

## **ХІ. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ**

Практическое осуществление первого электронного умножителя относится к 1904 г. Русский физик Л.А.Кубецкий построил фотоумножитель с коэффициентом усиления 1000. В первые годы после изобретения фотоумножителя предполагаемая область применения ограничивалась автоматикой и звуковым кино. Однако уже в 1937 г. советским астрономом С. Г. Натансоном была высказана мысль об исключительных перспективах применения фотоумножителя для измерения слабых световых потоков. В 1939 г. появились первые работы по измерению слабых световых потоков, в частности, обнаружено инфракрасное свечение ночного неба. В следующие годы и особенно после войны резко возрос интерес к применению фотоумножителей во всевозможных областях науки и техники. Это объясняется тем, что порог чувствительности фотоумножительной схемы, ограничиваемый электрическими флуктуациями, лежит ниже порога чувствительности ламповых схем с фотоэлементом. Так, например, применение фотоумножителей в астрономии позволило измерить свет и цвет внегалактической туманности. Применение фотоумножителей в количественном спектроскопическом анализе дало возможность построить автоматическую аппаратуру, позволяющую за полминуты определить концентрацию десятка элементов, содержащихся в исследуемом образце. Исключительно эффективным оказывается применение фотоумножителей при решении многих вопросов ядерной физики.

## Фотокатод

В вакуумных фотоэлектрических приборах, в частности, в фотоумножителях используется исключительно внешний фотоэффект. Свойства фотоэффекта описываются законами Столетова и Эйнштейна. Здесь необходимо напомнить, что из закона Эйнштейна, выражаемого уравнением

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\text{максв}} = h\nu - \phi_0,$$

где  $\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\text{максв}}$  - энергия фотоэлектрона,  $\nu$  - частота падающего света,  $\phi_0$  — работа выхода фотокатода, следует, что если энергия кванта падающего света меньше работы выхода, то фотоэффект невозможен, т.е. для каждой поверхности существует наименьшая частота света

$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h},$$

при которой возникает эмиссия фотоэлектронов. Соответствующая этой частоте длина волны

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$$

называется "красной границей" фотоэффекта для данной поверхности. Спектральные характеристики в видимой и близкой ультрафиолетовой областях спектра для всех металлов имеют вид кривых, монотонно возрастающих с частотой.

У щелочных металлов наблюдаются отклонения от монотонного возрастания фототока с частотой. Необходимо заметить, что при увеличении температуры "красная граница" смещается в сторону меньших частот.

Указанные спектральные зависимости относятся к чистым металлическим поверхностям. Абсорбция на поверхности металлов атомов других веществ, в частности, газов ведёт к значительным изменениям фотоэлектрических свойств металла. Исследования показали, что подобные изменения связаны с изменением работы выхода. Чистые металлические поверхности вследствие своей малой чувствительности к видимому свету применяются в качестве фотокатодов только в приборах, регистрирующих ультрафиолетовое излучение, т. к. в этой области длин волн чувствительность их достаточно велика.

Спектральная чувствительность фотокатода может быть выражена следующим образом:

$$\gamma(\lambda) = \frac{di}{d\Phi},$$

где  $d\Phi$  — лучистый поток в интервале длин волн  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ ,

$di$  — фототок, возникающий в цепи фотокатода при падении на него потока  $d\Phi$ . Величины  $\gamma(\lambda)$  обычно выражают в амперах на ватт. Таким образом, спектральная чувствительность измеряется фототоком, возникающим при падении на данный фотокатод лучистого потока единичной мощности с данной длиной волны.

Спектральную чувствительность фотокатода можно выразить также в относительных единицах:

$$\gamma_0(\lambda) = \frac{\gamma(\lambda)}{\epsilon},$$

где  $\epsilon$  — максимальная спектральная чувствительность фотокатода при длине волны  $\lambda = \lambda_{\text{max}}$ , соответствующей  $\gamma_0(\lambda) = 1$ .

Фотоэлемент или фотоумножитель во многих случаях используется не в условиях освещения спектрально-разложенным светом, а облучается белым светом, поэтому введено понятие о чувствительности катода к не разложенному свету, т. е. об "интегральной чувствительности". Однако спектральный состав применяемого света должен быть точно определён, т. к. один и тот же по величине суммарный поток неразложенного света, но различный по составу, в силу селективности фотокатода может создавать различные фототоки.

Интегральная чувствительность определяется фототоком насыщения, возникающим в цепи данного фотокатода при освещении его единичным лучистым потоком от стандартного источника света. Если лучистый поток измерен в энергетических единицах, то интегральная чувствительность выражается в амперах на ватт и называется интегральной энергетической чувствительностью.

Связь между спектральной и интегральной чувствительностью может быть установлена следующим образом: падающий на фотокатод лучистый поток, излучаемый телом, имеющим температуру  $T$ , выражается так:

$$\Phi(T) = \alpha S \int_0^{\infty} r_3(\lambda) d\lambda,$$

где  $\alpha$  - телесный угол, определяющий долю полного потока от источника, захватываемую поверхностью фотокатода;

$S$  — площадь поверхности излучающего тела;

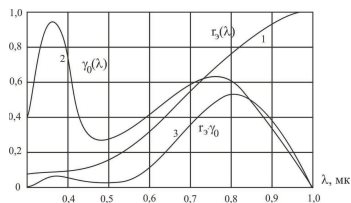


Рис. 60.

$r_{\lambda}$  — энергетическая спектральная плотность излучения (яркость). Фототок насыщения, вызываемый потоком  $\psi(T)$ , будет:

$$i(T) = \alpha S \epsilon \int_0^{\lambda_{rp}} r_{\lambda}(\lambda) \gamma_0(\lambda) d\lambda.$$

Интегральная энергетическая чувствительность фотокатода тогда выразится формулой:

$$\gamma(T) = \frac{i(T)}{\Phi(T)} = \frac{\epsilon \int_0^{\lambda_{rp}} r_{\lambda}(\lambda) \gamma_0(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda}(\lambda) d\lambda},$$

где  $\lambda_{rp}$  — "красная граница" чувствительности фотокатода.

Из формулы следует, что интегральная энергетическая чувствительность фотокатода зависит как от формы кривой спектральной плотности излучения источника, так и от спектральной чувствительности фотокатода.

Интегральная чувствительность обычно определяется графическим интегрированием. На Рис. 60 показаны в относительных единицах спектральное распределение лучистой энергии вольфрамовой нити при  $T = 2800$  К (кривая 1), спектральная чувствительность кислородно-цезиевого фотокатода (кривая 2); площадь, ограниченная кривой 3, даёт величину

$$\int_0^{\lambda_{rp}} r_{\lambda}(\lambda) \gamma_0(\lambda) d\lambda$$

Применяемые в настоящее время в фотоэлектрических приборах фотокатоды имеют сложную структуру: подложка — промежуточный слой — щелочной металл.

Сложные фотокатоды, в отличие от чистых металлов, обладают высокой чувствительностью в видимой, а также в близких к ней ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Наиболее распространенными представителями сложных катодов являются сурьмяно-цезиевый и кислородно-цезиевый фотокатоды. На Рис. 61 представлена схема строения кислородно-цезиевого катода на серебряной подкладке.

Атомы щелочного металла (обычно цезия) входящего в состав фотокатода, содержатся как внутри полупроводящего слоя в химически связанном и адсорбированном состоянии, так и на его наружной поверхности. Строение промежуточного слоя определяет в основном фотоэлектрические свойства катода. Работа выхода кислородно-цезиевого катода весьма мала: "красная граница" лежит при  $11000-12000 \text{ \AA}$ . Спектральная характеристика сурьмяно-цезиевого катода имеет один максимум в ближней ультрафиолетовой области спектра Рис. 62 Знания спектральной характеристики и интегральной чувствительности ещё не достаточно, чтобы выбрать тот или иной фотокатод для решения определённой задачи. Помимо перечисленных свойств необходимо знать ещё некоторые параметры катода: наличие пропорциональности между интенсивностью падающего света и фототоком, зависимость фототока от приложенного напряжения, величину темнового тока и др.

При практическом использовании фотокатодов с внешним эффектом обычно наблюдаются отклонения от пропорциональности, проявляющиеся особенно резко у сурьмяно-цезиевых фотокатодов, нанесённых на стекло.

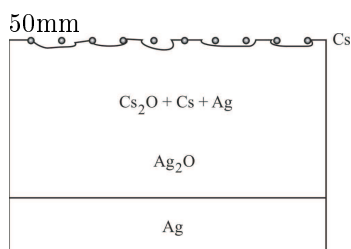


Рис. 62.

Если сурьмяно-цезиевый фотокатод нанесён на массивную металлическую подкладку, то пропорциональность между фототоком и световым потоком сохраняется вплоть до больших освещённостей. Отступления от прямой пропорциональности могут быть связаны с:

- 1) утомлением фотокатода;
- 2) плохим вакуумом;
- 3) появлением зарядов на стекле;
- 4) возникновением пространственных зарядов.

При измерении малых световых потоков, что наиболее часто встречается в практике, используется начальный участок световой характеристики.

Зависимость фототока от анодного напряжения, т.е. вольтамперная характеристика фотокатода, носящая название анодной характеристики, также необходима для выбора электрического режима. Для большинства катодов вольтамперная характеристика достигает насыщения Рис. 63. Величина потенциала насыщения зависит от конструкции и взаимного расположения фотокатода и анода (в фотоэлементе).

При небольших световых потоках (до  $1 \text{ лм}$ ) и небольшом сопротивлении фотокатода насыщение достигается при напряжении в несколько десятков вольт.

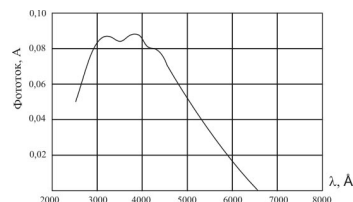


Рис. 61. Световая характеристика сурьмяно-цезиевого фотокатода (в усл. ед.).

Вопрос стабильности фотоэлектрических свойств катода связан со старением или утомлением фотокатода.

У сложных катодов, активированных щелочным металлом, уменьшение чувствительности в процессе эксплуатации (утомление) может проявиться довольно редко. Чем больше световой поток, тем больше утомление. Одновременно происходит изменение спектральной кривой. Явление утомления у кислородно-цезиевого катода носит частично обратимый характер. Сурьмяно-цезиевые катоды подвержены утомлению в меньшей степени. При малых освещенностях от 20 до 60 лк (от 0.01 до 0.03 лм) даже высокочувствительные образцы сурьмяно-цезиевых катодов обладают слабым утомлением.

### Вторичная электронная эмиссия

Бомбардировка поверхности металла, полупроводника или диэлектрика электронным пучком вызывает эмиссию вторичных электронов с облучаемой поверхности. Опыт показывает, что количество испускаемых вторичных электронов зависит от рода поверхности, её температуры и метода изготовления, потенциала собирающего электрода, скорости и угла падения первичных электронов. Для количественной характеристики вторичной эмиссии вводят понятие о коэффициенте вторичной эмиссии ( $\sigma$ ). Эта величина определяется как отношение числа вторичных электронов, испускаемых поверхностью, к числу падающих на него первичных электронов.

На экспериментальных кривых, описывающих зависимость  $\sigma$  от энергии первичных электронов, сначала наблюдается возрастание  $\sigma$ , затем достигается максимум, после чего начинается постепенное падение. Энергия первичных электронов, при которой  $\sigma = \sigma_{max}$ , изменяется у различных эмиттеров в широких пределах от 100 до 1800 эВ. У металлов  $\sigma_{max}$  имеет значение от 0.5 до 1.8. Для ряда сложных эмиттеров (кислородно- и сурьмяно-цезиевых, бариевых, кислородно-магниевого)  $\sigma_{max}$  достигает 10-12. Ещё большими значениями  $\sigma_{max}$  обладают диэлектрические слои из хлористого натрия и цезия, иодистого калия, сернистого серебра. Однако такого рода поверхности в качестве эмиттеров не используются из-за сложной технологии.

Идея использования явления вторичной эмиссии для усиления малых токов была осуществлена лишь после того, когда были найдены эффективные эмиттеры, обладающие высоким коэффициентом вторичной эмиссии при сравнительно небольших (порядка 100 эВ) энергиях первичных электронов.

### Фотоумножитель

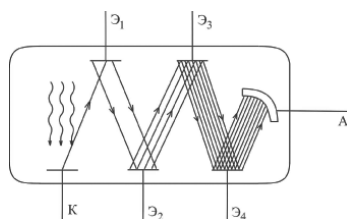


Рис. 64.

Принцип работы электронного умножителя заключается в следующем. Электроны, испускаемые фотокатодом, направляются под действием приложенного напряжения к эмиттеру  $\mathcal{E}_1$  и выбивают из него вторичные электроны. Последние направляются на следующий эмиттер  $\mathcal{E}_2$ , находящийся под более высоким потенциалом, и снова выбивают из него электроны. Тот же процесс повторяется на всех последующих эмиттерах. Электронный поток с последнего эмиттера собирается коллектором — анодом А.

Если первичный ток катода равен  $i_0$  и коэффициент вторичной эмиссии для всех эмиттеров одинаков и равен  $\sigma$ , то ток на выходе умножителя после умножения на  $n$  каскадах равен

$$J = i_0 \cdot \sigma^n$$

Возможность усиливать слабые электронные токи в огромное число раз с помощью одного компактного вакуумного прибора почти без внесения дополнительных помех объясняет тот интерес к электронным умножителям, который проявляется всё в большей степени по мере их совершенствования.

Комбинируя фотокатод с электронным умножителем, удастся достигать такой чувствительности к световому потоку, которая превышает чувствительность фотоэлементов на несколько порядков. Благодаря этому оказывается возможным измерение крайне слабых световых сигналов, которые для других методов остаются зачастую недоступными.

Качество умножителя: его коэффициент усиления, линейность характеристики, стабильность работы — определяются свойствами эмиттирующих поверхностей, конструкцией умножителя, качеством вакуума в приборе и режимом эксплуатации (рабочее напряжение, магнитное поле, температура и т.д.).

Умножитель даже с хорошим эмиттером не будет давать усиления, если не принять меры, обеспечивающие направление электронов последовательно с одного эмиттера на другой, поэтому одной из главных задач при конструировании умножителя является направление или фокусировка вторичных электронов на следующий эмиттер. Необходимо, чтобы по возможности меньшая часть эмиттированных электронов попала в промежутки между эмиттерами, на стенки прибора, держателя и т.д. Направление электронов осуществляется с помощью фокусирующего действия электростатических полей.

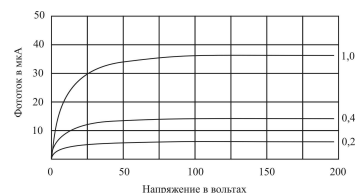


Рис. 63. Вольтамперная характеристика кислородно-цезиевого катода для различных освещенностей.

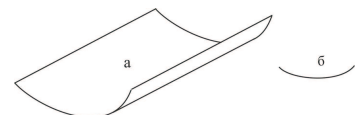
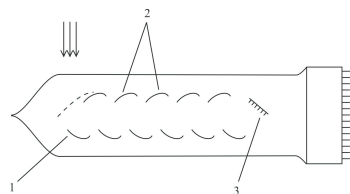


Рис. 65. Форма ковшеобразного эмиттера. а — общий вид, б — разрез.

Используя метод электрической ванны, можно найти такую конфигурацию электродов-эмиттеров, что создаваемые ими электрические поля будут собирать электроны в пучок и направлять его на следующий эмиттер. Форма эмиттера, используемого в большинстве умножителей (ФЭУ-17, ФЭУ-18, ФЭУ-19, ФЭУ-22, ФЭУ-25), представлена на Рис. 65.

Число эмиттеров колеблется для обычных типов умножителей от 8 до 13.



**Рис. 66.** Электронная система фотоумножителя ФЭУ-17.

1 - фотокатод, 2 — эмиттеры, 3 — анод.

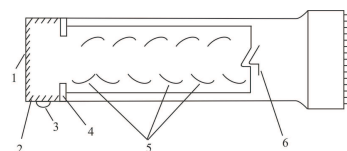
Умножитель ФЭУ-19 имеет 13 умножающих каскадов, т.е. 13 эмиттеров. Фотокатод либо наносится на электрод (ФЭУ-17), подобный по форме эмиттеру, либо наносится на торцевую поверхность стеклянной колбы (ФЭУ-19).

Последний эмиттер (13-й) отличается по форме от остальных и выполнен так, чтобы можно было поместить анод достаточно близко от поверхности эмиттера. Анод представляет собой рамку с натянутыми на ней металлическими нитями. У некоторых умножителей (ФЭУ-18) в боковую стенку колбы вделывается окно из увиолевого стекла, которое имеет хорошее пропускание в ультрафиолете.

В последние годы специально для применения в сцинтилляционных счетчиках разрабатываются конструкции фотоумножителей с плоским полупрозрачным фотокатодом большой площади. Представителем этого типа фотоумножителей является ФЭУ-19. Полупрозрачный фотокатод нанесён на торцевую поверхность колбы. Проводящий слой и диафрагмы образуют электронно-оптическую систему, собирающую электроны со всего фотокатода. В последних конструкциях фотоумножителей

все электроды подключены к ножкам на второй торцевой поверхности колбы. В ранних конструкциях выводы фотокатода и анода делались на боковых стенках колбы.

При работе фотоумножитель должен быть защищен кожухом, предотвращающим попадание постороннего света на фотокатод и эмиттеры. За последние годы разработано большое число конструкций фотоумножителей, различающихся способом фокусировки электронных потоков, числом умножающих каскадов, размерами и формой фотокатода. Сведения о них можно найти в литературе.



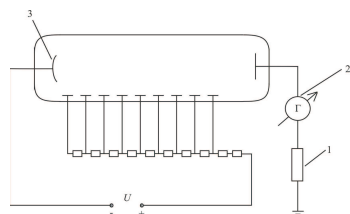
#### Параметры и характеристики фотоумножителей

В число основных параметров фотоумножителя входят интегральная чувствительность, спектральная чувствительность фотокатода, коэффициент усиления, величина темнового тока и сопротивление изоляции анода.

Интегральная чувствительность фотоумножителя  $\gamma_{\psi}$  связана с интегральной чувствительностью фотокатода  $\gamma$  следующим соотношением:

$$\gamma_{\psi} = \gamma M$$

где  $M$  — коэффициент усиления умножителя.



**Рис. 68.** Схема включения фотоумножителя.

1 — нагрузка, 2 — индикатор анодного тока, 3 — фотокатод.

Важной характеристикой фотоумножителя является зависимость коэффициента усиления от напряжения питания  $M = f(U)$ . Анодная характеристика фотоумножителя выражает зависимость анодного тока от напряжения между последним каскадом и анодом.

При работе умножителя в усилительной схеме, когда в его анодную цепь включено высокоомное нагрузочное сопротивление, во избежание нелинейных искажений необходимо выбирать напряжение  $U_a$  таким, чтобы действующее напряжение между последним каскадом и анодом не выходило за пределы горизонтального участка анодной характеристики.

Световая характеристика фотоумножителя определяет зависимость анодного тока  $J_a$  от светового потока  $\Phi$ , воспринимаемого фотокатодом. Исследования световых характеристик различных типов фотоумножителей показали, что при световых потоках от  $10^{-13}$  до  $10^{-14}$  лм, отклонение от линейности не превышает 3%. Однако при точных фотометрических измерениях необходима тщательная проверка линейности световой характеристики и отбор фотоумножителя.

В анодной цепи полностью затемненного, но находящегося под напряжением фотоумножителя протекает ток, называемый темновым током. Величина темнового тока играет существенную роль при определении порога чувствительности фотоумножителя, поэтому эта величина входит в число основных параметров фотоумножителя.

Причинами возникновения темнового тока являются:

- 1) термоэлектронная эмиссия фотокатода и эмиттеров;
- 2) ток утечки;
- 3) холодная эмиссия.

Из перечисленных факторов основную долю темнового тока составляет усиленная термоэлектронная эмиссия фотокатода и первых эмиттеров.

Одним из методов уменьшения темнового тока является охлаждение фотоумножителя вплоть до температур  $(-160 - -180)^{\circ}\text{C}$ . При таком охлаждении темновой ток уменьшается на четыре порядка.

**Рис. 67.** Электронная система фотоумножителя ФЭУ-19. 1 — фотокатод, 2 — проводящее покрытие, 3 — вывод фотокатода, 4 — диафрагма, 5 — эмиттеры, 6 — анод.

## Питание фотоумножителя

Для поочередного сообщения каждому последующему эмиттеру фотоумножителя более высокого потенциала, чем имеет предыдущий эмиттер, служит делитель напряжения. Делителем напряжения является цепочка из последовательно соединённых сопротивлений порядка 0,1-1,0 МОм каждое. Все сопротивления подбираются с точностью 1-2%. Для фотоумножителя типа ФЭУ-17 все сопротивления берутся одинаковые, только сопротивление между последним эмиттером и анодом удваивается. При использовании фотоумножителя с полупрозрачным торцевым фотокатодом требуется иное распределение напряжения между электродами:

| Электроды | Катод-1 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 | 5-6 | 6-7 | 7-8 | 8-9 | 9-земля |
|-----------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| Напряжен. | 120     | 100 | 100 | 100 | 120 | 140 | 140 | 140 | 140 | 150     |

Использование делителя из сопротивлений целесообразно лишь при анодных токах фотоумножителя не более  $10^{-4}$  А. При больших анодных токах имеет смысл использовать однотипные газоразрядные делители (СГ2С и др.), учитывая, что  $J_{\text{дел}} \approx 25J$ , а в противном случае на делителе выделялась бы большая мощность. Источником питания ( $U$ ) может служить либо высоковольтный стабилизированный выпрямитель, либо сухие батареи. На стабилизацию питания фотоумножителя необходимо обращать серьезное внимание, т.к. усиление фотоумножителя очень сильно зависит от напряжения питания. Изменение каскадного напряжения  $\frac{\Delta U}{U} = \pm 1\%$  вызывает изменение коэффициента усиления  $M$  на  $n\%$ , т.к. можно считать, что

$$\frac{\Delta M}{M} \approx n \cdot \frac{\Delta U}{U},$$

где  $n$  — число каскадов. Ввиду того, что в ряде случаев необходимо, чтобы постоянство усиления фотоумножителя поддерживалось с точностью  $\pm 1,0 \div 0,1\%$ , то коэффициент стабилизации стабилизатора напряжения должен быть  $K_u = 2 \cdot 10^3$ . Такую стабилизацию может обеспечить лишь сложное многоламповое устройство, например, выпрямитель с электронной стабилизацией (Вонч, Чечин).

При измерении слабых световых потоков с помощью фотоумножителя исследователь встречается с неприятными явлениями - электрическими флуктуациями, которые по месту их возникновения можно разделить на внешние и внутренние.

Ко внутренним флуктуациям относится дробовой эффект в фотоумножителе, тепловые флуктуации в нагрузочном сопротивлении, дробовой эффект сеточного и анодного токов первой лампы усилителя.

Суммарная величина флуктуации может быть оценена посредством среднего квадрата флуктуационного напряжения на нагрузочном сопротивлении:

$$\overline{U_\epsilon^2} = 10eiM^2R^2 \cdot \Delta f - 4kTR \cdot \Delta f$$

где  $e$  — заряд электрона,

$R$ - сопротивление нагрузки,

$i$  — сумма фототока и темнового тока,

$\Delta f$ - полоса частот усилителя (для усилителя постоянного тока  $\Delta f \approx \frac{1}{2RC}$ , где  $C$  — ёмкость, параллельная  $R$ ).

Величина напряжения помех или шума определяет порог чувствительности фотоумножителя, т.е. определяет наименьший световой поток  $\Phi_n$ , который ещё может быть зарегистрирован данным устройством. Величина  $\Phi_n$  имеет разные значения в зависимости от того, надлежит ли только обнаружить световой поток или же он должен быть измерен.

Для обнаружения светового потока достаточно иметь отношение сигнала фотоумножителя к напряжению шума в пределах

$$\frac{1 \div 3}{\rho} = \frac{U\Phi}{\sqrt{\overline{U_\epsilon^2}}}.$$

При измерении потока  $\Phi$  величина  $U$  различна в зависимости от требуемой степени точности. При измерении с точностью 1% и  $\rho = 100$ , наименьший световой поток определяется равенством:

$$\Phi_n = \frac{i\Phi}{\gamma} = \rho \sqrt{\overline{U_\epsilon^2}} \frac{1}{\gamma R},$$

где  $\gamma$  — интегральная чувствительность фотоумножителя.

Отношение напряжения сигнала к напряжению шума может выражаться в децибелах:

$$\rho_{\text{дб}} = 20 \ln \rho$$

При использовании фотоумножителя в схемах усиления постоянного тока снижение порога чувствительности может быть достигнуто не только за счёт уменьшения темнового тока, увеличения чувствительности фотокатода и интегральной чувствительности фотоумножителя, но также и за счёт увеличения сопротивления изоляции анода и уменьшения ёмкости анод-остальные электроды и кожух. Снижение темнового тока и увеличение сопротивления изоляции анода может быть достигнуто за счёт охлаждения фотоумножителя.

Измерение световых потоков может производиться методом непосредственного отсчета или использованием нулевого метода. В работе используется более простой метод непосредственного отсчета. Суть метода заключается в прямом измерении сигнала фотоумножителя (фототока). Измерение фототока фотоумножителя обычно производится с помощью усилительного устройства, на выходе которого подключается либо прибор для визуального отсчета либо регистрирующий прибор. При измерении постоянных или медленно меняющихся световых потоков используются усилители постоянного тока. В случае модулированного светового потока применяются усилители переменного тока, имеющие узкую полосу пропускания.

В данной работе предлагается измерить с помощью фотоумножителя постоянные (немодулированные) световые потоки.

Здесь блоком питания является стабилизированный высоковольтный выпрямитель ВС-22. Сигнал с ФЭУ подаётся на нагрузку 500 кОм, к которой подключен вольтметр.

Спектральная характеристика ФЭУ регистрируется следующим образом: свет от стабильного источника сплошного спектра разлагается с помощью монохроматора (призмного или с дифракционной решеткой). Монохроматический пучок света, проходя через выходную щель спектрального прибора, падает на фотокатод ФЭУ. Пуская на фотокатод монохроматические пучки света различной длины волны, можно снять зависимость

$$J_{\text{фот}} = J(\lambda) \quad (87)$$

Эта зависимость ещё не является собственно спектральной характеристикой ФЭУ. Чтобы получить спектральную характеристику, все ординаты кривой (1) нужно поделить на соответствующие ординаты кривой, описывающей распределение энергии в спектре источника света в зависимости от длины волны.

Распределение энергии в спектре источника света можно взять либо в абсолютной, либо в относительной мере. В первом случае мы определим в конце концов абсолютную спектральную характеристику, во втором — относительную. Распределение энергии в спектре лампы накаливания в абсолютной мере находят, используя в качестве спектрального прибора монохроматор, а в качестве регистрирующего устройства на выходе монохроматора — термоэлемент. Последний ставится непосредственно после выходной щели монохроматора и, т.к. не обладает селективностью (зависимостью чувствительности от длины волны

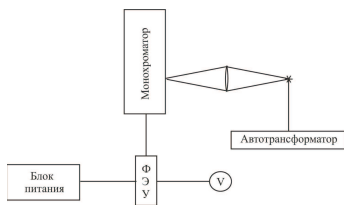


Рис. 70. Блок-схема установки.

падающего света), то его показания прямо пропорциональны величине энергии (мощности) падающего на термоэлемент света.

Если термоэлемент проградуирован в абсолютной мере, то и распределение энергии в спектре источника сплошного спектра можно определить в абсолютной мере.

В настоящей работе используется зеркальный монохроматор с дифракционной решеткой. Его оптическая схема приведена на Рис. 71

Зеркальный монохроматор с дифракционной решеткой обладает рядом преимуществ по сравнению с призмным монохроматором. Главным из них является отсутствие хроматической аберрации и постоянство дисперсии для малых углов дифракции  $\phi$ :

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \phi}.$$

Ход лучей в монохроматоре приведен на Рис. 71. Свет от источника R проходит через конденсор L и освещает щель S<sub>1</sub> монохроматора с дифракционной решеткой. Регулируя с помощью специального механизма поворот дифракционной решетки ДР, можно выводить на выходную щель монохроматора, а следовательно, и на фотокатод ФЭУ монохроматические пучки света различной длины волны.

Для выведения на выход монохроматора пучков света разной длины волны нужно пользоваться градуировочным графиком, указывающим зависимость между делениями шкалы поворотного механизма монохроматора и длиной волны света, падающего на входную щель спектрального прибора.

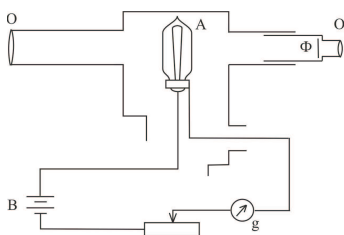


Рис. 72. Схема пирометра с исчезающей нитью.

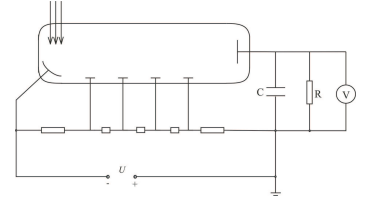


Рис. 69. Принципиальная схема включения ФЭУ.

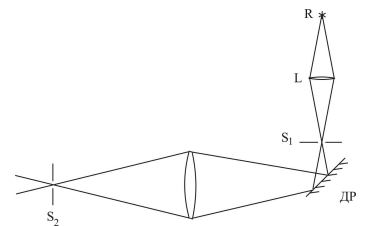


Рис. 71. R — источник света, L — конденсорная линза, S<sub>1</sub> — входная щель монохроматора, ДР — дифракционная решетка, S<sub>2</sub> — выходная щель монохроматора.

Кривую, описывающую относительное распределение энергии по длинам волн в спектре источника сплошного спектра, мы получим теоретически. Дело в том, что в качестве источника сплошного спектра в нашей установке используется лампа накаливания. Лампа накаливания принадлежит к так называемым "серым телам", коэффициент поглощения которых меньше единицы, но не зависит от длины волны. Относительное распределение энергии в спектре излучения серого тела такое же, как у абсолютно чёрного тела при той же температуре. Как известно, распределение энергии в спектре излучения, испускаемого абсолютно черным телом, определяется лишь его температурой  $T$  и описывается формулой Планка:

$$r_{\lambda} = f(\lambda, T) = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1},$$

где  $r_\lambda$  — так называемая плотность светимости. Определив температуру лампы накаливания, мы сразу же определим и интересующее нас распределение энергии в спектре лампы накаливания. Применяя такой метод, мы пренебрегаем тем, что монохроматор может исказить распределение энергии в спектре источника света; это можно сделать только пользуясь зеркальным монохроматором, зеркала и отражательная решетка которого имеют алюминиевые покрытия, т.к. коэффициент отражения алюминия в видимой области спектра практически не зависит от длины волны.

Определение температуры лампы осуществляется с помощью так называемого пирометра с исчезающей нитью. Схема этого прибора изображена на Рис. 72. Основной частью прибора является зрительная труба с объективом  $O$  и окуляром  $O'$ . В фокальной плоскости объектива  $O$  получается изображение поверхности наблюдаемого тела. Яркость изображения пропорциональна яркости объекта. В фокальной плоскости объектива  $O$  помещается электрическая лампочка  $A$  с однородными прозрачными стенками стеклянного баллона.

Накаливаемая нить лампочки  $d$  обычно изгибается в виде полукруга Рис. 73, в окуляр  $O'$  одновременно наблюдается изображение поверхности исследуемого тела и нить лампочки. Узкий спектральный участок выделяется с помощью светофильтров  $\Phi$ , располагаемых около окуляра  $O'$ . Обычно выделяется область в красной части спектра вблизи  $\lambda = 0,66$  мк. Нить лампочки питается током от батареи  $B$ . Меняя силу тока с помощью реостата  $R$ , можно накаливать нить более или менее интенсивно. Если яркость нити больше яркости изображения поверхности тела, то она выступает на фоне изображения в виде светлой полоски; если её яркость меньше, то она кажется темнее. При совпадении яркостей нити и изображения нить исчезает на фоне изображения. Таким образом можно со значительной степенью точности установить равенство яркостей нити и изображения поверхности наблюдаемого тела. Прибор можно проградуировать по абсолютно черному телу, установив, какие силы тока накала  $J$  соответствуют исчезновению нити при различных температурах абсолютно чёрного тела. После этого непосредственно по показаниям измерительного прибора  $g$ , соответствующим моменту исчезновения нити, можно определить, какова температура абсолютно чёрного тела, обладающего в данном интервале длин волн той же яркостью  $r_\lambda$ , что и яркость  $r_\lambda$  наблюдаемого тела. Если наблюдаемое тело также является абсолютно черным, то определённая таким образом температура будет его истинной температурой. Для черных тел определенная этим способом температура носит название яркостной температуры. Таким образом, задача определения спектральной характеристики ФЭУ в относительной мере сводится к следующим операциям:

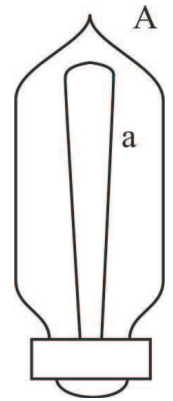


Рис. 73.

- 1) Снимается зависимость  $J_{\text{фот}} = J(\lambda)$ ;
- 2) с помощью пирометра определяется температура (яркостная) источника сплошного спектра и строится планковская кривая (в относительной мере), соответствующая найденной температуре;
- 3) ординаты кривой делятся на ординаты планковской кривой.

### Градуировка монохроматора

Монохроматор должен быть проградуирован, т.е. каждому делению барабана должна быть сопоставлена определённая длина волны. Используя ряд оптических нормалей, выполняют градуировку и результаты изображают кривой:

$$\lambda = f(\phi),$$

где  $\phi$  — показания барабана. Градуировка монохроматора производится с помощью линейчатого источника света, имеющего достаточное число линий в требуемой области спектра (иногда используют несколько источников, чтобы иметь больше точек для построения градуировочной кривой).

Градуировку следует начинать с установки линейчатого источника на оси прибора. Эта установка должна быть выполнена с достаточной тщательностью и должна обеспечивать заполнение рабочей апертуры прибора для каждой спектральной линии данного интервала, иначе бледные линии могут быть не обнаружены в спектре.

Ширина щелей определяется двумя условиями: с одной стороны, щели должны быть возможно более узкими, чтобы спектральные линии разрешались совершенно отчетливо; с другой стороны, она не должна быть настолько малой, чтобы понизилась интенсивность линий из-за дифракции света на оправе призмы или решётки и на объективах прибора, т.е. ширина щели должна быть больше "нормальной".

При градуировке приходится иметь дело с двумя задачами: во-первых, найти правильное положение линии по шкале прибора и, во-вторых, точно установить, с какой линией имеешь дело. Последняя задача сильно облегчается, если есть фотографии соответствующих спектров, снятые на приборе с похожей дисперсией. Если же этого нет, сначала надо взять источник со спектром, бедным линиями, определить которые не представляет труда, и попытаться разобраться в спектре с помощью графика.

Нахождение правильного положения линии по шкале монохроматора сводится к точному совмещению середины линии с осью выходной щели. Казалось бы, что совмещение линии с выходной щелью будет тем точнее, чем уже щель. Однако это не так. Спектральная линия всегда несколько размыта из-за наличия аберрации и дифракции, и если ширина щели равна или меньше величины аберрации, то яркость линии будет очень мала и неравномерна.

При визуальном наблюдении линии точно совместить её изображение с выходной щелью весьма нелегко. Линия может оказаться правее или левее своего истинного положения. Лучше наблюдать появление линии



около одного края щели и исчезновение её около другого. Допустим, что появление линии происходит при делении шкалы  $n_1$ , а исчезновение при  $n_2$ ; тогда правильное положение её будет соответствовать делению

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2}$$

При градуировке наблюдение за линией производится с помощью лупы, предварительно сфокусированной на выходную щель. Следует помнить, что надо каждый раз фокусировать прибор на данную длину волны (особенно на краях спектра). Нужно также иметь в виду наличие мёртвого хода в механизме, вращающем дисперсионную систему. Как известно, мёртвый ход можно исключить, если всегда вращать систему в одну сторону.

### Порядок выполнения работы

1. Установить ртутную лампу и осветительную линзу на оси монохроматора и заполнить его светом.
2. Проградуировать монохроматор по спектру ртути.
3. Заменить ртутную лампу на лампу накаливания и с помощью оптического пирометра измерить температуру её нити.
4. Убедившись, что лампа накаливания стоит на оси монохроматора и заполняет его светом, снять кривую зависимости величины фототока от длины волны  $J_{\text{фот}} = f(\lambda)$ . При измерении фототока следует учесть, что фактически измеряется падение напряжения, создаваемое фототоком на резисторе 500 кОм. Измерения производятся вольтметром с переменным пределом.
5. Измерить величины фототоков в зависимости от напряжения питания ФЭУ при постоянном световом потоке.
6. Измерить темновой ток в зависимости от величины напряжения питания ФЭУ.

### Требования, предъявляемые к отчету

Отчет должен содержать:

1. оптическую схему установки;
2. Градуировочный график монохроматора;
3. Кривую зависимости темнового тока от величины напряжения питания;
4. Кривую зависимости величины тока фотоумножителя от величины напряжения питания при постоянном световом потоке;
5. Температуру нити лампы накаливания;
6. Спектральную характеристику ФЭУ. ПРИМЕЧАНИЕ: Кривую спектральной чувствительности ФЭУ нужно строить, пользуясь графиками распределения энергии в спектре лампы накаливания (кривая  $\Phi = \Phi(\lambda)$ ) и графиком зависимости фототока от длины волны  $J_{\text{ФЭУ}} = J(\lambda)$ .

Поэтому все три кривые строятся на одном и том же листе миллиметровой бумаги, и ординаты кривой спектральной чувствительности получаются путём деления соответствующих ординат кривых

$$J_{\text{ФЭУ}} = J(\lambda) \quad \Phi = \Phi(\lambda)$$

### Список литературы

1. Фриш С.Э., Оптические методы измерений, изд. ЛГУ, 1976, ч.1 гл.1 §9-11, гл. 11 §19-21.
2. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И., Техника и практика спектроскопии, изд. "Наука", 1976, стр. 108-109, 319, 326.
3. Чечик О., Файнштейн, Лифшиц, Фотоэлектронные умножители.

## Приложение

В нашей работе используется пирометр с исчезающей нитью, позволяющий измерить яркостную температуру источника излучения, не превышающую 2000 К. В то же время температура лампы накаливания, которая в нашем случае служит источником сплошного спектра, заведомо больше указанной величины. Для того, чтобы с помощью находящегося в нашем распоряжении пирометра измерить температуру лампы накаливания, поступают следующим образом. На пути светового луча, испускаемого источником излучения сплошного спектра с искомой температурой  $T_x$ , ставится серый фильтр. Термин "серый" имеет тот смысл, что фильтр совершенно одинаковым образом ослабляет излучение всех длин волн. Пусть  $J_x(\lambda, T_x)$  есть интенсивность света с длиной волны  $\lambda$ , падающего на фильтр. После ослабления фильтром интенсивность света будет достаточно мала, чтобы позволить с помощью пирометра измерить температуру этого излучения. Между  $J_x(\lambda, T_x)$  и  $J_1(\lambda, T_1)$  существует следующая связь:

$$J_1(\lambda, T_1) = \frac{J_x(\lambda, T_x)}{e^D}, \quad (1)$$

где  $D$  — оптическая плотность фильтра. В соотношении (1) имеются две известные величины:  $T_x$  и  $D$ . Для определения величины  $D$  проводят дополнительный опыт. Пусть на пирометр падает свет интенсивностью  $J_2(\lambda, T_2)$ , причём температура  $T_2$  может быть непосредственно зарегистрирована с помощью нашего пирометра. Затем на пути светового пучка ставят упомянутый фильтр и проводят вновь измерения температуры излучения. Теперь показания пирометра будут соответствовать другой температуре  $T_3$ . Между интенсивностями  $J_2(\lambda, T_2)$  и  $J_3(\lambda, T_3)$  опять-таки существует связь, даваемая уравнением (1). Таким образом, для определения двух величин и мы имеем два уравнения:

$$\begin{aligned} J_1(\lambda, T_1) &= \frac{J_x(\lambda, T_x)}{e^D} \\ J_3(\lambda, T_3) &= \frac{J_2(\lambda, T_2)}{e^D}, \end{aligned} \quad (2)$$

Зависимости  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $J_x$  от длины волны и температуры источника излучения в нашем случае могут быть описаны с помощью формулы Вина. Ведь мы работаем в спектральной области и при таких температурах, что выполняется соотношение

$$\frac{h\nu}{kT} \gg 1.$$

Следовательно

$$J(\lambda, T) = \frac{c}{\lambda^5} e^{-\frac{B}{\lambda}}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и логарифмируя, придём к

$$\begin{aligned} D &= \frac{B}{\lambda} \left( \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right); \\ D &= \frac{B}{\lambda} \left( \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда

$$\frac{1}{T_x} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3} \quad (5)$$

- 
- [1] Указанная величина чувствительности измеряется при замкнутой накоротко цепи фотоэлемента. Практически, вследствие того, что запорный слой обладает значительным сопротивлением (порядка 1000 ом и более) при замыкании цепи фотоэлемента на низкоомный гальванометр можно считать цепь замкнутой накоротко
- [2] Дихроизм - различная окраска одноосных кристаллов, обладающих двойным лучепреломлением, в проходящем свете при взаимно перпендикулярных направлениях наблюдения (вдоль оптической оси кристалла и перпендикулярно к ней).
- [3] см. приложение
- [4] См., например, Фриш С.Э., Техника спектроскопии, гл. 1, §6