ЗАДАЧА 6
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ

Введение

Фотоумножитель - это прибор, в котором падающее на него электромагнитное излучение (оптического диапазона) преобразуется в многократно усиленные импульсы тока. Регистрация этих импульсов может осуществляться либо путем их усреднения по времени (метод постоянного тока), либо путем счета отдельных фотонов (метод счета фотонов). И в том и в другом методе по результатам измерений можно определить поток излучения, падающего на катод ФЭУ, который считается пропорциональным в первом случае - силе тока через ФЭУ, во втором - числу импульсов, рождающихся за единицу времени.

В задаче иследуются один или два (по выбору преподавателя) ФЭУ в установке для счета фотонов, имитующей астрономический электрофотометр, определяются счетная характеристика и зонная характеристика ФЭУ, оцениваются возможности использования ФЭУ для регистрации слабых объектов.

Элементы Теории. Знакомство с методом счета фотонов.

Рассмотрим конструкцию фотоумножителя типа ФЭУ-79, который часто используется в астрономической практике (рис.5.3). Свет попадает на фотокатод ФЭУ, находящийся в стек-

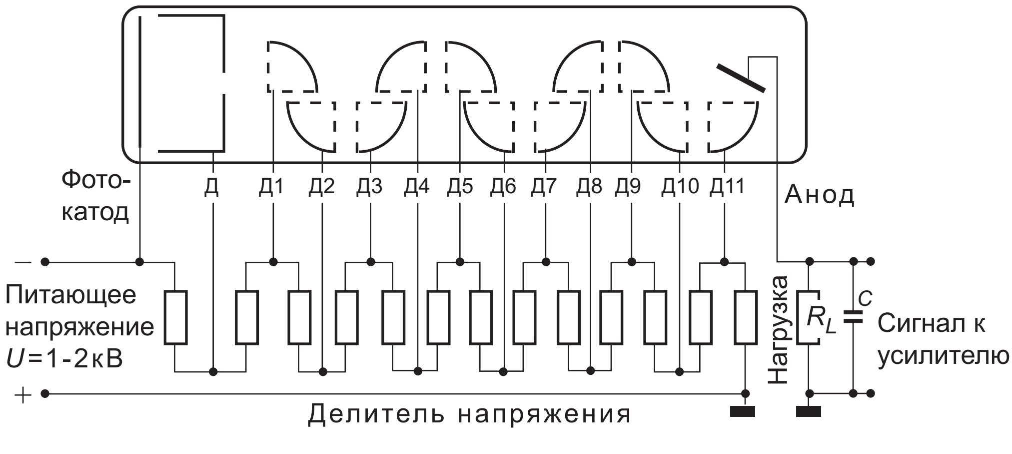

Рис. 5.3. Схема фотоумножителя

лянной вакуумной камере. Электроны, выбиваемые с катода, ускоряются электическим полем, двигаясь от одного динода к другому и выбивая из них новые электроны. В итоге один фотон, отдавший энергию одному выбитому электрону, рождает целый каскад электронов на выходе, воспринимаемый как очень короткий электрический импульс.

Количество каскадов усиления у ФЭУ-79 (т.е. количество динодов) равно 11. Фотокатод - полупрозрачный мультищелочной. Фотокатод характеризуется квантовым выходом ε, равным среднему отношению числа фотоэлектронов n, выбиваемых в результате фотоэффекта к числу упавших фотонов: $\varepsilon = n_{\text{фэ}}/n_{\text{фот}}$. Характерный квантовый выход отечественных ФЭУ $\leq 10\%$.

Основной принцип работы фотокатода - внешний фотоэффект. Однако, при нормальных рабочих температурах ($0 - 20^\circ$ C) бывает существенен и другой процесс, вызывающий появление электронов в катодной камере - это термоэмиссия фотоэлектронов с фотокатода. Этот эффект создает темновой ток ФЭУ, т.е. ток (электрические импульсы) на выходе при отсутствии излучения на входе. Кроме этого, вклад в темновой ток дает термоэмиссия с динодов, ионизация атомов воздуха, остающихся в вакуумной трубке ФЭУ, а при высоких напряжениях могут стать существенными также различные разрядные процессы в колбе ФЭУ. Для уменьшения темнового тока существуют два принципиальных метода:

а) охлаждение ФЭУ, что вызывает уменьшение потока термоэлектронов

б) уменьшение рабочей области фотокатода (это не приводит к потере света или чувствительности, так как пучок падающего света может быть сфокусирован даже на небольшую область фотокатода).

В конструкции ФЭУ-79 применен второй метод, что не исключает, естественно, и возможности использования первого. Катодная камера ФЭУ-79 является электронно-оптической линзой, которая "строит"на первом диноде изображение не всего катода (диаметром 30 мм), а только небольшой его центральной части (диаметром около 6 мм). Это ограничивает рабочую область фотокатода. Чувствительность самого фотокатода можно считать постоянной по площади, но из-за применения метода б) вероятность регистрации фотонов зависит от места их попадания на катод и описывается зонной характеристикой. Положение области максимальной чувствительности зависит от положения оси электронной линзы. Для каждого данного ФЭУ оно определяется отдельно.

Коэффициент вторичной эмиссии, т.е. коэффициент усиления одного каскада ФЭУ, невелик $(3-5)$, однако большое число динодов позволяет достигать общего усиления от 10^6 до 10^8 раз. Коэффициент вторичной эмиссии зависит от энергии первичных электронов, т.е. от ускоряющего междинодного напряжения. Поэтому коэффициент усиления всего ФЭУ зависит от напряжения питания $U_{\text{пит}}$. Потенциалы динодов задаются делителем напряжения. Характерные напряжения питания ФЭУ - от 1 до 2-3 кВ.

В астрономии ФЭУ получили широкое распространение в качестве приемников излучения широкого диапазона спектра (от ближнего ультрафиолета до ближней ИК области).

В настоящее время практически всегда используется метод счета фотонов, который имеет следующие основные достоинства перед методом регистрации тока:

1. линейность в большом диапазоне измеряемых интенсивностей
2. высокая точность (достижима точность, при которой ошибка измерения определяется только статистическими флуктуациями потока фотонов, поскольку все фотоны "считаются"с одинаковым статистическим весом)
3. удобный для дальнейшей обработки способ выдачи информации
4. возможность уменьшения темнового тока (т.е. числа темновых импульсов) за счет отбора темновых импульсов по амплитуде.

Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать основные характеристики ФЭУ, работающего в режиме счета фотонов.

Зависимость выходного сигнала (скорости счета n имп./с) от напряжения питания $U_{\text{пит}}$ называется счетной характеристикой фотоумножителя (рис.5.4) Для объяснения формы счетной характеристики рассмотрим другую важную характеристику ФЭУ - амплитудное распределение выходных импульсов $n(A)$, где n - число импульсов на выходе ФЭУ с амплитудой от A до $A+\delta A$, регистрируемых за 1 секунду. На рис.5.5 приведены типичные зависимости $n(A)$ для сигнальных (ns) и темновых (nt) импульсов (последняя имеет минимум на $A{=}A_1$). Зависимости имеют две выделенные точки A_1 и A_2. Поведение функции от 0 до A_1 определяется импульсами, которые возникают в результате термоэмиссии электронов с динодов. Эти импульсы имеют малую амплитуду, так как усиливаются не на всех каскадах ФЭУ. В области более высоких амплитуд зависимость $N_t(A)$ определяется в основном импульсами, которые возникают в результате усиления катодных термоэлектронов. Именно они несут информацию о приходящих фотонах. Для этих "сигнальных"импульсов $n_s(A)$ имеет вид распределения Пуассона со средней амплитудой A_2 . Становится понятным, каким образом можно избавиться от динодных импульсов: установить на выходе ФЭУ пороговую схему (дискриминатор),

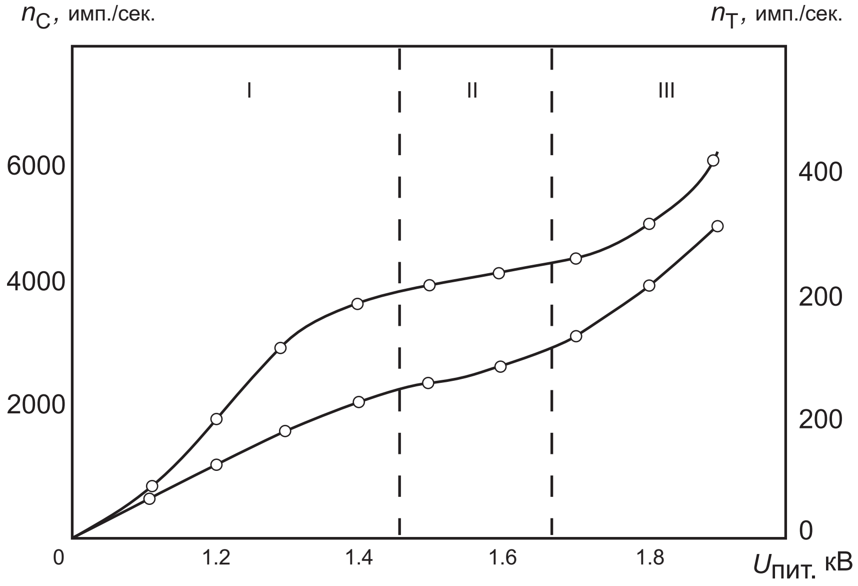

Рис. 5.4. Счётная характеристика ФЭУ

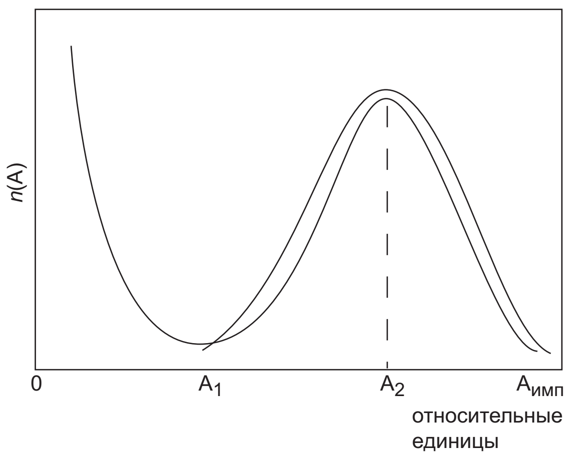

Рис. 5.5. Амплитудное распределение импульсов

которая не пропустит импульсы с амплитудой $A < A_d = A_1$. При этом, из-за различия в амплитудных распределениях, дискриминация импульсов с амплитудой $A < A_1$ не уменьшает существенно число "сигнальных"импульсов.

Амплитудное распределение импульсов $n(A)$ является дифференциальной характеристикой, т.е. $n(A)\delta A = N(A+\delta A) - N(A)$ или $n(A) = dN/dA$, где $N(A)$ — число импульсов с амплитудой, меньшей чем A. Если измерить на выходе ФЭУ число импульсов, прошедших пороговую схему с уровнем дискриминации A_d, то, изменяя A_d, можно получить интегральное распределение $N(A_d) \sim \int_{A_d}^{\infty} n(A)dA$, весьма похожее по форме на зеркальное отражение счетной характеристики на рис 1. При этом точка A_1 будет соответствовать минимуму производной dN/dA , после которой кривая распределеия снова возрастает. Сходство счетных характеристик и интегральных амплитудных распределений выходных импульсов ФЭУ не случайно. Счетная характеристика снимается при постоянном уровне дискриминации $A_d = const$, но при изменяющемся напряжении питания, а амплитудные распределения - наоборот: при $U_{\text{пит}} = const$, но при изменяющемся A_d. Амплитуды импульсов на выходе ФЭУ определяются средним коэффициентом усиления $K_{\text{у}}$ ФЭУ. В первом приближении измеряемые амплитуды пропорциональны $K_{\text{у}}$), который увеличивается с ростом $U_{\text{пит}}$, поэтому при счете импульсов увеличение $U_{\text{пит}}$ эквивалентно уменьшению A_d. Следовательно, счетную характеристику можно считать аналогом амплитудного распределения. Становится понятным и существование трех основных зон на счетной характеристике (рис.5.4): 1-й зона -считаются катодные импульсы большой амплитуды, 2-я зона - считаются практически все катодные (сигнальные и темновые) импульсы, 3-я зона - начинается счёт динодных и темновых импульсов.

Для идеального ФЭУ значение $n_c(U)$ в области 3 должно стремиться к некоторому пределу (подсчитываются все импульсы). Однако для реальных ФЭУ этого не происходит, так как при больших $U_{\text{пит}}$ внутри колбы возникают разрядные процессы, вызывающие появление на выходе импульсов большой амплитуды, превышающей A_2 . Увеличение числа импульсов объясняет загиб вверх счетной характеристики $n_c(U)$ в области 3 (рис.2). Это зона неустойчивой работы ФЭУ, и ее стараются избегать.

При очень большой частоте следования импульсов из-за ограниченности полосы пропускания усилителя может происходить слияние импульсов. При этом, их число в единицу времени будет уменьшаться.

Счетные характеристики позволяют выбирать оптимальное рабочее напряжение питания ФЭУ U_p. На кривых $n_c(U)$ и $n_t(U)$ (первая строится для импульсов, регистрируемых в отсутствие сигнала, а вторая - для величины $n-n_c$, где n - полное число импульсов на выходе) находят точки U_0 и U_1, в которых dn_c/dU и dn_t/dU минимальны. Величина U_1 будет соответствовать такому напряжению, при котором $A_1 \approx A_d$ (рис.3) Обычно $U_0 \geq U_1$. Если расхождение между ними не превышает 150-200 В, то выбирается рабочее напряжение $U_p = U_0 \approx U_1$, ($\sim$1500 В), соответствующее такому режиму работы ФЭУ, когда через дискриминатор проходят практически все импульсы катодного происхождения (как сигнальные, так и темновые), влияние разрядных процессов минимально, и выходной сигнал наименее чувствителен к флуктуациям питающего напряжения (так как dn/dU минимальна).

Если $U_0 > U_1$ и при напряжении U_1 счетная характеристика $n_c(U)$ "вышла"на некоторый приблизительно постоянный уровень, то напряжение питания обычно выбирается равным U_1, так как при этом еще не начался счет темновых импульсов динодного происхождения. Но если значение измеряемого сигнала $n_c \gg n_t$, то допустимо установление рабочего напряжения $U_p = U_0$ (это соответствует измерению излучения от ярких источников).

Кроме ФЭУ, в состав счетчика фотонов входят также:

1. усилитель выходных импульсов ФЭУ;

2. дискриминатор-формирователь выходных импульсов, который создает импульсы формы и амплитуды, необходимой для введения их в счетчик импульсов;

3. счетчик импульсов, измеряющий число импульсов n за установленный промежуток времени и выдающий результат в удобном для обработки виде (на табло, на цифропечать или непосредственно в ЭВМ);

4. блоки питания ФЭУ, усилителя, дискриминатора.

На рис.5.6 приведена схема использования счетчика фотонов на телескопе. Как было отмечено, размер рабочей области фотокатода ФЭУ-79 составляет несколько миллиметров, поэтому размер пятна света на фотокатоде должен составлять также несколько миллиметров. Перемещение пучка света при "дрожании"изображения звезды или неточности наведения на звезду вызовет дополнительные ошибки при измерениях, так как чувствительность фотокатода неоднородна. Этого можно избежать, если положение пятна на фотокатоде не будет меняться при дрожании изображения звезды в фокальной плоскости телескопа, т.е. в диафрагме электрофотометра. Чтобы достичь этого, в электрофотометре применяется линза Фабри, которая строит на фотокатоде изображение "неподвижного"входного зрачка системы (т.е. объектива телескопа). Фокусное расстояние линзы Фабри f_lf выбирается так, чтобы диаметр выходного зрачка, определяемый по формуле $d = f_lf \frac{D}{F+a-f_lf} \approx f_lf \frac{D}{F}$ (здесь a - расстояние от фокальной плоскости до линзы Фабри; обычно $a \ll F$), соответствовал размеру рабочей области фотокатода (как правило, по уровню $0.8 - 0.9$ максимальной чувствительности).

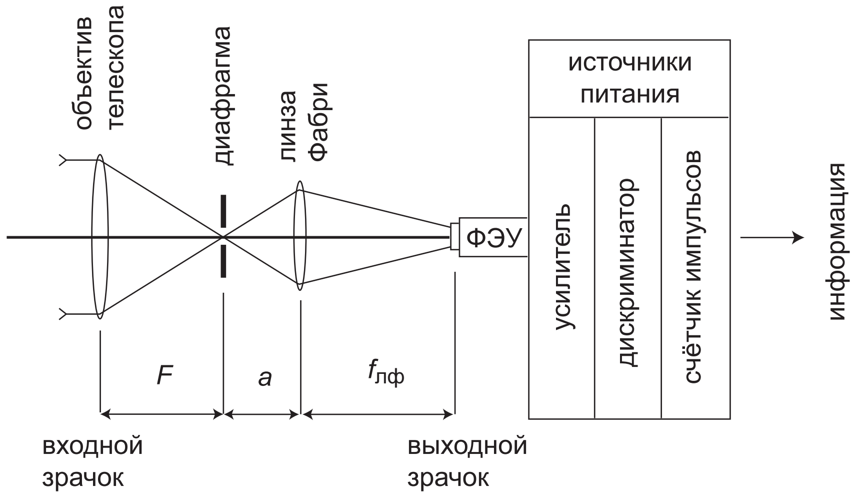

Рис. 5.6. Использование счётчика фотонов на телескопе

При наблюдении звезд с электрофотометром, исследуемую звезду обычно сравнивают с заранее подобранной звездой сравнения, звездная величина m_0 которой известна. Если $n_\star$ и n_0 - частоты следования звездных импульсов при наведении телескопа на одну и другую звезду, то свойство линейности ФЭУ позволяет записать следующее уравнение для определения звездной величины звезды:

$$m_\star = m_0 + 2.5 \lg \frac{n_0}{n_\star} \tag{5.1}$$

Приходится учитывать, что в полное число регистрируемых за время T импульсов N входит , помимо импульсов, рожденных "звездными"фотонами $N_\star$, еще и импульсы N_S, связанные со свечением области неба, попадающей в диафрагму фотометра вместе со звездой, а также "темновые"импульсы N_T . Поэтому частота следования "звездных"импульсов равна

$$n_\star = \frac{N_\star}{T} = \frac{1}{T}(N - N_H - N_T). \tag{5.2}$$

Рассмотрим от каких величин зависит точность оценки $n_\star$. Будем считать, что число импульсов $N_\star$, N_S и N_T , регистрируемых за время T , распределено по времени случайным образом. Статистическая флуктуация числа регистрируемых импульсов при этом равна $\sqrt{\overline{N_{\star,S,T}}}$ где $\overline{N_{\star,S,T}}$ –среднее число соответствующих импульсов. Тогда ожидаемая флуктуация числа импульсов от звезды составит

$$\sigma_{n_\star} = \frac{1}{T}(\sigma^2_N + \sigma^2_{N_H} + \sigma^2_{N_T})^{1/2} = \frac{1}{T}(\overline{N} + \overline{N_H} + \overline{N_T})^{1/2} = \left[\frac{1}{T}(n_\star + 2n_H + 2n_T)\right]^{1/2}$$

.

Относительная точность измерения

$$\varepsilon_{n_\star} = \frac{\sigma_{n_\star}}{n_\star} = \left[\frac{1}{T}\left(\frac{N_\star + 2N_S + 2n_T}{n^2_\star}\right)\right]^{1/2} \tag{5.3}$$

Эта формула является основной при оценке статистической точности измерений. Для ярких объектов ($n_\star \gg n_S + n_T$) и слабых объектов ($n_\star \ll n_S + n_T$) формула (3) аппроксимируется простыми выражениями:

$$(\varepsilon_{n_\star})_b right \approx \left(\frac{1}{n_\star T}\right)^{1/2} \approx \frac{1}{N^{1/2}}$$

,

$$(\varepsilon_{n_\star})_f aint \approx \left[\frac{2(n_S + n_T)}{n^2_\star T}\right]^{1/2}$$

.

Важно, что в обоих случаях, относительная ошибка измерения светового потока уменьшается с ростом времени накопления T как $T^{1/2}$.

При оценке реальных возможностей фотометра и предполагаемой точности измерения потока от звезды используется формула (3) или ее асимптоты; при этом учитывается, что фотометр регистрирует лишь часть фотонов, проходящих через оптику телескопа.Если почное количество фотонов, попадающих на фотокатод от звезды и от неба за 1 секунду составляет $n\star, 0$ и $n\star, 0$ соответственно, то для числа регистрируемых фотонов будем иметь:

$n_\star = \eta n_\star^{\text{фот}}$, а $n_S = \eta n_S^{\text{фот}}$, где η - квантовый выход ФЭУ (около 10%) . Для оценочных расчетов полезно помнить, что звезда нулевой звездной величины класса $A0$ дает в фильтре V (зеленая область спектра) примерно 10^6 фотонов на каждый квадратный сантиметр площади объектива за 1 секунду, а одна квадратная секунда ночного неба соответствует примерно 22-й звездной величине.

Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения работы необходимо ознакомиться с основными элементами установки. В комплект установки входят:

1. высоковольтный стабилизированный источник питания для ФЭУ
2. установка для исследования ФЭУ с люминофором и светофильтрами
3. импульсный усилитель
4. стабилизированный низковольтный источник питания
5. лампа с экраном для юстировки линзы Фабри
6. юстировочное приспособление
7. частотометр

Подготовка к измерениям Для снятия счетной и зонной характеристик ФЭУ требуется выполнить следующие операции:

1. Снять трубу с люминофором, поворачивая ее против движения часовой стрелки; при этом люминофор должен быть закрыт затвором. Поставить на основание установки экран с лампой таким образом, чтобы плоскость экрана соответствовала положению люминофора, и закрепить экран винтами.

2. Освободить панель для ФЭУ, находящуюся в корпусе термостата, вывернув 4 винта. ВНИМАНИЕ. ФЭУ питается постоянным напряжением в $1.5 - 2.0$ кВ от стабилизированного источника с малым внутренним сопротивлением. Во избежание поражения током высокого напряжения смена ФЭУ должна проводиться при полностью отключенном от сети источнике высоковольтного напряжения!

3. Установить исследуемый ФЭУ в гнезда панели, предварительно записав его номер, находящийся на цокольной части ФЭУ.

4. Изменить (если необходимо) длину юстировочного приспособления таким образом, чтобы его размер совпадал с размером ФЭУ. Вставить юстировочное приспособление в термостат вместо панели ФЭУ и закрепить его 4 винтами.

5. Включить низковольтный источник питания, установить на нем напряжение 3 В (левый индикатор) и подключить к нему лампу соединительным шнуром.

6. Глядя в окуляр юстировочного приспособления, сфокусировать вращением линзу Фабри и совместить изображение лампы и крест юстировочного приспособления, вращая винты перемещения линзы Фабри по X и Y.

7. Отключить лампу от низковольтного источника питания и снять ее вместе с экраном установки. Установить трубу с люминофором на место. Вставить панель с ФЭУ вместо юстировочного приспособления и закрепить винтами.

8. На низковольтном источнике питания установить напряжение 12 В и подключить к нему импульсный усилитель, строго соблюдая полярность.

9. Включить источник высокого напряжения и частотомер. На щитке управления частотомера все кнопки находятся в "отжатом"состоянии за исключением:

   "Метки времени нажата "0.01 мкс"

   "Время счета 1000

   "Вход А "Уров. авт."

   Нажата "1V - 10V"

   Перед началом работы прогреть аппаратуру в течение $20 - 30$ минут. Для уменьшения засветки фотокатода ФЭУ затвор люминофора в процессе подготовительных операций должен быть закрыт. Перед началом измерений необходимо выключить верхнее освещение и добиться максимально возможного затемнения ФЭУ.

10. Подать на ФЭУ высокое напряжение, равное $1.5-1.8$ кВ, плавно поворачивая ручки регулировки схемы источника и проверяя показания на индикаторе цифрового вольтметра. Открыть затвор люминофора и убедиться в наличии сигнала по индикатору частотометра. Винтами смещения линзы Фабри по X и Y добиться максимального сигнала, считывая показания частотометра. Таким образом грубо осуществляется поиск рабочей точки на фотокатоде ФЭУ.

При замене ФЭУ все вышеуказанные операции повторяются в той же последовательности.

Снятие счетной характеристики Для снятия подробной счетной характеристики через каждые 50 или 100 В, начиная с такого напряжения, при котором сигнал становится обнаруживаемым, производить регистрацию числа импульсов за единицу времени с индикатора частотометра при открытом затворе люминофора $n_T + n_\star$ и закрытом затворе n_T, где n_T - число импульсов в единицу времени для темнового тока и $n_\star$ - для сигнала люминофора. При этом напряжение на ФЭУ повышается до величины не более 2 кВ. Время накопления сигнала рекомендуется сделать 10 с (проверить положение тумблера частотометра "Время накопления"). Данные измерений занести в таблицу. Произвести выбор рабочей точки с помощью построения счетной характеристики - аналога амплитудного распределения методом табличного дифференцирования.

Снятие зонной характеристики После выбора рабочего напряжения на ФЭУ снять зонную характеристику по двум направлениям:

$$n_\star = f(X)$$

,

$$n_\star = f(Y)$$

.

Для этого необходимо с помощью винтов перемещения линзы Фабри сделать два разреза, пересекающиеся в точке максимальной чувствительности фотокатода. Шаг винтов перемещения линзы Фабри - 1.25 мм.

Оценить размер пятна чувствительности фотокатода по уровням 0.1 и 0.9 от максимальной чувствительности.

Подать на ФЭУ рабочее напряжение и установить линзу Фабри в область максимальной чувствительности фотокатода. Измерить сигнал от люминофора и темновой сигнал без фильтра и с фильтром для двух времен накопления: 10 и 100 с. В каждом случае оценить точность измерения сигнала от люминофора. После окончания измерений выключить аппаратуру, накрыть установку чехлом и убрать рабочее место.

Результаты

1. Построить на миллиметровке или занести в компьютер:
   - счётные характеристики для сигнала и темнового тока
   - аналог амплитудного распределения
   - зонные характеристики по двум направлениям
2. Привести для исследуемого фотоумножителя:
   - величину напряжения для рабочей точки.
   - размер пятна чувствительности фотокатода по уровням 0.1 и 0.9 максимальной чувствительности.
3. Сделать вывод относительно возможности использования ФЭУ для фотометрии слабых объектов.

Результаты оформить и сдать преподавателю, указав номер исследуемого ФЭУ.

Примеры дополнительных вопросов к задаче

1. В чем преимущества метода счета фотонов перед методом измерения силы фототока через ФЭУ?
2. Найти фокусное расстояние линзы Фабри в электрофотометре с исследовавшимися ФЭУ, установленном на телескопе Цейсс-600 с $F/D = 12.5$ (размер пятна чувствительности считать по уровню 0.9).
3. Оценить величину звезды, от которой регистрируемый поток излучения был бы таким же, как и от люминофора в данной задаче, при следующих условиях:
   - наблюдения проводились на телескопе с диаметром объектива $D = 60$ см;
   - ширина полосы пропускания фильтра — 1000 Å;
   - пропускание фильтра, оптики и атмосферы - 0.5 каждое;
   - квантовый выход ФЭУ -5%.
4. Используя измерения, полученные в рабочем режиме ФЭУ, оценить время накопления сигнала, необходимое для получения точности измерения, равной 0.01^m или 1% (как с фильтром, так и без него).

Литература

Основная

1. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. А.: Наука, 1977, с.230-263.
2. Курс астрофизики и звездной астрономии. Под ред. Михайлова А.А. Т.1. М.: Наука, 1973, с.134-138.

Дополнительная

1. Щеглов П.В. Проблемы оптической астрономии. М.: Наука, 1980, с.7-12.
2. Методы астрономии. Под ред. Хилтнера. М.: Мир, 1967.