

VII. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕЛЕНОВОГО ЭЛЕМЕНТА ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

Фотоэлементы являются преобразователями световой энергии в электрическую. В зависимости от типа фотоэлемента, от свойств фотокатода, материала баллона и некоторых других факторов, рабочий диапазон данного фотоэлемента может лежать в любом участке спектра от коротких ультрафиолетовых лучей до инфракрасных.

Существующие типы фотоэлементов, по принципу их действия, разделяют на три группы: 1. фотоэлементы с внешним фотоэффектом, в которых под действием света возникает электронная эмиссия с поверхности металла; 2. фотоэлементы с внутренним фотоэффектом, в которых, под действием света, меняется электропроводность вещества и 3. фотоэлементы с запирающим слоем, в которых под действием света

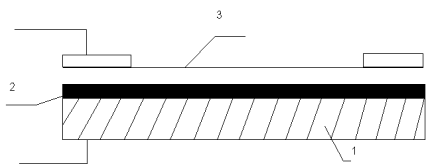


Рис. 34.

возбуждается электродвижущая сила.

Здесь мы будем говорить только о вентильных фотоэлементах. В настоящее время применяются вентильные фотоэлементы трех типов: меднозакислые, серноталлиевые и селеновые. В этой работе исследуется селеновый фотоэлемент.

Схематическое устройство вентильного фотоэлемента изображено на Рис. 34.

На металлическом электроде 1 расположен слой полупроводника 2, на поверхность которого наносится (обычно испарением в вакууме или катодным распылением) тонкий полупрозрачный слой металла 3. Этот слой является вторым электродом фотоэлемента. При помощи соответствующей термической обработки, на границе полупроводника с металлом, создается тонкий так называемый запирающий слой Zc (толщина порядка $2 \cdot 10^{-5}$ см), обладающий униполярной проводимостью (вентиль). Сопротивление запирающего слоя в несколько сот раз превышает сопротивление полупроводника. Природа запирающего слоя у вентильных фотоэлементов до сих пор не выяснена. Считается, что это химический запирающий слой, т.е. слой имеющий другой химический состав, чем вся остальная толща полупроводника, например окись или другая модификация.

При освещении фотоэлемента со стороны полупрозрачного слоя происходит одностороннее перемещение электронов, освобождающихся под действием света, сквозь запирающий слой. Вследствие этого на контактных электродах 1 и 3 появляется электродвижущая сила.

При замыкании фотоэлемента на внешнее сопротивление в получившейся цепи будет протекать ток, величина которого зависит от освещенности фотоэлемента.

В селеновом фотоэлементе тонкий полупроводниковый слой селена толщиной порядка 0,1 мм (нанесен на железный лист, являющийся катодом. Коллектором электронов (анодом) служит тонкий слой металла (свинца, серебра, золота или платины), нанесенный на поверхности селена.

Количество электронов испускаемых веществом при фотоэффекте, прямо пропорциональна величине потока лучистой энергии падающей на поверхность вещества. Следовательно, сила фототока может быть выражена уравнением:

$$I = K_0 F$$

где F — поток лучистой энергии, а K_0 — некоторый коэффициент пропорциональности. Очевидно, что этот коэффициент $K_0 = \frac{I}{F}$ численно равен силе фототока, создаваемого в фотоэлементе единичным потоком лучистой энергии, и поэтому может служить основным параметром фотоэлемента. Он называется чувствительностью или отдачей фотоэлемента и измеряется в микроамперах на люмен [1] или в микроамперах на кал./мин.

Селеновые фотоэлементы с запирающим слоем имеют чувствительность порядка $400-500 \frac{\mu a}{\text{люм}}$.

Однако интегральная чувствительность является далеко не полной характеристикой фотоэлемента.

Действительно, представим себе два световых пучка различного спектрального состава, но таких, что величина потока лучистой энергии, переносимой обоими пучками, одинаковы. Опыт показывает, что лучи разных длин волн действуют на фотоэлемент по разному. Для каждого фотоэлемента можно указать некоторую область спектра, оказывающую наиболее сильное фотоэлектрическое действие, в то время, как лучи, относящиеся к другим участкам спектра, практически не действуют на фотоэлемент. Таким образом, для каждого фотоэлемента мы должны, кроме интегральной отдачи, указать величину его чувствительности к лучам различных длин волн, т.е. распределение его чувствительности по спектру или, как говорят, спектральную характеристику фотоэлемента.

У селеновых фотоэлементов с запирающим слоем максимальная чувствительность лежит в видимой части спектра (550–600 нм).

Достоинством вентильных фотоэлементов является их высокая чувствительность а также наличие собственной электродвижущей силы, позволяющей использовать их без дополнительного источника питания. Недостатками фотоэлементов этого типа является сравнительно большая емкость и сильная зависимость фотоЭДС и фототока от температуры.

Литература

По фотоэлементам — Лукьянов "Фотоэлементы". Власов "Электроввакуумные приборы".

По полупроводникам — Иоффе "Курс физики" т.1, стр. 377–393. Лукьянов "Фотоэлементы" гл. X.

По монохроматорам — Топорец "Монохроматоры" гл. V и VI. Г.С.Ландсбург Оптика "Наука" 1976г. гл. XXXII

Экспериментальная часть

Постановка задачи

Настоящая работа состоит в определении чувствительности селенового фотоэлемента от длины волны.

Согласно сказанному в предыдущем параграфе, можно дать два определения чувствительности фотоэлемента. Можно говорить, о дифференциальной чувствительности, понимая под ней чувствительность к свету определенной длины волны. Эта чувствительность будет различна для разных длин волн $K_\lambda = K_\lambda(\lambda)$, а совокупность ее значений функция $K_\lambda(\lambda)$ будет давать характеристику фотоэлемента. Можно также определить интегральную чувствительность, которая, однако, будет характеризовать не только фотоэлектрические свойства фотоэлемента, но и зависеть от состава используемого света.

На самом деле, предположим, что распределение энергии в спектре используемого света дано функцией $\varphi(\lambda)$, тогда на спектральный интервал $d\lambda$ приходится поток $dF = \varphi(\lambda)d\lambda$. Этот поток создает в фотоэлементе ток $dI = K_\lambda\varphi(\lambda)d\lambda$, а весь поток создает ток $I = \int K_\lambda\varphi(\lambda)d\lambda$ где интегрирование ведется по всевозможным значениям λ .

Так как общий поток $F = \int \varphi(\lambda)d\lambda$, то интегральную чувствительность можно определить так:

$$K_\lambda = \frac{\int K_\lambda\varphi(\lambda)d\lambda}{\int \varphi(\lambda)d\lambda}$$

Если область интегрирования ограничить малым интервалом длин волн $\delta\lambda$, то вместо интегральной чувствительности получится средняя для данного интервала длин волн чувствительность которая уже не зависит от распределения энергии в спектре, ибо

$$\overline{K(\lambda)} = \frac{\int_{\lambda-\frac{\delta\lambda}{2}}^{\lambda+\frac{\delta\lambda}{2}} K_\lambda d\lambda}{\varphi\delta\lambda} = \frac{1}{\delta\lambda} \int_{\lambda-\frac{\delta\lambda}{2}}^{\lambda+\frac{\delta\lambda}{2}} K_\lambda d\lambda$$

При стремлении области $\delta\lambda$ к нулю, средняя чувствительность $\overline{K(\lambda)}$ стремится к дифференциальному значению чувствительности K_λ . Поэтому, используя достаточно узкие интервалы длин волн, можно свести задачу определения $K_\lambda(\lambda)$ к задаче определения $\overline{K_\lambda}$.

Таким образом, для определения значения $\overline{K_\lambda}$ в различных участках спектра нужно измерить фототок и соответствующий поток лучистой энергии. Диапазон длин волн, в котором следует выполнять измерения, определяется условиями опыта.

Установка

В нашей работе свет от лампы накаливания монохроматизируется стеклянным монохроматором УМ-2, рабочий диапазон которого охватывает всю видимую область. Оптическая схема установки дана на Рис. 35. Входная щель монохроматора (5) освещается лампой накаливания, при помощи двух осветительных линз (2) и (3). Через входную щель свет попадает в объектив коллиматора (6) и, выходя параллельным пучком, падает на диспергирующую призму (7). Перпендикулярно к падающему пучку света помещается выходная труба монохроматора с объективом (8), в ее щель (9) попадают лучи той длины волны, для которой, при данном угле падения света на призму, они проходят через призму в положении минимального отклонения. Поворачивая призмный столик на различные углы относительно падающего пучка света, мы выпускаем из выходной щели свет различной длины волны, который и используется для освещения исследуемого фотоэлемента. Конструктивно универсальный монохроматор можно разделить на три основные части (см. Рис. ??).

А. Коллиматор или входная труба имеет симметричную входную щель переменной ширины. Ширина щели устанавливается по барабанчику (20) с ценой деления 0,01 мм. На корпус щели надета защитная насадка. В нерабочем положении окно этой насадки закрывается металлическим колпачком (26) с крестообразной маркой. Этим колпачком удобно пользоваться для юстировки осветительной системы. Фокусировка объектива коллиматора

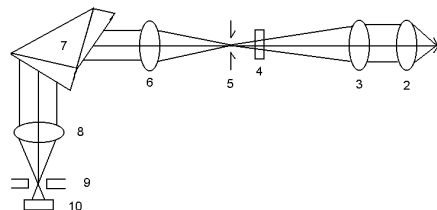


Рис. 35.

производится маховичком (28). Положение объектива фокусируется по миллиметровой шкале (27) с нониусом. В трубе коллиматора, между щелью и объективом, помещен затвор, с помощью которого можно прекратить доступ света в прибор. Затвор закрывается рукояткой (29).

Б. Призмный столик с поворотным механизмом. Основание призмного столика имеет рычаг, связанный с измерительным барабаном. При вращении барабана призма поворачивается и на выходную щель попадают лучи разной длины волны. На измерительном барабане даны относительные деления — градусы поворота самого барабана. Отсчет считается против индекса (37), скользящего по спиральной канавке барабана. Индекс освещается осветителем. Зависимость длины волны от показаний барабана дается в отдельной номограмме.

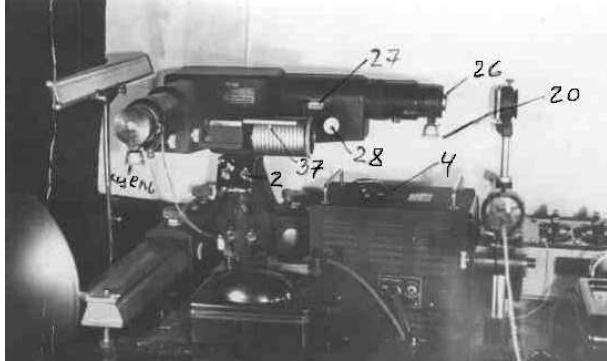


Рис. 36.

В. Выходная труба монохроматора расположена перпендикулярно коллиматору и имеет щель переменной ширины. Ширина щели регулируется при помощи барабанчика (55), цена деления которого 0,01 мм. В качестве источника света в данной работе применяется кинопроекторная лампа, охлаждаемая специальным вентилятором, помещенным внутри ее кожуха. Результаты измерений существенно зависят от постоянства накала лампы. Для контроля над накалом лампы используется вольтметр (V). Перед каждым отсчетом необходимо заглянуть на вольтметр. Накал регулируется автотрансформатором (4), укрепленным на столике. Прежде чем включить накал, надо убедиться, что указатель автотрансформатора стоит на нуле. Напряжение на вольтметре должно быть не выше 30 вольт. Для измерения распределения энергии в системе лампа-монохроматор служит вакуумный радиационный термоэлемент РТЭ, соединенный с микровольтметром. Действие

термоэлемента основано на том, что поглощенная им лучистая энергия вызывает повышение его температуры, которое пропорционально количеству поглощенной энергии излучения. Поэтому точное измерение теплового эффекта дает достаточно точное значение величины падающей энергии излучения. Термоэлементы принято характеризовать чувствительностью, порогом чувствительности, инерционностью и сопротивлением. Если сечение падающего не термоэлемент потока излучения меньше приемной площади, то термоэлемент характеризуется абсолютной чувствительностью, которая определяется отношением возникающей термоЭДС к мощности вызывающего ее излучения и обычно выражается в вольтах/вт. Чувствительность — отношение величины сигнала термоэлемента к мощности поглощаемого излучения. Поэтому характеризуют чувствительность коэффициентом преобразования (вольт/ватт, ампер/ватт). Инерционность характеризуется постоянной времени — времени установления сигнала на выходе при ступенчатом изменении освещенности. Если сечение падающего потока больше приемной площади термоэлемента, то он характеризуется относительной чувствительностью, определяемой отношением термоЭДС к плотности энергии, падающей на поверхность термоэлемента и выражается в вольт·см²/вт. Чувствительность термоэлемента зависит от материала термоэлемента и от теплоемкости (чем выше теплоемкость, тем выше чувствительность). Порог чувствительности термоэлемента (пороговый поток) определяется наименьшей величиной энергии излучения, вызывающей на выходе термоэлемента сигнал равный среднему сигналу шума. Пороговый поток или эквивалент светового шума (NEP — Noise Equivalent Power) — это минимальная величина регистрируемого светового потока (при отношении сигнал/шум равным единице). Определяется порог чувствительности флуктуациями напряжений термоЭДС, которые обусловлены беспорядочным тепловым движением электронов. В реальных термоэлементах достижению теплового порога чувствительности мешает джонсоновский шум, который превосходит тепловой в 5–20 раз. Джонсоновский шум является электрическим аналогом Броуновского движения подвески гальванометра и обусловлен флуктуациями электродвижущей силы в термодаре. Он определяется выражением

$$U^i = 4kTR\Delta f \quad (51)$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, R — сопротивление приемника, Δf — пропускная полоса частот. В лучших приемниках порог чувствительности достигает величины 10^{-11} вт. Из уравнения 51 видно, что сопротивление термоэлемента является важной его характеристикой, т.к. определяет уровень шумов и выбор измерительного прибора, к которому подключен термоэлемент. Другой важной характеристикой является инерционность термоэлемента. Ее мерой является так называемая постоянная времени, т.е. о время, за которое термоэлемент дает $\frac{1}{e}$ максимального тока при непрерывном, постоянном по мощности излучении. Эта постоянная времени зависит от отношения полной теплоемкости приемника к величине тепловых потерь. Для повышения чувствительности термоэлементы помещают в эвакуированные (до 10^{-4} мм.рт.ст) колбы. Это снижает потери тепла термодаром за счет теплопроводности газа и может повысить чувствительность более чем в 10 раз. Чувствительность РТЭ порядка 10^{-1} вольт/ватт. РТЭ укреплен на специальной стойке (рейтере), конструкция которого предусматривает возможность точной наводки ленты РТЭ на пучок света, выходящей из щели монохроматора. Выводы РТЭ поданы на клеммы микровольтметра. Исследуемый фотоэлемент — ФЭ укреплен на другой стойке. Для того, чтобы ввести его в световой пучок, нужно снять стойку РТЭ и посадить на рельс ФЭ, снять с ФЭ крышку и поставить его так, чтобы он встал перед щелью монохроматора. Выводы ФЭ поданы на клеммы гальванометра М-95. Микровольтметр, предназначенный для измерения термотоков, необходимо переключить в режим автоматического выбора предела (АВП), или минимального предела измерений.

В. Практические указания и порядок работы

Измерение потоков выходящих из монохроматора в дальней фиолетовой области, затруднительно, т.к. в этой области приходится работать на границе чувствительности регистрирующей схемы. Основные причины столь низкой мощности фиолетовых пучков заключаются в следующем:

1. Известно, что спектральное распределение энергии в излучении лампы накаливания весьма близко к распределению энергии в спектре черного тела. Последнее же характерно наличием максимума, положение которого зависит от температуры тела. При температурах около 2800 К (температура нити лампы) этот максимум будет попадать в инфракрасную область (1000–1200 нм). Поэтому в нашем рабочем интервале распределение энергии в спектре лампы характеризуется резким спадом.

2. Угловая дисперсия стеклянной призмы монохроматора возрастает по мере перехода от красного к фиолетовому концу спектра. В результате этого из щели монохроматора, при установке его на красную область, выходит значительный интервал длин волн, тогда как при установке на фиолетовую область выходящей интервал значительно сокращается (при той же ширине щели).

3. Внутри монохроматора свет частично отражается и поглощается. Доля отраженной и поглощенной энергии также изменяется с изменением длины волны. В фиолетовой области (при стеклянной оптике) поглощение и отражение растут, вследствие чего фиолетовые пучки оказываются максимально ослабленными.

Для того, чтобы можно было измерить потоки, выходящие из монохроматора в фиолетовой области, необходимо особенно тщательно проследить за геометрией световых пучков, заботясь, чтобы на приемную часть регистрирующей схему попадал максимальный поток; это достигается тщательной юстировкой осветительных линз и точной наводкой термоэлемента на пучок, выходящий из монохроматора. Кроме того, необходимо фокусировать коллиматор на фиолетовую область спектра.

Работу проще всего выполнять в следующем порядке:

1. Включив лампу, отъюстировать осветительные линзы и добиться максимального заполнения объектива коллиматора светом. Это можно проверить с помощью фотоэлемента по максимальному отбросу гальванометра М-95.

Прежде чем включать накал лампы, надо убедиться, что автотрансформатор стоит на нуле. Максимально допустимое напряжение накала 30 в. Такое напряжение нужно только при измерениях, а пока производится юстировка, лучше использовать небольшое напряжение (10–15 вольт).

2. Определить нулевое положение щелей (т.е. найти отсчет барабанчика, при котором щель закрыта). Следует помнить, что щель является весьма точным и тонким механизмом и ее очень легко повредить. Открывать и закрывать щель можно только наблюдая за проходящим мимо нее светом (т.е. смотря сквозь щель). При определении нулевого положения входной щели надо широко открыть выходную щель, а при определении нулевого положения выходной щели – входную. Установить ширину щелей 1,5 мм (150 делений) и убедиться, что в фиолетовой части спектра наблюдается достаточное отклонение гальванометра. Если отклонение слишком мало надо несколько увеличить ширину щели.

3. С помощью установочных винтов отъюстировать РТЭ по максимальному показанию микровольтметра. Установку лучше всего проводить для красной области.

4. Определить величины потоков, выходящих из щели монохроматора, при разных длинах волн внутри рабочего интервала. Отсчет следует производить через 20 нм, начиная с 400 нм. При каждом отсчете следует проверять напряжение на лампе, т.к. измерения, произведенные при разных накалах нити, будут зависеть не только от длины волны, но и от температуры накала нити.

Чувствительность термоэлемента даны в описании установки, которое выдается в лаборатории. Результаты измерений нужно представить графиком, дающим зависимость величины поток в ваттах от длины волны в ангстремах.

5. Заменить РТЭ фотоэлементом и измерить величины фототоков. Измерения производить при тех же ширинах щелей, что и для термоэлемента. Там, где намечается максимум, надо взять более узкий интервал длин волн (например, производить измерения через 5 нм). К клеммам гальванометра М-95 постоянно подключен шунт. Переключатель на гальванометре должен стоять в положении "внешний шунт", тогда вся шкала гальванометра соответствует той цифре, против которой стоит переключатель шунта. Следует помнить, что при измерениях в красной и фиолетовой области надо менять фокусировки коллиматора.

6. Выключить установку. При этом обязательно поставить на нуль автотрансформатор, а переключатель гальванометра М-95 поставить в положение "Арретир". Выключить общий рубильник.

7. Напомним, что при построении графика какой-либо зависимости, результаты измерений усредняются, т.к. кривая проводится между точками, соответствующими отдельным отчетам.

Для получения кривой спектральной чувствительности фотоэлемента, нужно, выбрав разумный масштаб, построить на одних и тех же осях кривую распределения энергии $\Phi(\lambda)$ в системе лампа – монохроматор и кривую фототоков $I(\lambda)$ – кривая спектральной чувствительности $K_\lambda(\lambda)$ получается делением ординат кривой $I(\lambda)$ на соответствующие ординаты кривой $\Phi(\lambda)$. Точки в которых производится деление ординат, должна равномерно распределяться по всей шкале длин волн.

Задание

1. Отъюстировать осветительную систему и заполнить прибор светом.

2. Отъюстировать РТЭ и определить величины световых потоков, выходящих из монохроматора, при разных длинах волн. Измерения следует проводить в области от 400 нм до 780 нм через каждые 20 нм.

3. Построить кривую распределения энергии в системе лампа – монохроматор ($\Phi(\lambda)$). При построении кривой отобразить ошибку отдельного измерения, нанося на график вместо точек вертикальные линии соответствующей длины; кривую проводить с учетом этих ошибок (весов отдельных измерений).

4. Измерить величины фототоков в той же области спектра и при тех же ширинах щелей.

5. Построить кривую зависимости величины фототоков от длины волны. Эта кривая строится также как и первая с учетом ошибок отдельных измерений.

6. Построить кривую зависимости дифференциальной чувствительности селенового фотоэлемента от длины волны, т.е. получить его спектральную характеристику.

Примечание:

Кривая распределения энергии $\Phi(\lambda)$ и кривая фототоков $I(\lambda)$ строятся в одних и тех же осях, кривая спектральной чувствительности $K_\lambda(\lambda)$ получается делением кривой ($I(\lambda)$ на $\Phi(\lambda)$).

Требования, предъявляемые к отчету

Отчет должен содержать:

1. Оптическую схему установки
2. Таблицу измерений, таблицы средних значений, по которым строились графики и их квадратичные погрешности.
3. Графики $\Phi(\lambda)$, $I(\lambda)$ и график, дающий спектральную характеристику фотоэлемента $K_\lambda(\lambda)$ в $\mu\text{a}/\text{вт}$. должны быть построены на одних и тех же осях.