

Электронно-оптический преобразователь

Дьячковский Леонид ФФКЭ, гр Б04-108

Луговцов Глеб ФФКЭ, гр Б04-108

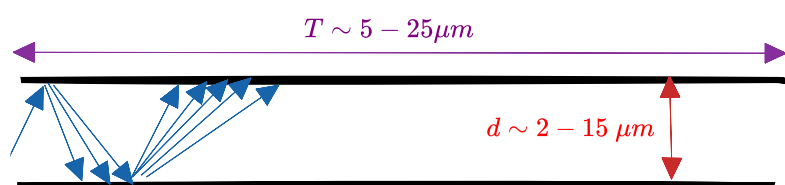
Шмаков Владимир ФФКЭ, гр Б04-105

МФТИ, апрель 2023

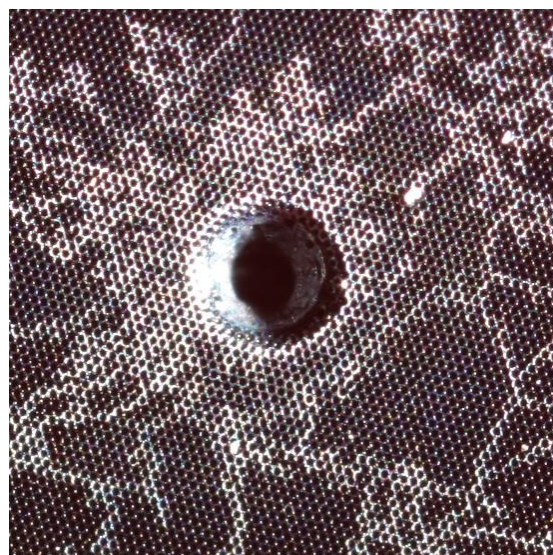
Введение

Основным элементом электронно-оптического преобразователя(далее ЭОП) лежит многоканальная пластина. Многоканальная пластина состоит из множества стеклянных каналов, выложенных в виде сот.

При прохождении электрона через канал, он многократно отражается от стенок, тем самым провоцирует вторичную эмиссию. Для ускорения потока электронов вдоль канала создается электрическое поле, путём приложения напряжения между концами каналов МКП.



Вторичная эмиссия в канале МКП



Многоканальная пластина

Рисунок 1. Слева — возникновение вторичной эмиссии в канале МКП. Справа — фотография многоканальной пластины

Для увеличения коэффициента усиления, используют несколько каскадов МКП. При использовании двух каналов коэффициент усиления достигает 10^7 , а при использовании трёх каскадов - 10^9 .

Вследствие большого коэффициента усиления, МКП часто используется в приборах, работающих с излучением малой интенсивности. Примерами таких устройств могут служить:

1. Приборы ночного видения
2. Приборы электронной спектроскопии и микроскопии
3. Приборы для рентгеновской астрономии
4. Приборы для ядерных исследований

Цель работы

- Исследование принципов работы ЭОП
- Экспериментальное получение зависимостей:
 - Интенсивности света от напряжения на экране
 - Интенсивности от напряжения на катоде
 - Интенсивности от напряжения на МКП
- Нахождение отклика ЭОП на возмущения от различных источников света

Оборудование

- Спектрограф
- Набор светофильтров
- ЭОП
- Лабораторные источники питания
- Светодиод

Устройство электронно-оптического преобразователя

Электронно-оптический преобразователь представляет собой электровакуумную колбу, внутри которой размещены фотокатод, люминесцентный экран, фокусирующая и ускоряющая электронно-оптические системы. Для усиления используется многоканальная пластина, принцип работы которой описан во введении.

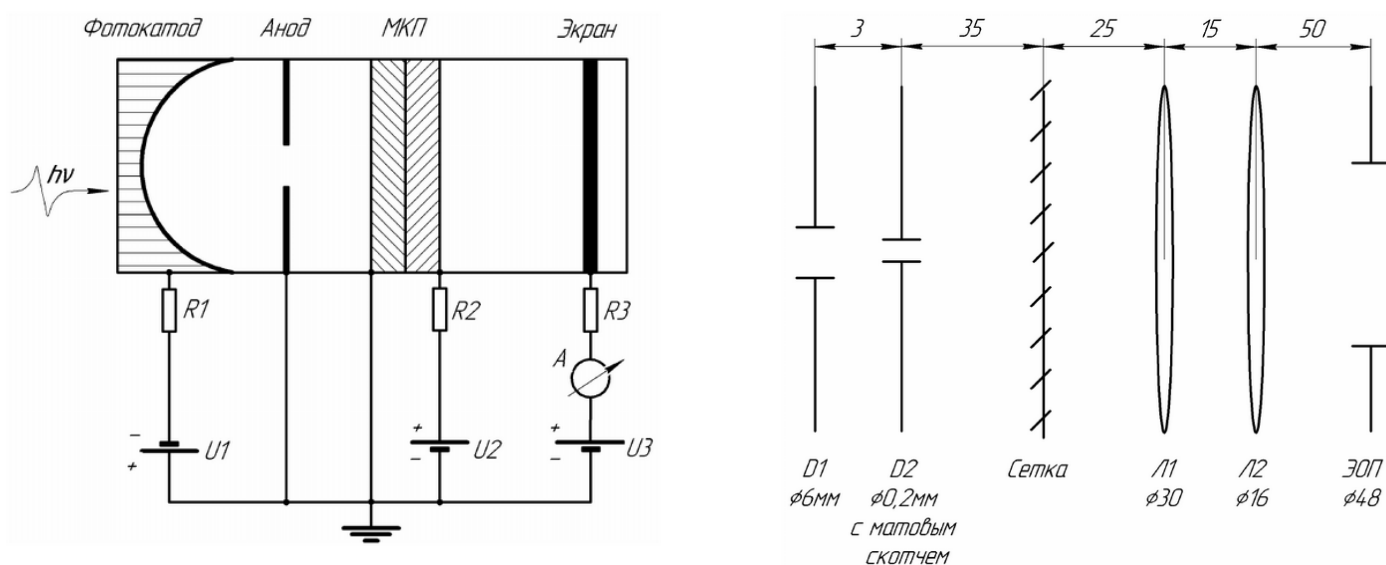


Рисунок 2. Справа — схема подключения ЭОП. Слева — оптическая схема формирования изображения на экране ЭОП

Устройство ЭОП изображено на рисунке выше. Входное оптическое излучение попадет на фотокатод. С некоторой вероятностью, электрон выбивается с поверхности фотокатода и

летит в сторону анода.

Сферическая форма фотокатода, и форма анода образуют иммерсионную электронную линзу. Так, на экране ЭОП формируется изображение.

Чтобы ускорить электроны, и задать им верное направление движения, между фотокатодом и анодом прикладывается некоторая разность потенциалов.

Для усиления сигнала, в схеме предусмотрена многоканальная пластина. Трубки пластины наклонены под углом $\sim 5^\circ$. Так, исключается возможность прямого пролёта первичного электрона.

Поток электронов, усиленный МКП ускоряется в промежутке между выходной плоскостью МКП и экрана. Изображение на экране регистрируется с помощью веб — камеры.

Обработка результатов эксперимента

Изучение спектра источника излучения, и используемых по ходу работы светофильтров

При помощи спектрографа изучим спектры светодиода, используемого в качестве источника света. Также изучим спектры светофильтров, которые используются в работе.

По ходу работы пригодятся такие характеристики светофильтров как резонансная длина волны, и ширина пропускания. Ширина пропускания может быть оценена из соображений добротности (падение интенсивности на -3 Db), либо из соображений падения интенсивности на порядок.

При помощи стандартных средств языка **python** прочитаем данные, полученные со спектрометра. Исходные данные выглядят так:

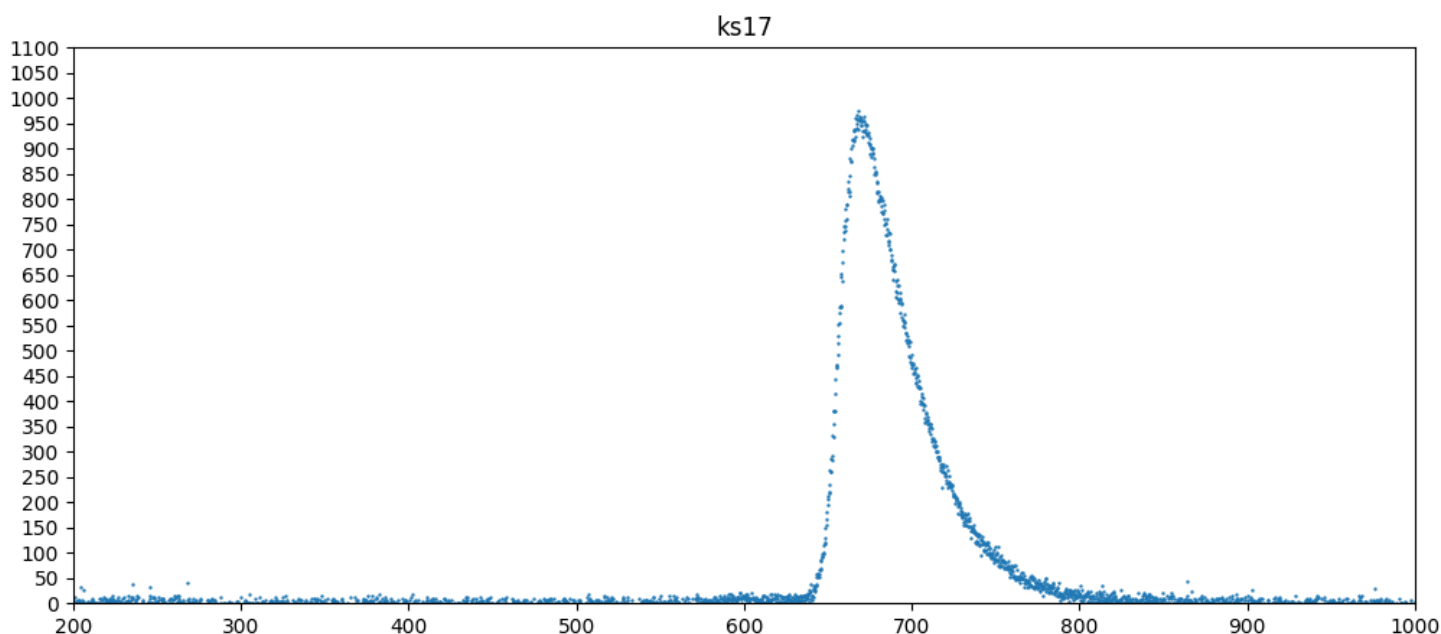


Рисунок 3. Визуализация исходных данных, полученных со спектрометра. Светодиод пропущен через светофильтр **KS17**

Данные получены при разных значениях **integration time**. Для получения интенсивности фотонов, падающих на спектрометр в единицу времени, поделим столбец интенсивности на характерное время измерения(**integration time**).

Данные удобно представить в относительных единицах, поделив на максимально зарегистрированную интенсивность. Полученные спектры представлены на рисунке 4:

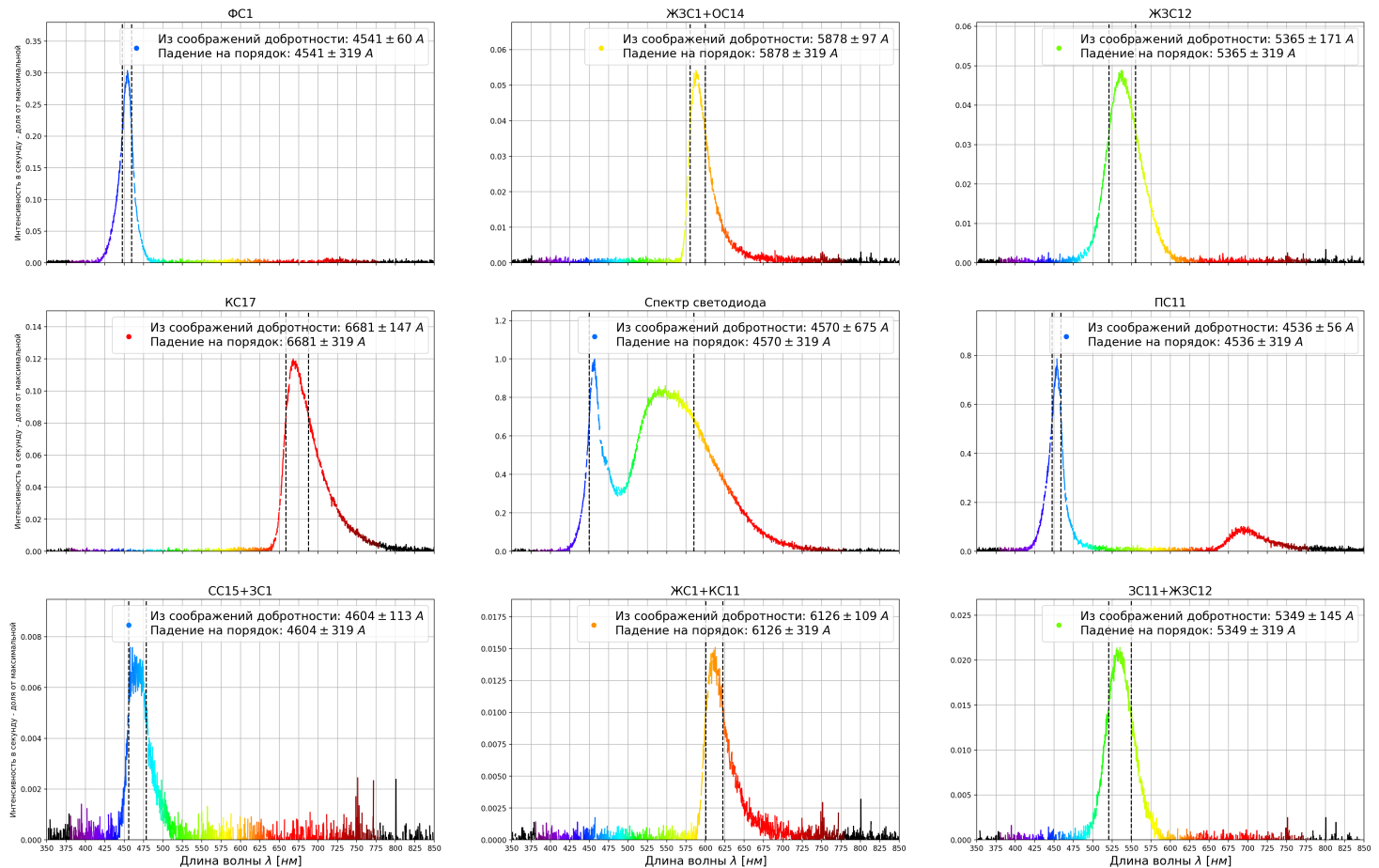


Рисунок 4 - спектры различных светофильтров. Посередине представлен спектр светодиода, используемого в качестве осветителя

Варьирование напряжения на МКП

Зафиксируем напряжение на катоде и экране:

$$U_{cat} = 3.48 \text{ кВ} - \text{напряжение на катоде}$$

$$U_{scr} = 3.51 \text{ кВ} - \text{напряжение на экране}$$

Будем варьировать напряжение на МКП, и регистрировать отклик — суммарную яркость света, падающего на экран. Получим следующие данные:

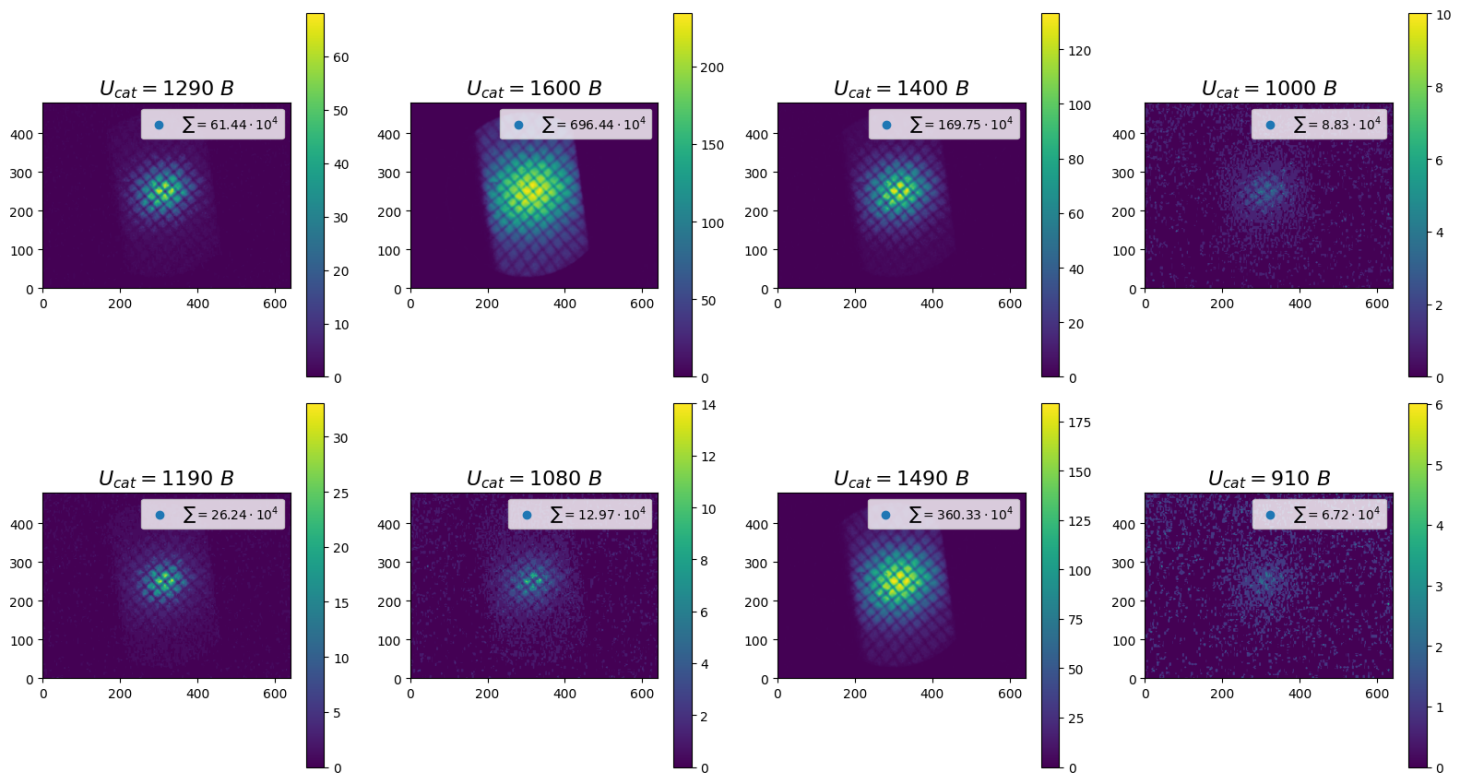


Рисунок 5. Фотографии сетки при различных напряжениях на МКП. Напряжение на катоде и экране фиксированно

Для оценки погрешности вычисления суммарной яркости, во время проведения эксперимента было зафиксировано изображение сетки при выключенном светодиоде.

Так, можно оценить амплитуду шума (свет от удаленных источников, шум квантования):

Изображение при выключенном источнике освещения

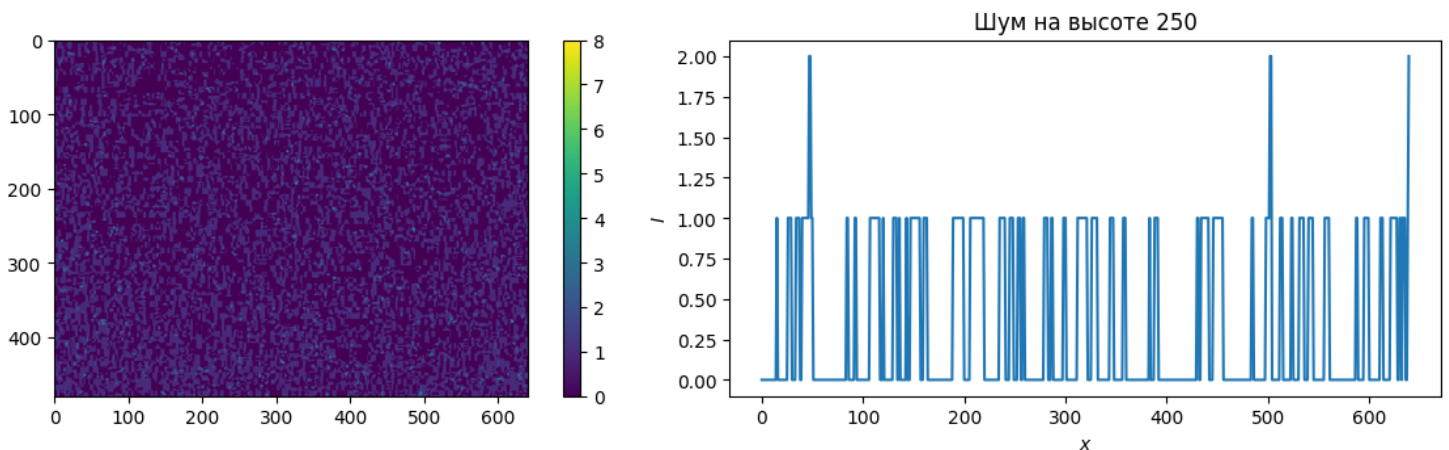


Рисунок 6. Фотография сетки при выключенном источнике освещения

Теоретически — картина шума статична. Поэтому при вычитании из экспериментальных изображений "шумного", должны получиться более чистые кадры. Однако на рисунке 7 показано, что данная гипотеза неверна:

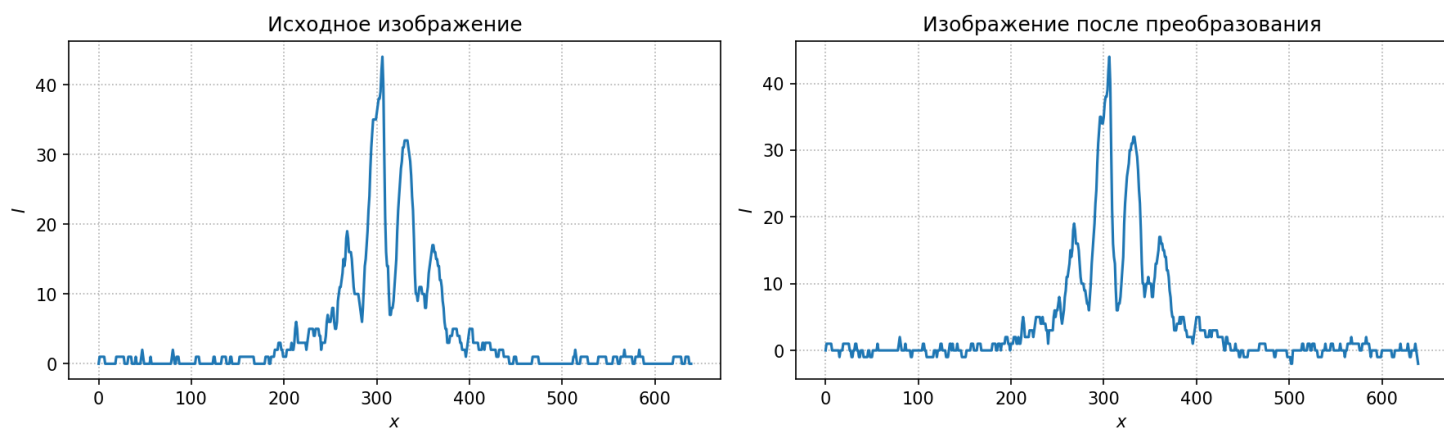


Рисунок 7. Вычитание шумного изображения. Как видим, количество шумов увеличилось (результат вычитания лежит ниже оси $x = 0$)

В связи с тем, что гипотеза оказалась неверна. По ходу эксперимента будем пользоваться не модифицированными ч.б. изображениями сетки. Для оценки погрешности заметим, что средняя амплитуда шума - 3 (как видно на рисунке 6). Так, итоговая ошибка $3/256 \sim 1\%$.

Построим график зависимости суммарной яркости от напряжения на МКП. Для большей наглядности отнормируем ось y на максимально зарегистрированное значение:

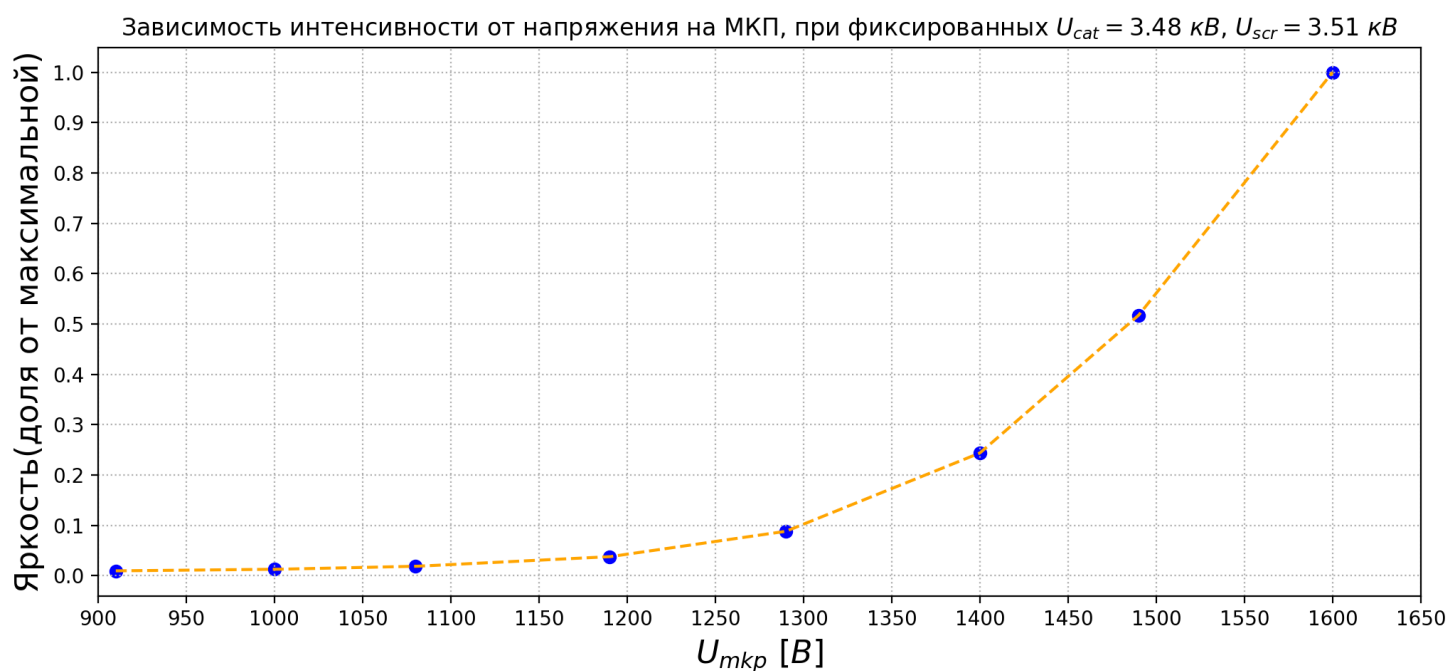


Рисунок 8. Суммарная яркость изображения при различных напряжениях на МКП.

При росте напряжения между пластинами МКП, растёт и энергия вторичных электронов. А значит большее число электронов выбивается при вторичной эмиссии — растёт коэффициент вторичной эмиссии. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии $\delta = n_2/n_1$ представлена на рисунке 9:



Рисунок 9 - Зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии первичных электронов. Как видим, при росте энергии $\epsilon_{п}$ наблюдается рост σ . Рост прекращается при достижении критического значения

Источник — [большая советская энциклопедия](#)

Характер роста яркости представленный на рисунке 8 похож на теоретический. На рисунке 10 можем наблюдать зависимость коэффициента усиления при различных напряжениях между концами трубки МКП. Зависимость получена группой японских ученых в 1961 году. Ссылка на журнал представлена в конце работы.

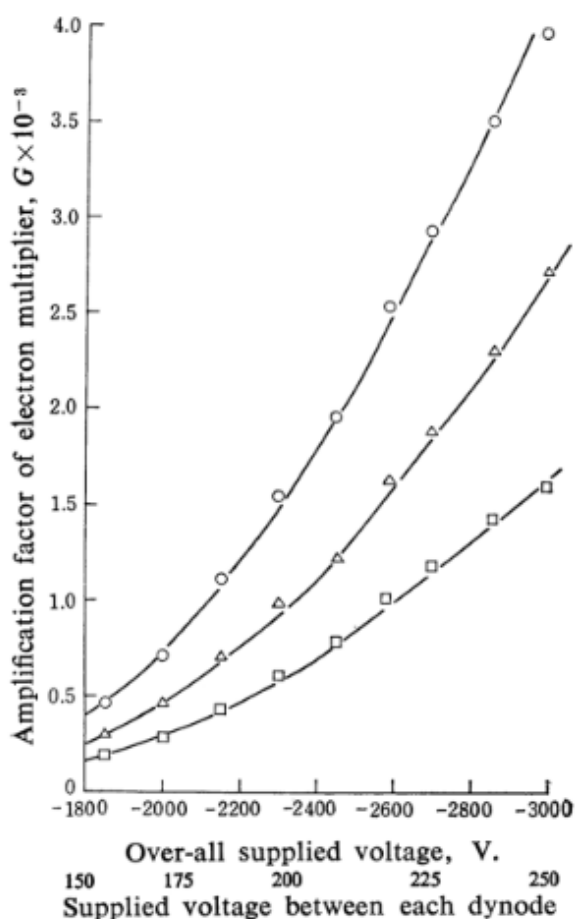


Fig. 6. Amplification factor of the electron multiplier tube using the electro-polished dynodes, as functions of supplied voltage to conversion dynode for inert gas ions. Circular, triangular and square points indicate results for $^4\text{He}^+$, $^{20}\text{Ne}^+$ and $^{40}\text{Ar}^+$ ions, respectively.

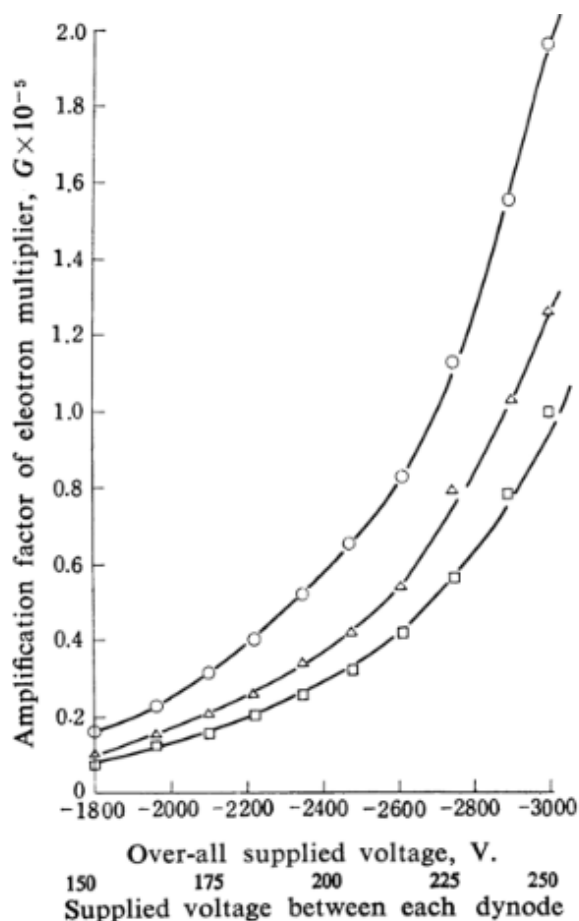


Fig. 7. Amplification factor of the electron multiplier tube constructed by the activated dynodes, as functions of supplied voltage to conversion dynode for inert gas ions. Circular, triangular and square points indicate the results for $^4\text{He}^+$, $^{20}\text{Ne}^+$ and $^{40}\text{Ar}^+$ ions, respectively.

Рисунок 10 - зависимость коэффициента усиления от напряжения между концами трубки.

Автор статьи - [Toshio Sugiura](#)

Варьирование напряжения на катодe

Теперь, зафиксируем напряжения на экране и МКП - $U_{scr} = 3.51 \text{ кВ}$, $U_{mkp} = 1.26 \text{ кВ}$. Варьируя напряжения на катодe, получим несколько изображений сетки. Изображения представлены на рисунке 11:

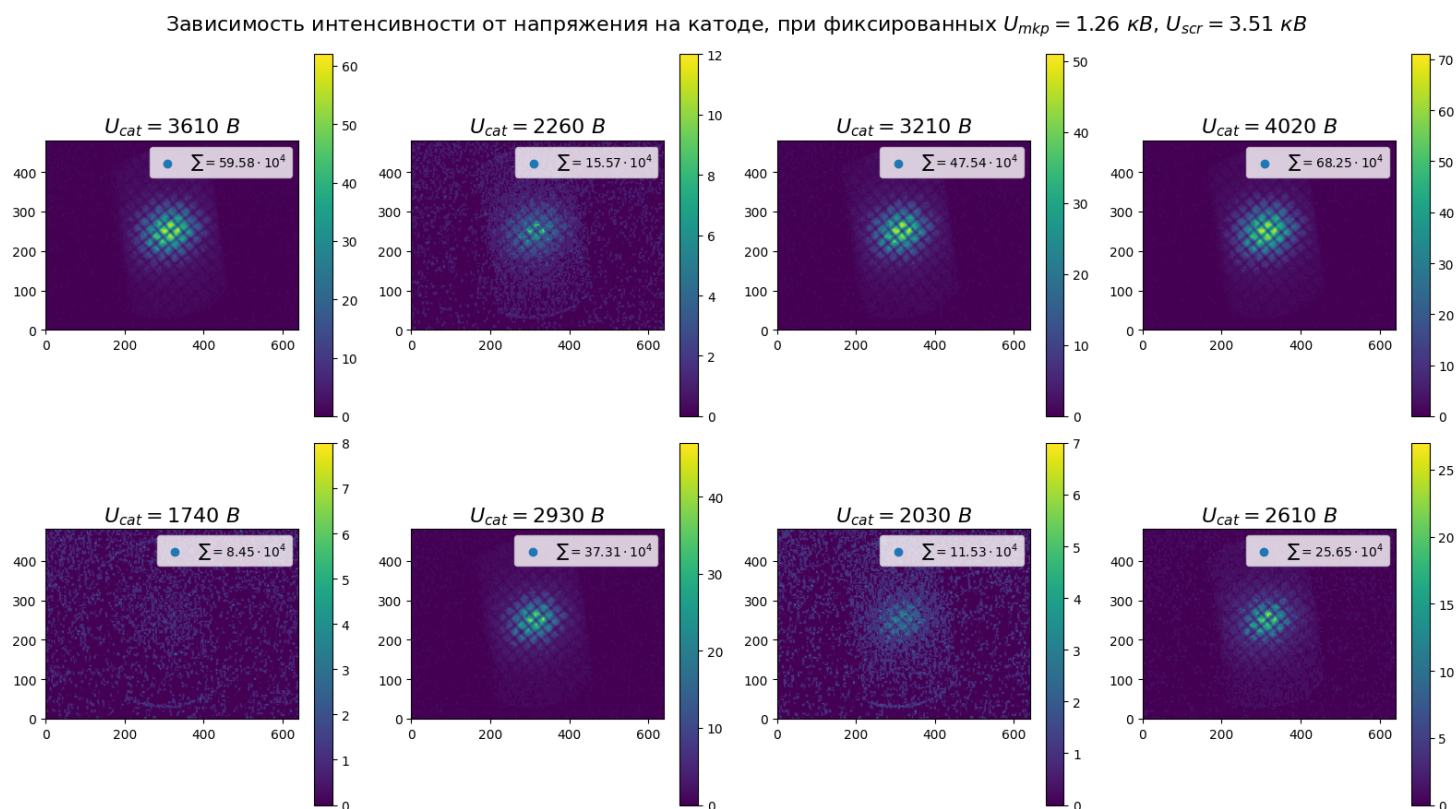


Рисунок 11 - изображения сетки при различных напряжениях на катодe. Напряжения на мкп и экране неизменны

Построим график по полученным данным. Для более наглядного представления, отнормируем ось y на максимально зарегистрированное значение.

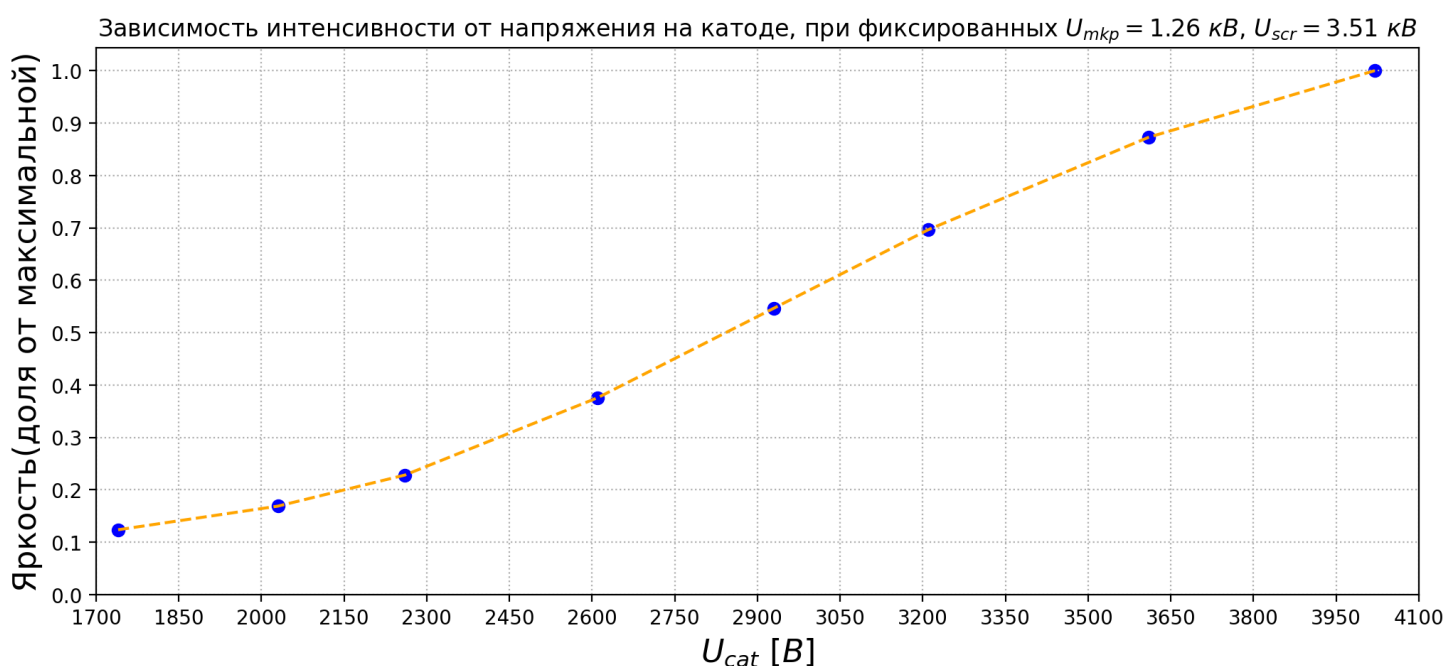


Рисунок 12 - зависимость суммарной яркости от напряжения на катодe.

Зависимость, полученная в эксперименте представлена на рисунке 12. В левой части графика наблюдается сильный экспоненциальный рост. Затем рост ослабляется и кривая выходит на насыщение.

Насыщение происходит при достижении максимального значения коэффициента вторичной эмиссии(зависимость представлена на рисунке 9). Теоретически, после прохождения критической точки суммарная яркость падает с ростом напряжения.

Сравним нашу зависимость с табличной. На рисунке 13 наблюдается похожий характер роста кривой(точное совпадение не наблюдается - в нашей работе трубки мкп изготовлены из другого материала):

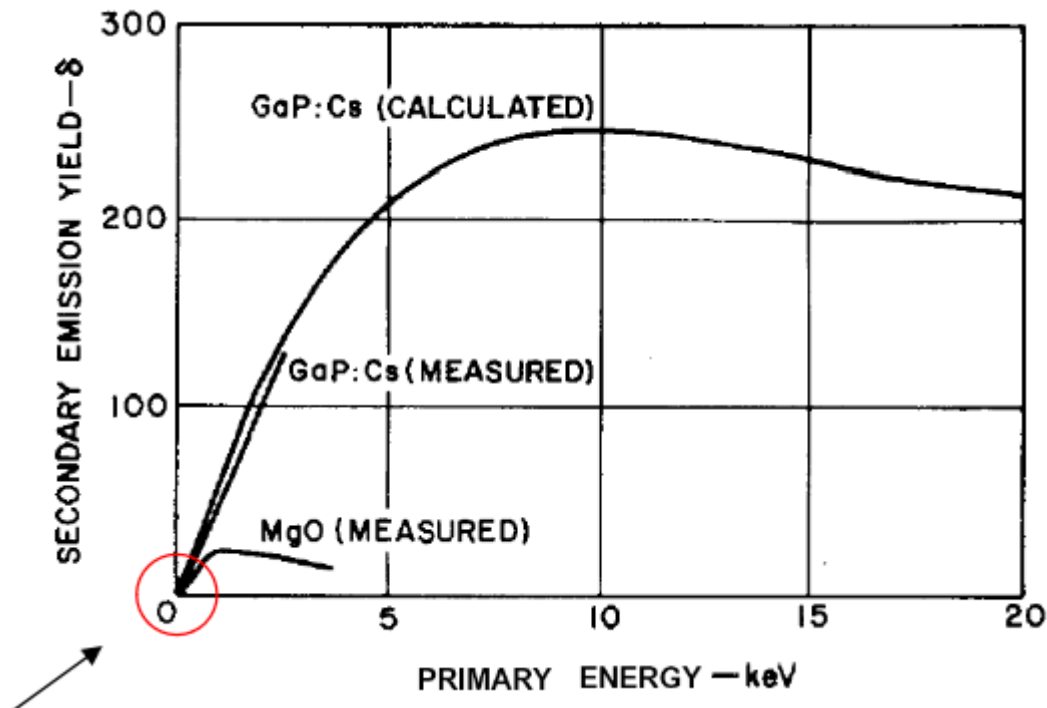


Рисунок 13 - зависимость количества вторичных электронов от энергии первичного.

Варьирование напряжения на экране при фиксированных напряжениях на катоде и мкп

Зафиксировав напряжения на катоде и мкп, посмотрим как меняется изображение при изменении напряжения на экране. При $U_{cat} = 3.48 \text{ кВ}$, $U_{mкп} = 1.26 \text{ Кв}$ получили следующие данные:

Зависимость интенсивности от напряжения на экране, при фиксированных $U_{cat} = 3.48 \text{ кВ}$, $U_{mkr} = 1.26 \text{ кВ}$

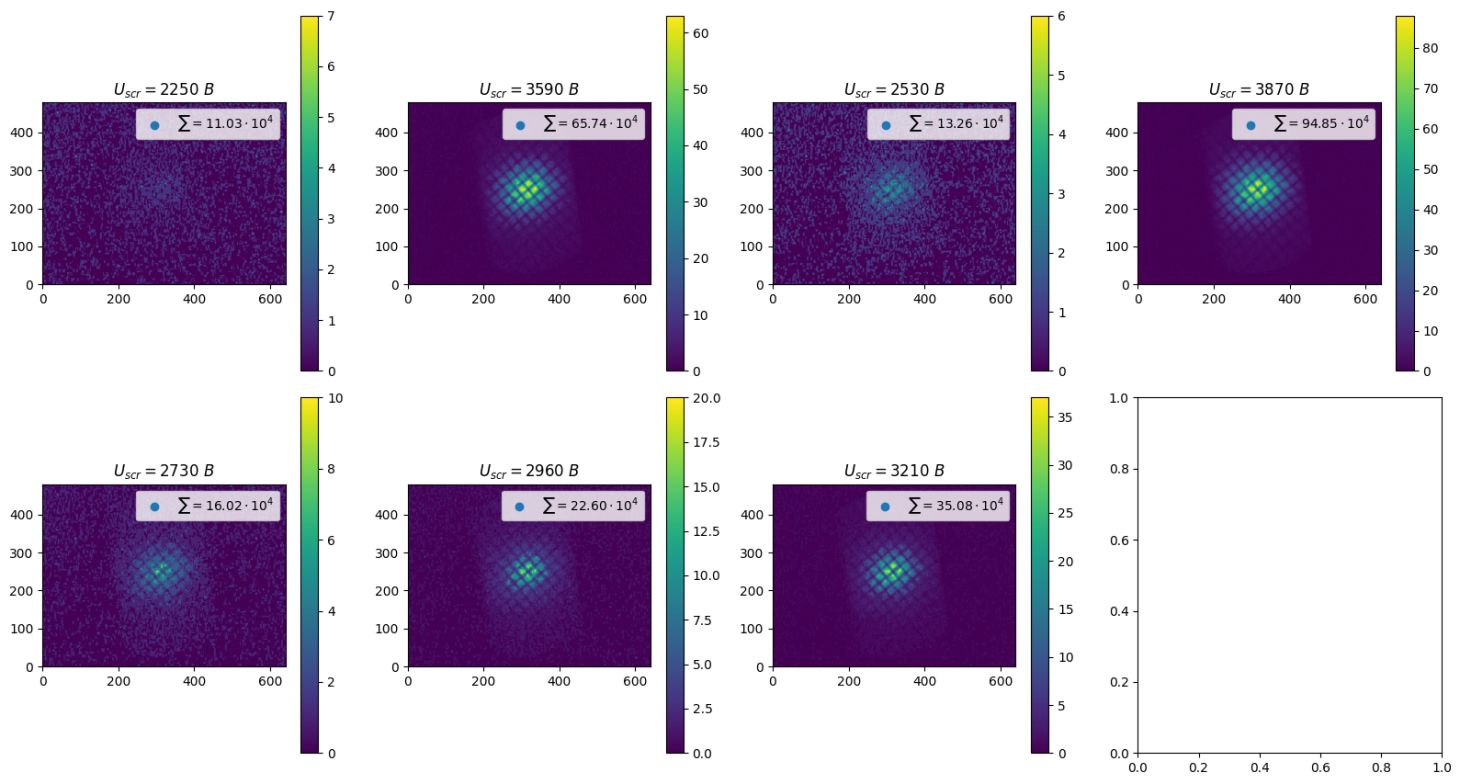


Рисунок 14 - изображения сетки при различных напряжениях на экране. Напряжения на катодe и мкп фиксированы.

Изобразим зависимость на графике, предварительно отнормировав ось y на максимальное значение:

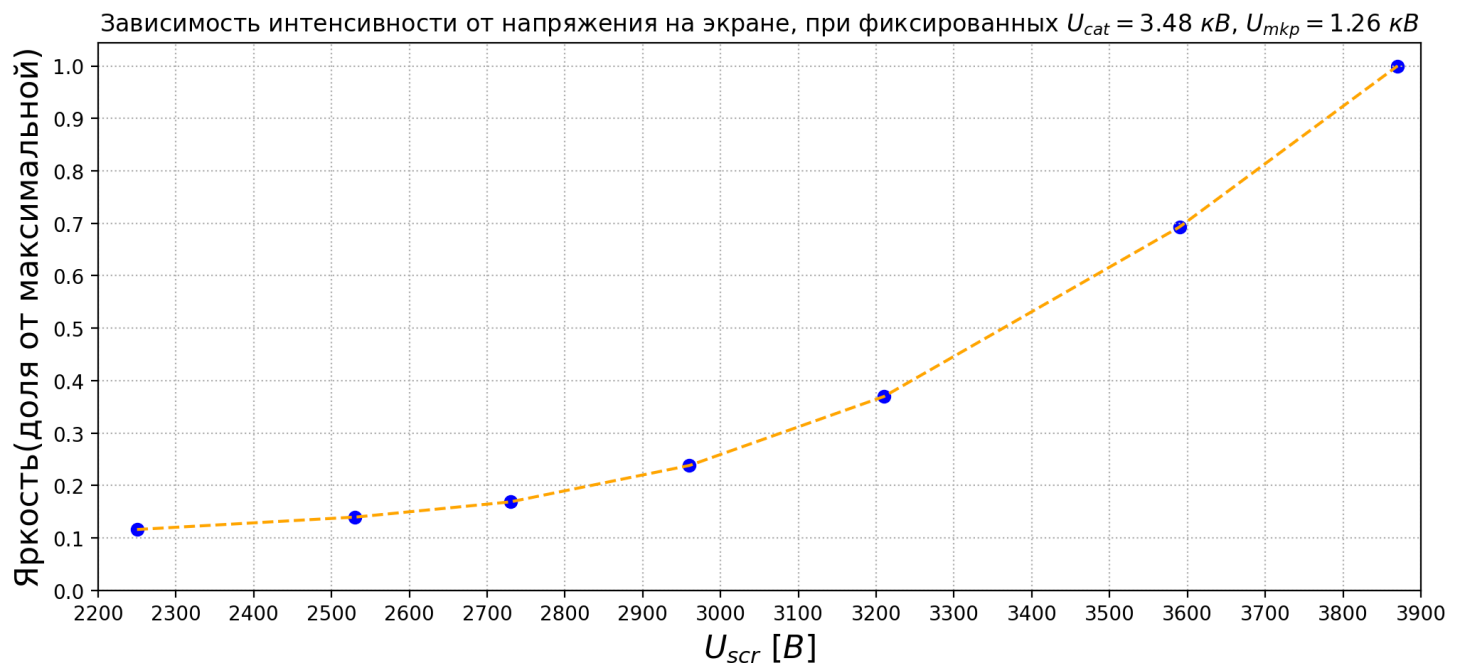


Рисунок 15 - зависимость яркости от напряжения на экране

Наблюдаемая функция вновь возрастает. График напоминает зависимость представленную на рисунках 10 и 8. Почему так происходит?

В нашем эксперименте напряжение на экране влияет лишь на энергию электронов, испущенных правой плоскостью мкп. Свечение люминофорного происходит благодаря

вторичной электронной эмиссии. Так на рисунке 15 - снова косвенно наблюдаем зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичного электрона.

АЧХ(спектр) электронно-оптического преобразователя

Зафиксируем все параметры системы. Излучение светодиода будем пропускать через различные светофильтры(или комбинации светофильтров). Результаты эксперимента представлены на рисунке 16:

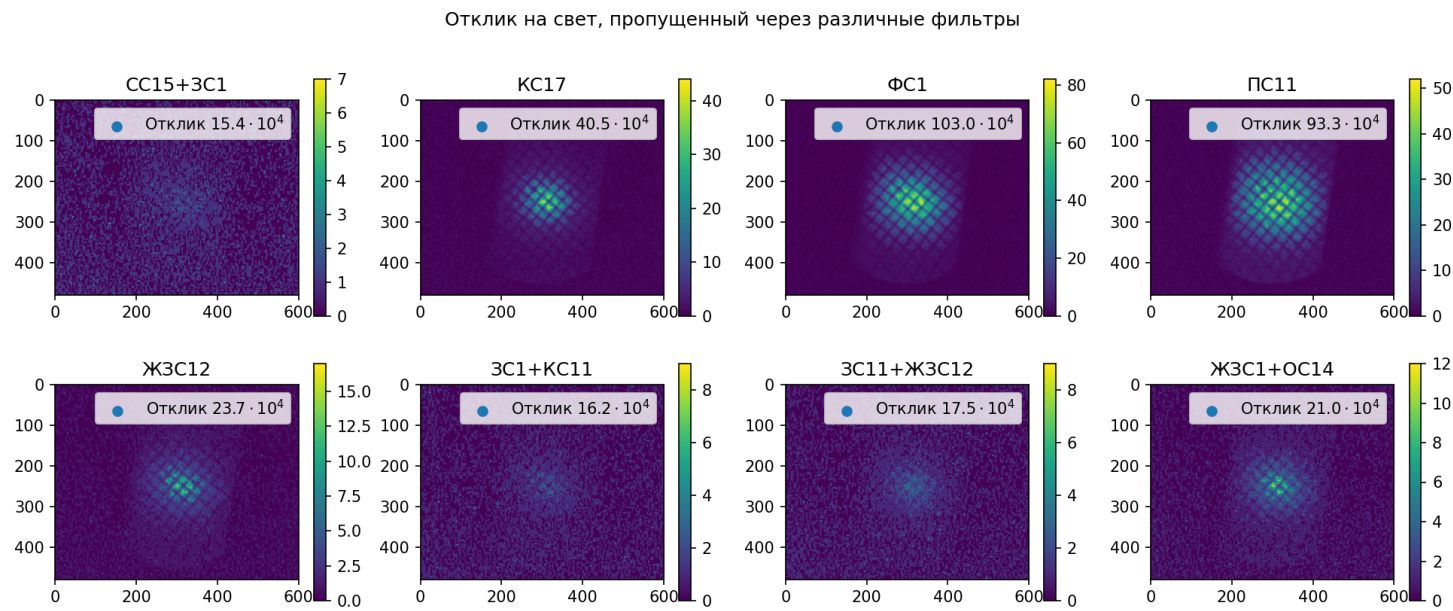
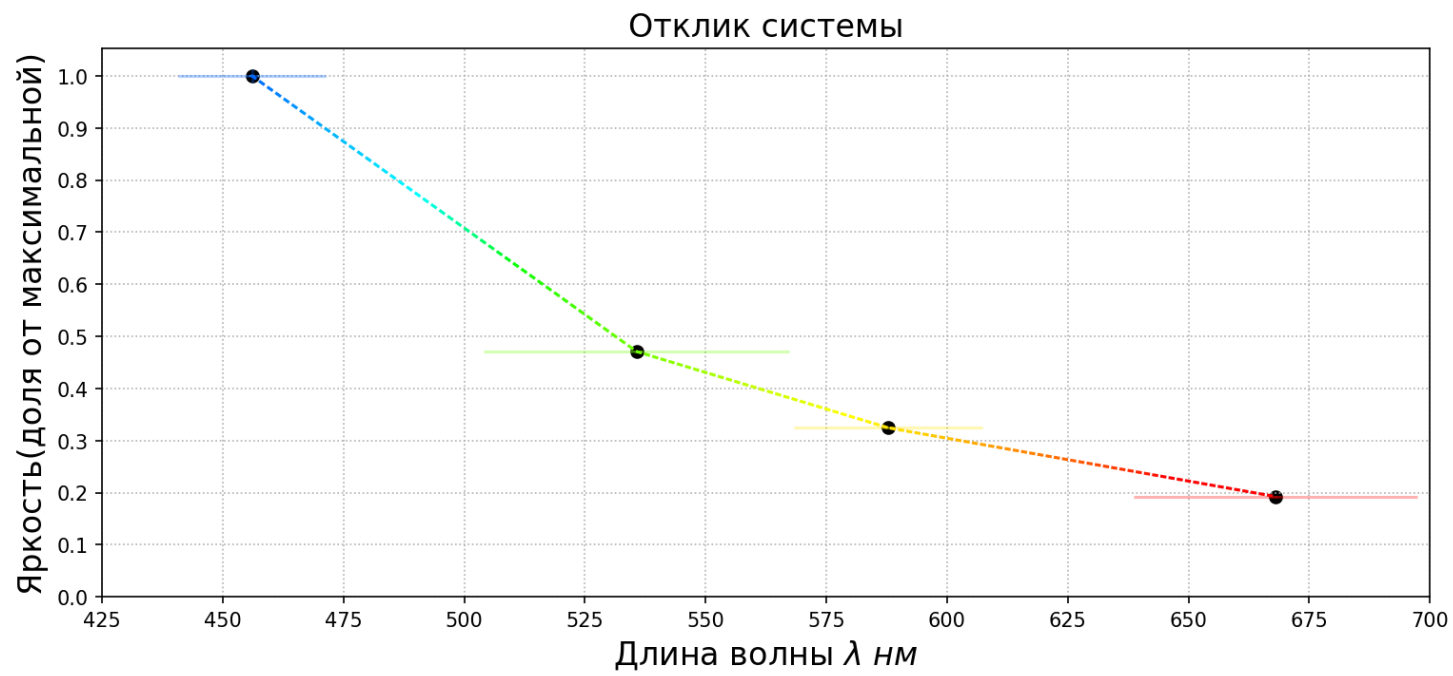


Рисунок 16 - отклик на свет, пропущенный через различные фильтры

Рассчитаем отклики на возбуждения от света с различными длинами волн. Узнать длину волны и степень немонахроматичности источника позволяет первый пункт эксперимента, результаты которого представлены на рисунке 4.

К сожалению, светофильтры оказались очень широкими. Отклики на близких частотах пришлось усреднить. Вследствие чего получили сильно квантованный график, состоящий всего из четырёх точек:



Теоретически, график должен напоминать гиперболу. Так как энергия электрона обратно пропорциональна длине волны.

Тяжело судить о полученной зависимости по четырём точкам. Можно лишь сказать, что отклик действительно убывает с ростом длины волны.

Вывод

В ходе эксперимента мы познакомились с работой ЭОП.

Полученные в пунктах 2 - 4 зависимости сходятся с теоретическими. Основой описания работы ЭОП служит зависимость показателя ВЭЭ от энергии первичного электрона.

Для более точного эксперимента следует измерять силу тока на различных элементах схемы. Вместо светодиода и множества светофильтров — пользоваться лазерами свет от которых практически монохроматичен.

Приложение

Литература и статьи

- [Презентация о фотоумножителях — Мичиганский университет](#)
- [Статья японских ученых о фотоумножителе, используемом в масс спектрометре](#)
- Большая советская энциклопедия — зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии первичного электрона
- Щука А.А. - принцип работы люминесцентного экрана

Прочее

Код может быть найден в репозитории [ShmakovVladimir/Labs](#).