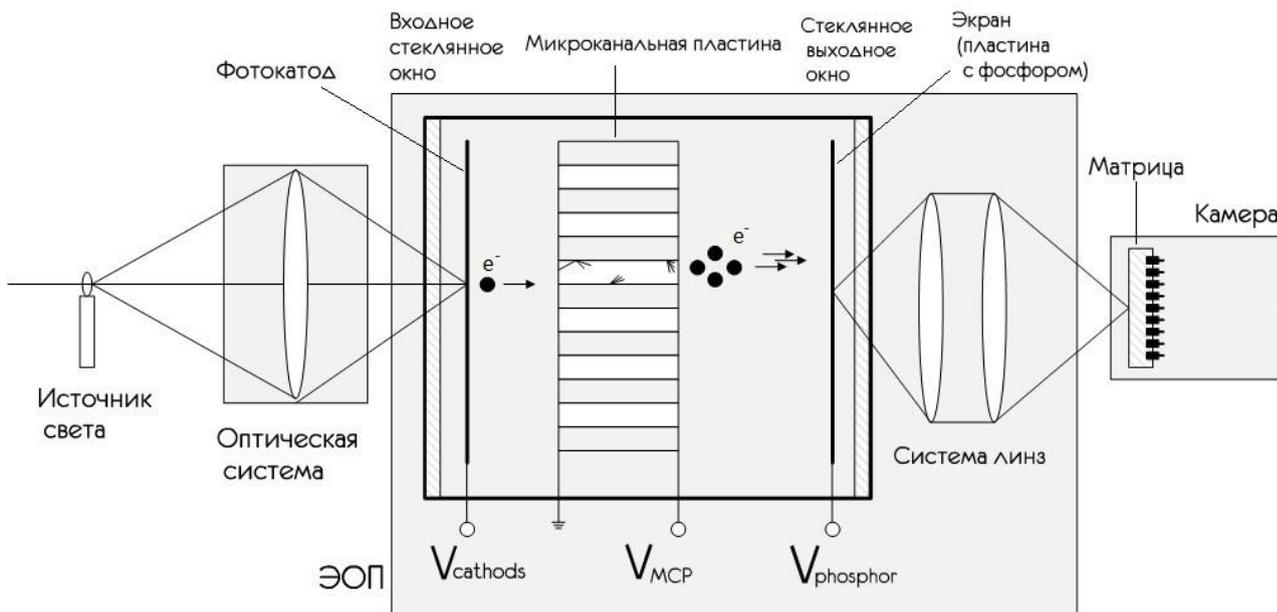


Рис. 4. Устройство используемой в эксперименте измерительной системы.

### 3. Обработка экспериментальных данных

Из литературы известно, что интенсивность излучения флуоресценции  $I_{LIF}$  в упрощённом виде может быть выражена следующим образом:

$$I_{LIF} = c \times I_{\text{лазера}} \times N(\rho, T) \times f(T) \times B \times \Gamma(\rho, T) \times \phi \quad (1)$$

где,  $c$  – константа, зависящая от параметров измерительной системы;  $I_{\text{лазера}}$  – интенсивность лазерного излучения;  $N(\rho, T)$  – плотность молекул в исследуемом объеме;  $f(T)$  – функция распределения Больцмана, задающая населённость электронного уровня;  $B$  – коэффициент Эйнштейна, характеризующей вероятность поглощения при переходе электрона между энергетическими уровнями;  $\Gamma(\rho, T)$  – спектральное перекрытие лазерного излучения и линии поглощения молекул;  $\phi$  – квантовый выход флуоресценции [4, с. 528, формула 7.31].

В связи с тем, что все измерения были проведены на одну и ту же измерительную систему, с одинаковой концентрацией паров ацетона в исследуемом объеме, при одинаковой температуре, на одной и той же длине

волны лазерного излучения, можно выразить главные факторы, от которых зависит сигнал, регистрируемый цифровой камерой  $I_{камеры}$  следующим выражением:

$$I_{камеры} = I_{лазера} \times k \times (I_{LIF} + I_{фон}) \quad (2)$$

где,  $k$  – коэффициент усиления ЭОП, пропорциональный напряжению на МКП;  $I_{фон}$  – интенсивность фона, включающего в себя переотражения лазерного излучения и тепловой шум матрицы камеры;

Для коррекции вклада фона в сигнал, регистрируемый измерительной системой, для каждого коэффициента усиления проводилась запись изображений из кюветы с работающим лазером, но без подачи паров ацетона, чтобы исключить флуоресценцию. Для этого, ацетоновый питатель перекрывался и отсоединялся от системы подачи воздуха в кювету. Через кювету в течение не менее чем одной минуты продувался чистый сухой воздух с расходом 5 литров в минуту, контролируемый расходомером-регулятором. После этого проводилась регистрация изображений фона.

Энергия лазерного излучения от импульса к импульсу меняется. Для используемой лазерной системы среднеквадратичное отклонение энергии составляет порядка 5 %. Для уменьшения ошибки, вносимой пульсациями энергии лазера, для каждого коэффициента усиления, как при регистрации флуоресценции паров ацетона, так и при регистрации фона, была проведена регистрация 100 мгновенных изображений, с последующим осреднением. Затем из среднего изображения с флуоресценцией паров ацетона вычиталось среднее изображение фона. Пример изменения зарегистрированного сигнала флуоресценции в зависимости от пульсаций энергии лазерного излучения на мгновенных изображениях продемонстрирован на рисунке 5. Примеры осредненных по времени изображений флуоресценции и фона, зарегистрированных камерой, представлены на рисунке 6.

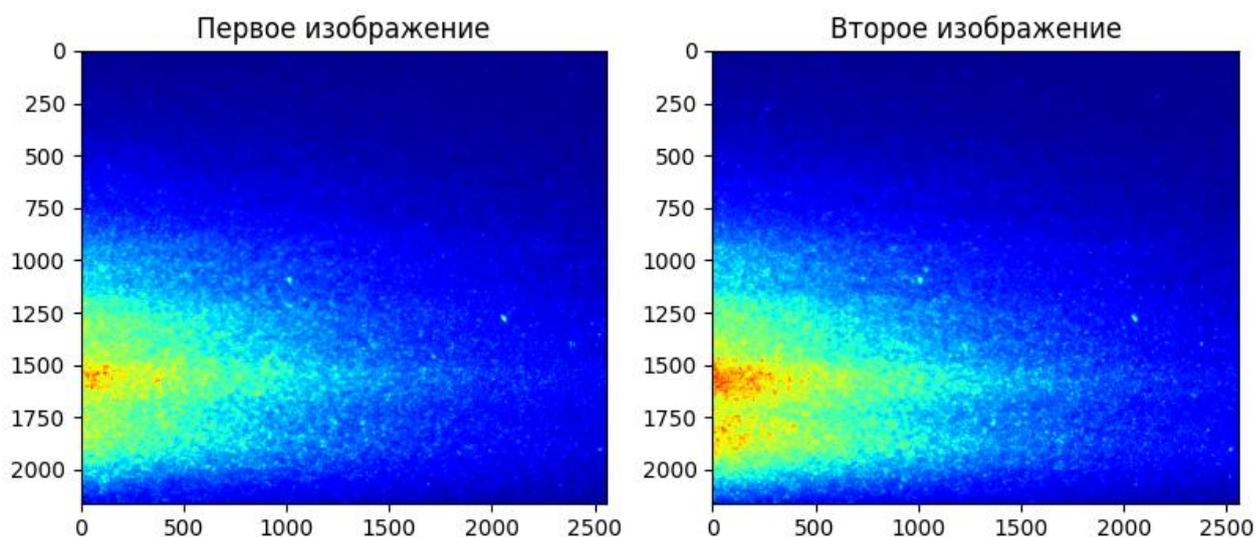


Рис. 5. Различные мгновенные изображения флуоресценции при усилении в 100 %  
(значения осей в пикселях).

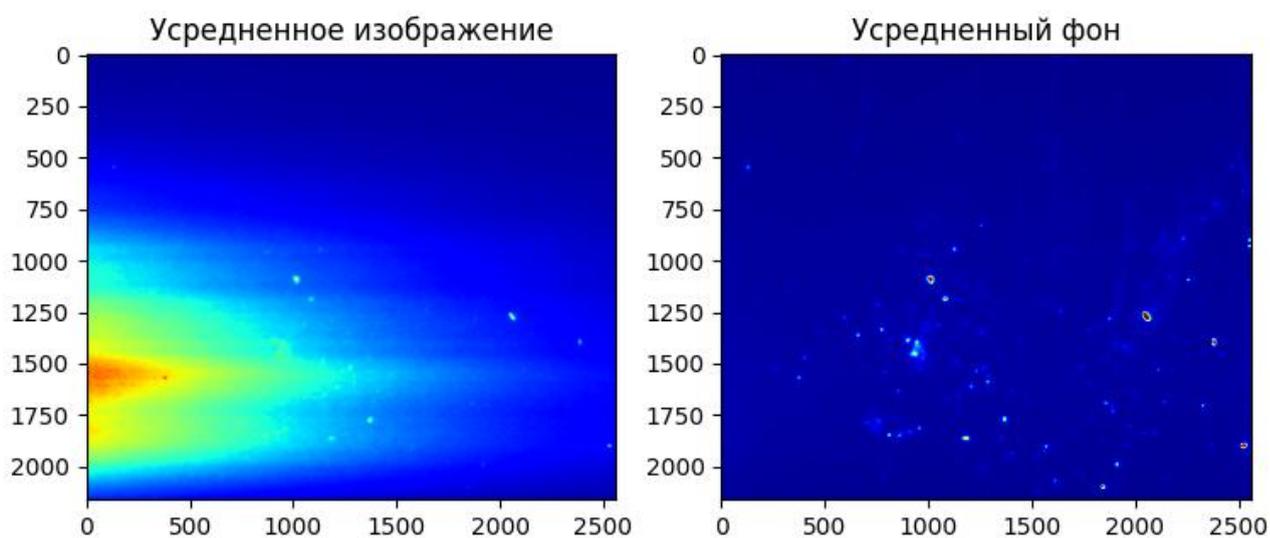


Рис. 6. Среднее изображение флуоресценции (слева) и фона (справа) для усиления в 100%

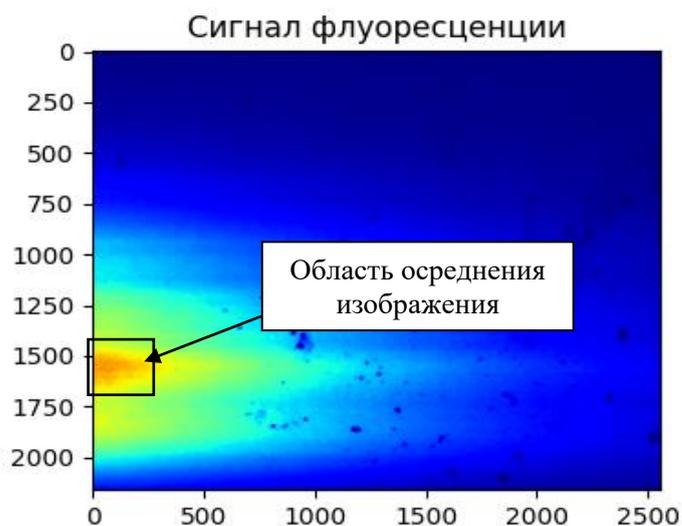


Рис. 7. Результирующее изображение после обработки. Черный прямоугольник  
показывает область осреднения изображения

Пример среднего изображения после процедуры обработки изображений представлен на рисунке 7. Область, по которой усредняли значения в каждом пикселе изображения, для получения значения интенсивности сигнала флуоресценции от соответствующего коэффициента усиления показана прямоугольником. Область, по которой проводилось осреднение интенсивности на изображения, выбиралась из следующих соображений, связанных с особенностью вычета фона в данной постановке эксперимента. На окне кюветы, через которую смотрит камера, присутствовали различные дефекты, на которых проходило переотражение лазерного излучения. Однако для случая, когда пары ацетона присутствовали в кювете, за счёт поглощения лазерного излучения, интенсивность переотражений на этих дефектах была ниже, чем для случая, когда регистрировались изображения фона. Для того чтобы исключить влияние некорректного вычитания фона, связанного с особенностями кюветы, осреднение изображения, по результатам которого в последствие строился график зависимости интенсивности сигнала, зарегистрированного камерой от усиления на ЭОП, проводилось в области, удовлетворяющей двум параметрам: наличие максимального сигнала флуоресценции и отсутствие дефектов кюветы.

Обработка данных проводилась с помощью написания программы на языке Python версии 3.7. Процесс обработки состоял из нескольких процедур, для работы которых использовались некоторые встроенные и дополнительно загруженные модули. Блок-схема обработки данных, описанная ранее, приведена на рисунке 8.



Рис. 8. Блок-схема программы регистрации и обработки экспериментальных данных

#### 4. Результаты

В результате обработки измеренной базы данных, общим объемом порядка 35 Гб, были получены значения интенсивности сигнала флуоресценции, зарегистрированные цифровой камерой при различных значениях усиления на ЭОП. Полученные значения интенсивности были нанесены на график, где по оси ординат откладывается интенсивность сигнала флуоресценции паров ацетона, зарегистрированных цифровой камерой после работы ЭОП, а по оси абсцисс – коэффициент усиления (Рис. 9). В результате, на графике наблюдаются три области. В диапазоне значений коэффициента усиления от 0 до 55% сигнал, зарегистрированный камерой, практически не растёт с ростом коэффициента усиления. В диапазоне значений коэффициента усиления от 55 до 95% интенсивность сигнала растет экспоненциально. В третьей области от 95 до 100% наблюдается существенное замедление роста сигнала от коэффициента усиления, что вероятно связано с формированием

пространственных зарядов на стенках каналов МКП, приводящих к ограничению умножения электронов из-за деформации электрического поля.

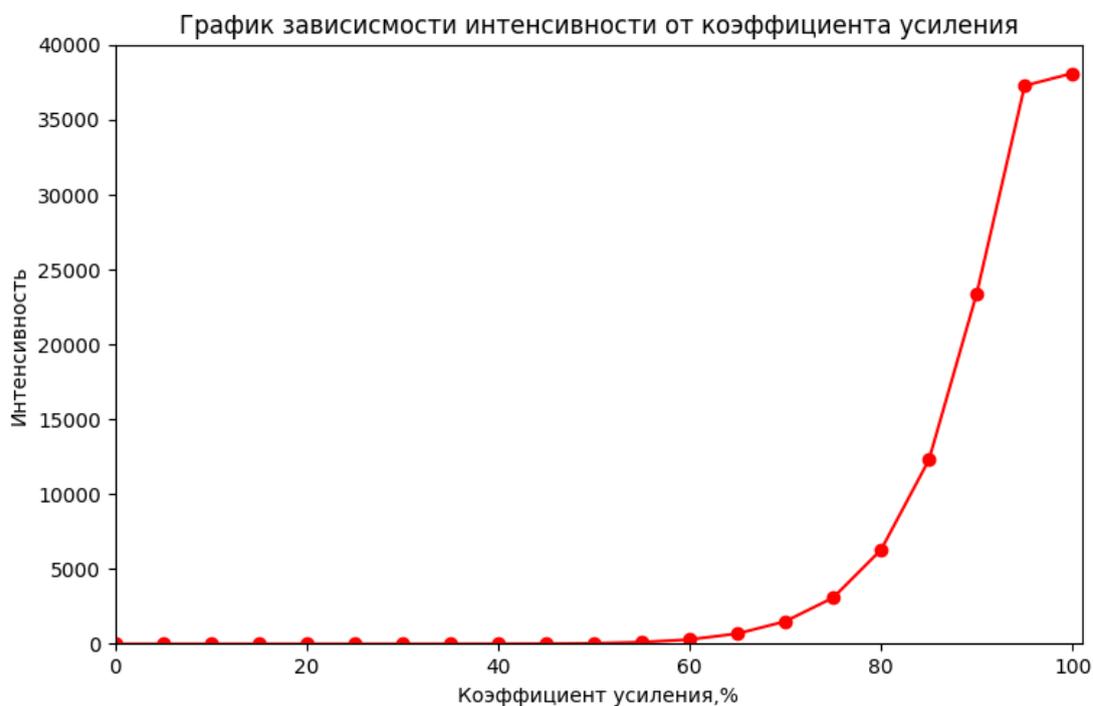


Рис. 9. График зависимости интенсивности от коэффициента усиления

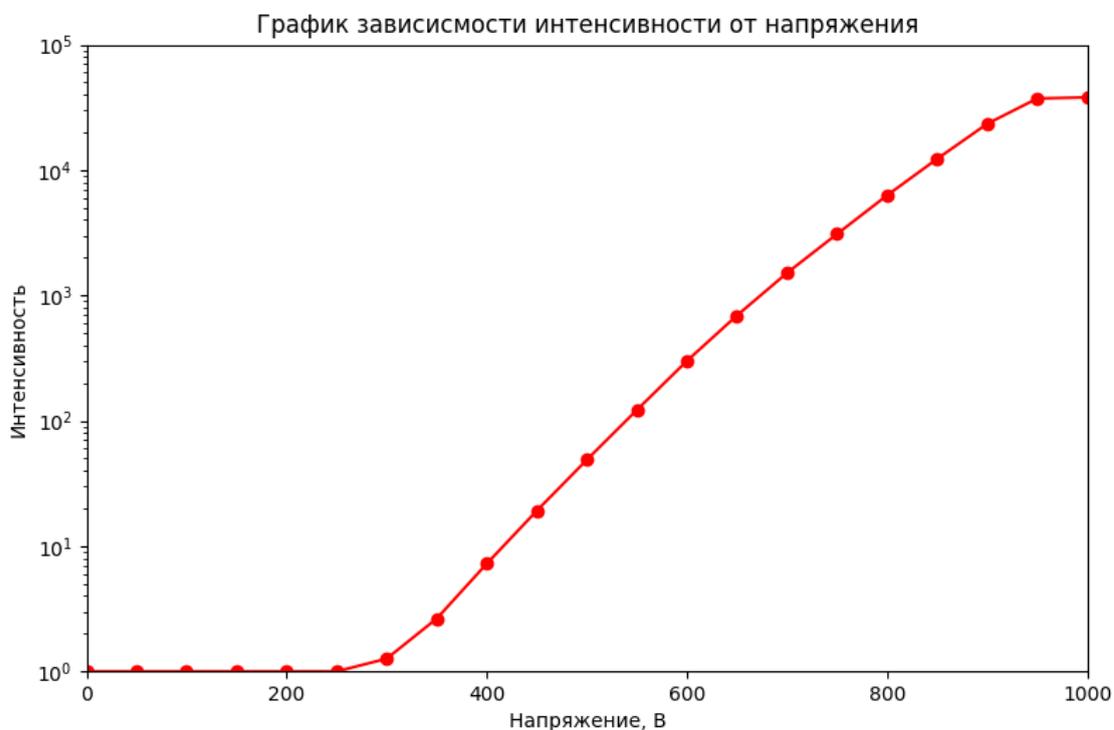


Рис. 10. График зависимости интенсивности от напряжения

Для того чтобы связать коэффициент усиления, который задавался на ЭОП, с напряжением на МКП было использовано руководство по эксплуатации измерительной системы, в частности касаясь Intensified Relay Optics. Из полученной информации, было установлено, что усиление 0% соответствует отсутствию напряжения на МКП, а усиление 100% соответствует напряжению порядка 1000 Вольт. Полученный график представлен на рисунке 10. Следует отметить, что ось ординат представлена в логарифмической шкале.

За проведённую работу и помощь благодарю своего научного руководителя Дулина В. М. и младшего научного сотрудника Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН Лобасова А. С.

## **5. Выводы**

В результате выполнения работы был изучен принцип работы измерительной системы, состоящей из цифровой камеры и электронно-оптического преобразователя и усилителя. Было проведено экспериментальное исследование зависимости интенсивности сигнала флуоресценции паров ацетона от значения напряжения на микроканальной пластине. Для этого была проведена обработка полученных экспериментальных данных, включающая в себя осреднение по ста мгновенным изображениям и вычитание соответствующего фонового сигнала для каждого значения коэффициента усиления ЭОП. Была определена связь между коэффициентом усиления ЭОП и напряжением на МКП. Полученная зависимость согласуется с теоретической.

## **6. Список литературы**

1. Юфа В. Н. Изучение аппаратной функции электронно-оптического преобразователя. М.: МФТИ. 34 с.
2. Зайдель И. Н., Куренков Г. И. Электронно-оптические преобразователи. М.: изд. «Советское радио», 1970. 56 с.
3. Michael Lampton (November 1, 1981). "The Microchannel Image Intensifier". Scientific American. 245 (5): 62–71.

4. Kowalewski T., Ligrani P., Dreizler A., Schulz C., Fey U. (2007) Temperature and Heat Flux. In: Tropea C., Yarin A.L., Foss J.F. (eds) Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Springer Handbooks. Springer, Berlin, Heidelberg.