

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Золотарёв Никита Алексеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Получение фотоэмиссионных характеристик мультищелочных фотокатодов

Практикум по электричеству и магнетизму, 2 курс, группа №18308

Научный руководитель:

Терещенко О. Е.

«__»_____2019 г.

оценка научного руководителя

Преподаватель практикума

Солдаткина Е. И.

«__»_____2019 г.

Оценка за курсовую работу

Аннотация

В данной курсовой работе получены спектральные зависимости квантового выхода в диапазоне длин волн 400 – 900 нм и распределения фотоэлектронов по энергиям в диапазоне напряжений от -1 до 1 В для мультищелочного фотокатода. А также были изучены теоретические основы фотоэффекта и типы фотокатодов (фотоэммиттеров). На основе полученных измерений была оценена работа выхода для мультищелочного фотокатода.

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор литературы.....	5
1.1. Явление фотоэлектронной эмиссии из полупроводников	5
1.2. Мультищелочные фотокатоды	8
Глава 2. Методика	11
2.1. Измерение спектральной характеристики фотокатода.....	11
2.2. Измерение энергетического распределения фотоэлектронов.....	13
Глава 3. Результаты измерений	15
Выводы и заключение.....	17
Список используемой литературы	17

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется фотоэмиссионным свойствам материала на основе A_3B_5 . Одним из наиболее распространённых и хорошо изученных материалов данной группы является GaAs. Т.к. они хорошо изучены, они уже нашли применение в технике. Помимо GaAs, мультищелочные фотокатоды на основе K, Na, Sb, Cs всё ещё остаются крайне востребованными и используются при изготовлении различных приборов. Тем не менее, далеко не все свойства фотокатода этого типа изучены хорошо. Поэтому исследование эмиссионных свойств мультищелочного фотокатода является важной задачей, т.к., возможно, позволит улучшить его характеристики и открыть новые применения в науке и технике.

Задачи в рамках данной курсовой работы:

1. Освоить методы измерения спектральных характеристик фотокатода для различных длин волн падающего света, исследовать спектр квантового выхода и работу выхода электронов для тонкого фотокатода.
2. Изучение и измерение энергетического распределения фотоэлектронов по энергиям.

Глава 1. Обзор литературы

1.1. Явление фотоэлектронной эмиссии из полупроводников

Фотоэлектронная эмиссия – это явление испускания фотоэлектронов из твёрдого тела под действием электромагнитного излучения. Электрод, эмитирующий при этом процессе, называют фотокатодом.

Фотоэффект был изучен русским физиком Александром Столетовым в 1888 – 1890 годах и выведен им первый закон внешнего фотоэффекта, впоследствии был объяснён Альбертом Эйнштейном в 1905 году, за что тот получил Нобелевскую премию.

Законы внешнего фотоэффекта:

1-ый закон фотоэффекта (закон Столетова): Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового излучения

2-ой закон фотоэффекта: максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов возрастает с уменьшением длины волны и не зависит от его интенсивности.

3-й закон фотоэффекта: для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует граничная длина волны, выше которой фотоэффект не наблюдается. Эта соответствующая длина волны называется красной границей фотоэффекта.

Существует разные виды фотоэффекта: внешний, внутренний, вентильный фотоэффект.

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах - металлах, полупроводниках, диэлектриках. Из закона сохранения энергии следует формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (1)$$

где A – работа выхода.

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри твёрдого тела (полупроводника или диэлектрика). В результате концентрация электронов внутри тела увеличивается, в итоге это приводит к возникновению фотопроводимости (повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к возникновению ЭДС.

Вентильный фотоэффект является разновидностью внутреннего фотоэффекта, – это возникновение ЭДС при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла при отсутствии внешнего электрического поля. Вентильный фотоэффект открывает пути для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

Современные фотокатоды - это полупроводниковые материалы р-типа, и основной физический принцип их работы - это внешний фотоэффект.

Краткая теория полупроводников

Структура энергетических уровней

Энергетические уровни валентных электронов часто называют простыми, E_1 – основной уровень (невозбуждённый), остальные называются возбуждёнными. Из-за взаимодействий атомов, каждый кратный энергетический уровень будет расщеплён на N простых. Существует набор разрешённых состояний для электронов - зоны, интервалы между зонами называют запрещёнными.

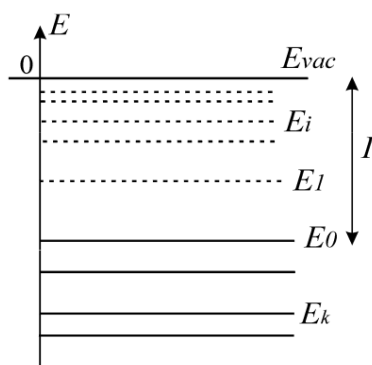


Рис. 1. Спектр энергетических уровней

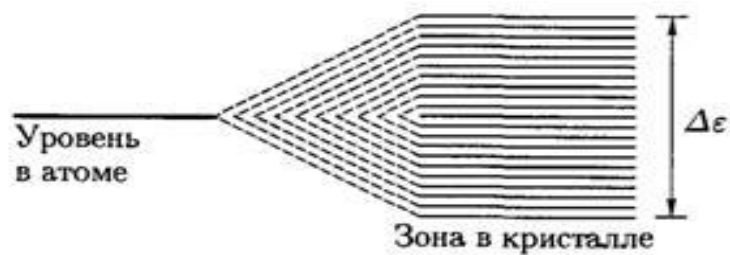


Рис. 2. Зона в кристалле

Проводимость полупроводников зависит от наличия примесей в них. Если же будет введено небольшое число легко ионизируемых атомов, то они резко поменяют количество носителей заряда. Процесс внедрения небольшого количества примесей в полупроводник, с целью увеличить его концентрацию и проводимость, называется легированием. Если валентность примесей больше, то полупроводник будет n-типа. В другом случае р-типа.

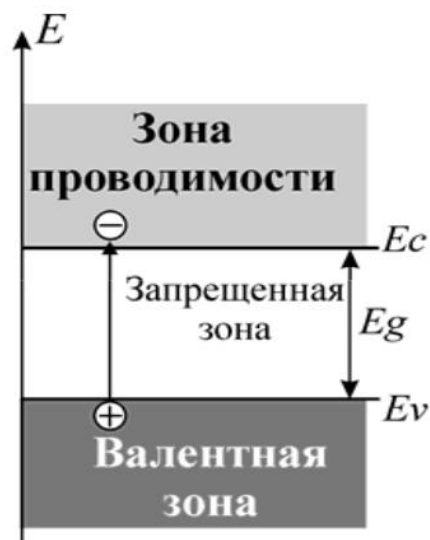


Рис.3. Зонная диаграмма

Энергия (уровень) Ферми – это максимальная энергия электронов при температуре $T = 0$ К. При абсолютном нуле уровень Ферми находится в середине запрещённой зоны, однако в примесных полупроводниках, она смещается либо вверх, либо вниз, в зависимости типа полупроводника. В случае электронной проводимости, количество электронов в зоне проводимости больше, чем в собственном полупроводнике. Следовательно, средняя энергия электронов в зоне проводимости увеличится, поэтому чтобы покинуть валентную зону, электрону необходимо затратить больше энергии.

Из-за этого уровень Ферми в полупроводниках n-типа находится выше середины запрещённой зоны. В полупроводниках p-типа, наоборот, уровень Ферми находится ниже середины запрещённой зоны.

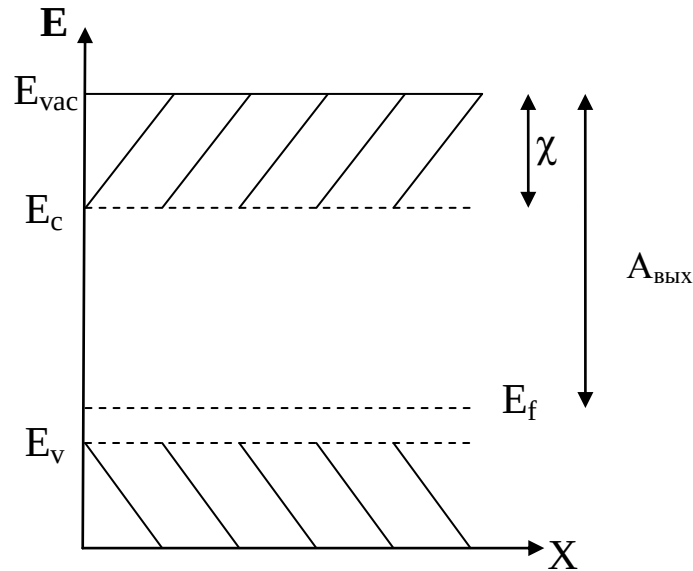


Рис. 4. Зонная диаграмма для фотокатода

На рис. 4. изображена зонная диаграмма для фотокатода, где E_{vac} — энергетический уровень вакуума, E_c — нижняя граница зоны проводимости, E_f — уровень Ферми, E_v — верхняя граница валентной зоны. χ — электронное сродство. Из диаграммы следует, что работа выхода $A_{вых}$ будет равна $E_{vac} - E_f$.

У полупроводника есть такое понятие, как электронное сродство и оно равняется $E_{vac} - E_c$. Существуют фотокатоды с эффективным отрицательным и положительным электронным сродством. Эффективным отрицательным электронным сродством называется состояние, при котором уровень вакуума находится ниже дна зоны проводимости, т.е. $E_{vac} - E_c < 0$. Соответственно, положительным электронным сродством является состояние, когда энергетический уровень вакуума выше дна зоны проводимости, т.е. $E_{vac} - E_c > 0$.

1.2. Мультищелочные фотокатоды(фотоэммитеры)

Фотокатоды – это такие фотоэлементы, у которых работа выхода мала. Фотокатоды изготавливают из материалов отличных от металла, например из арсенида галлия. Такой химический состав позволяет электронам освобождаться значительно легче, из-за высокого квантового выхода по сравнению с металлами.

Фотоэмиссию из фотокатода можно описать несколькими этапами:

1. Возбуждение электрона, придание ему энергии, достаточной для выхода.
2. Прохождение электрона через потенциальный барьер.
3. Выход из фотокатода.

Основными характеристиками фотокатодов являются:

1. Квантовый выход – это отношение числа вышедших из вещества фотоэлектронов n к числу поглощенных фотонов N_q .

$$Y_\lambda = \frac{n}{N_q} \quad (2)$$

2. Для фотокатода введена спектральная чувствительность – отношение величины фототока в режиме насыщения к мощности монохроматического излучения с длиной волны λ :

$$S_\lambda = \frac{I}{W_\lambda} \left[\frac{mA}{W} \right] \quad (3)$$

Существует связь между величиной квантового выхода и спектральной чувствительностью:

$$Y_\lambda = \frac{hc}{e} * \frac{1}{\lambda} * S_\lambda = \frac{1,24}{\lambda[nm]} * S_\lambda \quad (4)$$

3. Энергетическое распределение фотоэлектронов. При внешнем фотоэффекте в твёрдых телах распределение фотоэлектронов по энергии связан с зонной структурой металла. Для того чтобы определить закон распределения электронов по энергиям, необходимо найти, какое число электронов в веществе находится в квантовых состояниях, соответствующих некоторому интервалу энергий.

4. Диапазон рабочих температур.

В данной работе изучалась фотоэлектронная эмиссия из мультищелочного (Na-K-Sb-Cs) фотокатода. Мультищелочной фотокатод имеет широкий спектральный диапазон чувствительности от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области. Данный фотокатод покрыт поверхностным слоем Cs-Sb или Cs, который способен снизить работу выхода до нуля и даже ниже.

У изучаемого фотокатода с малым положительным электронным сродством, работа выхода фотоэлектронов составляет примерно 0,1 – 0,2 эВ и его толщина составляет примерно 120 нм.

Глава 2. Методика

2.1. Измерение спектральной характеристики фотокатода

В данной работе были рассмотрен фотодиод, состоящий из двух мультищелочных фотокатодов, выращенных на стекле и закрепленных плоскопараллельно на торцах корпуса, выполненного из алюмооксидной керамики. Для получения зависимости спектра квантового выхода от длины волны, были измерены спектральные характеристики фотокатода.



Рис. 6. Устройство используемого вакуумного фотодиода

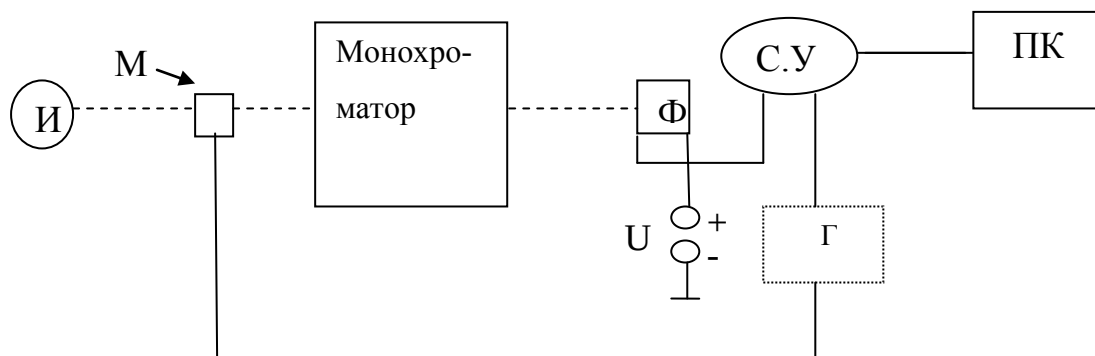


Рис.7. Схема установки для измерения спектральной чувствительности. М – модулятор; И – источник света; С.У – синхронный усилитель; Ф – вакуумный фотодиод; Г – генератор опорной частоты.

На рис.7. представлена принципиальная схема для измерения спектральных характеристик фотокатода при постоянном напряжении, которая включает в себя: вакуумный фотодиод, источник света, источник напряжения, синхронный усилитель. Перед тем как свет попадает на фотокатод, он проходит через модулятор и монохроматор. Модулятор

подключен к генератору опорной частоты, из которого опорный сигнал идёт в синхронный усилитель. Фотокатод, который расположен ближе к источнику света, подключен к синхронному усилителю, а другой фотокатод соединён с источником напряжения. Сигнал из синхронного усилителя подаётся на ПК.

Монохроматор

Монохроматор – это оптический прибор, предназначенный для выделения монохроматического излучения. Он состоит из дифракционной решётки, коллиматорного и камерного объектива.

Монохроматоры - необходимый оптический прибор в спектрофотометрах, где важно избежать проникновения в выходную щель рассеянного света с длинами волн, отличающимися от необходимого для исследований участка спектра.

Монохроматоры применяются для исследования свойств различных веществ на основе анализа спектрального состава отражённого или прошедшего через вещество электромагнитного излучения. Так же он используется для измерения спектральных характеристик объектов, взаимодействовавших с излучением.

Синхронный усилитель

Синхронный усилитель — электронный усилитель, в котором применён принцип синхронного детектирования сигнала. Позволяет обнаруживать периодические полезные сигналы на фоне очень сильных помех, величина которых может превосходить в десятки и сотни раз амплитуду полезного сигнала. Важной частью синхронного усилителя является фазовый демодулятор, который перемножает два сигнала.

Принцип работы синхронного усилителя состоит в следующем. Сигнал поступает в данный прибор и переходит через главный фильтр. После чего он проходит через демодулятор, в котором входной сигнал умножается на опорный, который поступает с генератора опорной частоты. Затем выходной

сигнал проходит через фильтр низких частот и посылается на компьютер. Блок схема Модели 5110 показана на рис.4.

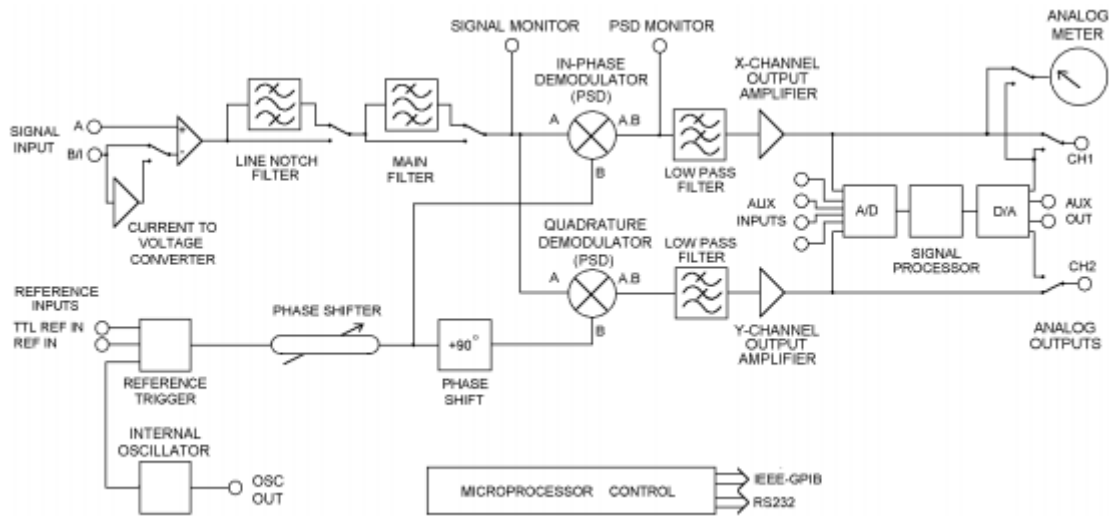


Рис.5. Блок-схема синхронного усилителя

2.2. Измерение энергетического распределения фотоэлектронов

Были измерены фотоэмиссионные спектры энергетического распределения эмитированных электронов при освещении одного из электродов. Ранее в диссертации Орлова Д.А. был изложен метод измерения энергетического распределения фотоэлектронов.[6]

Между фотокатодами было приложено напряжение U , которое формирует потенциальный барьер. Этот барьер могут преодолеть только фотоэлектроны, эмитированные с фотокатода. Полный ток электронов, преодолевших барьер, равен:

$$J(U) = \int_0^{\infty} qn(\varepsilon)V(\varepsilon)T(\varepsilon)d\varepsilon \quad (5)$$

где $n(\varepsilon)$ – распределение электронов в вакууме по компоненте энергии, $V(\varepsilon)$ – компонента скорости, параллельная вектору тока, $\varepsilon^* = (\varepsilon - qU^*)$; $T(\varepsilon^*)$ – функция пропускания анода.

Продифференцировав (4), получим:

$$\frac{dJ}{dU} = \int_0^{\infty} qn(\varepsilon)V(\varepsilon)\frac{\partial T(\varepsilon^*)}{\partial U}d\varepsilon \equiv N(\varepsilon) \quad (6)$$

$N(\varepsilon)$ – распределение фотоэлектронов по энергиям это – величина пропорциональная количеству вылетевших электронов при данном напряжении. Численное дифференцирование приводит к возникновению малой погрешности. Поэтому для измерения производной $\frac{dJ}{dU}$ кроме постоянного напряжения U между фотокатодами, прикладывается переменное синусоидальное напряжение $U(t) = U_0 \sin(2\pi\Omega t)$, где U_0 – амплитуда модуляции, Ω – частота модуляции. Разложение в ряд Тейлора функции $J(U)$ имеет вид:

$$J(U + U(t)) - J(U) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} U_0^n \sin^n(2\pi\Omega t) \frac{d^n J}{dU^n} \quad (7)$$

Первый член производной ряда пропорционален энергетическому распределению фотоэлектронов.

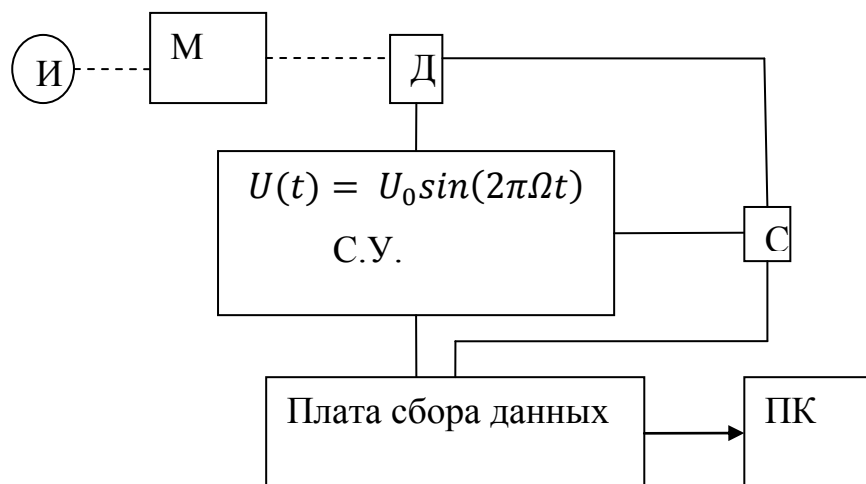


Рис.8. Схема установки для нахождения распределения электронов.

Д - фотодиод, М – модулятор, ПК – персональный компьютер, И – источник света, С.У. – синхронный усилитель, С - сумматор.

На рис.8. представлена блок-схема для измерения энергетического распределения фотоэлектронов по энергиям, которая включает в себя: фотокатод, Синхронный усилитель в качестве источника постоянного и переменного напряжения, сумматор, монохроматор.

Глава 3. Результаты измерений

В данной работе были измерены спектральные характеристики мультищелочного фотокатода. Получены спектр квантового выхода и энергетическое распределение эмитированных электронов при разных длинах волн.

При измерении спектральной характеристики и фототока фотодиода, была решена система из двух уравнений:

$$\begin{cases} W_{\text{пад}}(\lambda) * S_{\phi}(\lambda) = I_{\phi} \\ W_{\text{пад}}(\lambda) * S_{\delta}(\lambda) = I_{\delta} \end{cases} \quad (8)$$

где $W_{\text{пад}}(\lambda)$ - мощность падающего излучения, $S_{\phi}(\lambda)$ - спектральная характеристика фотокатода, $S_{\delta}(\lambda)$ - спектральная характеристика диода, I_{ϕ} и I_{δ} - величины фототока фотокатода и диода.

Зная спектральную характеристику и фототок фотодиода, мы можем получить $S_{\phi}(\lambda)$. Используя формулу 4, на рис.9. построена зависимость квантового выхода от длины волны для фотокатода в диапазоне длины волны 400 – 900 нм, при постоянном напряжении $U = 25$ В.

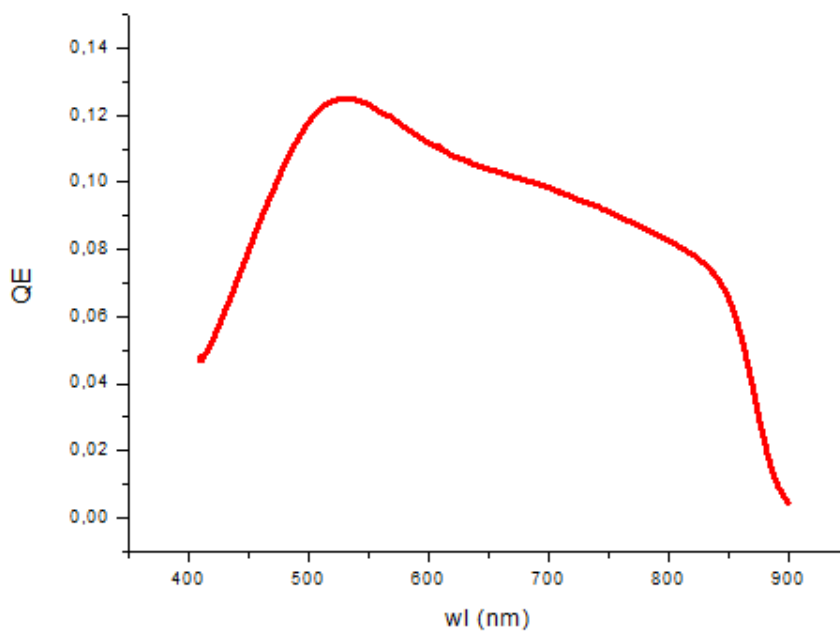


Рис. 9. Зависимость квантового выхода от длины волны

Рассмотрим фотокатод с толщиной 120 нм. В максимуме спектра квантового выхода при $\lambda = 550 - 570$ нм квантовый выход достигает примерно 0,125. Длинноволновая граница фотоэффекта $\lambda_0 = 860 - 880$ нм, что соответствует величине работы выхода $h\nu_0 = 1,4 - 1,44$ эВ.

На рис.10. приведены спектры энергетического распределения фотоэлектронов при освещении одного из электродов с длинами волн 550 и 850 нм. На приведенных энергетических распределениях хорошо виден вклад и от первого, и от второго электрода. Разница пиков по высоте обусловлена освещением со стороны только одного из электродов. Также из рис.10. можно заметить, что при нулевом напряжении фототок не равен нулю, из-за того, что в пространстве между фотокатодами создаётся контактная разность потенциалов, непосредственно связанная с работой выхода фотоэлектронов из фотокатода.

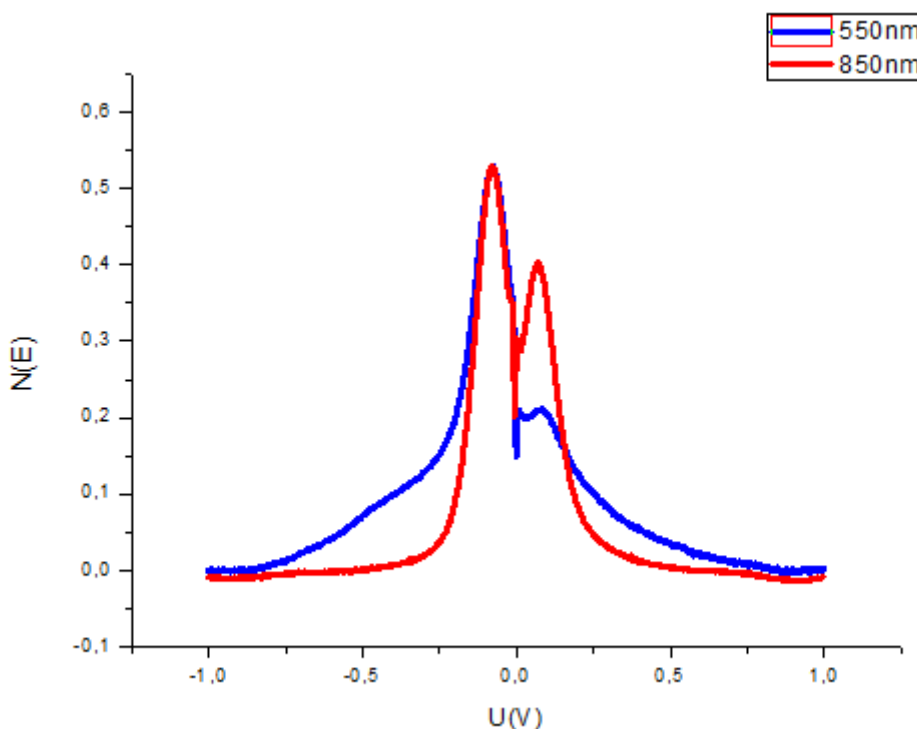


Рис. 10. Энергетическое распределение электронов фотокатода

Также стоит отметить, что ширина энергетического распределения значительно зависит длины волны падающего излучения. Это объясняется

тем, что есть часть рассеявшихся электронов, а некоторая часть вылетела с достаточно большой энергией.

Выводы и заключение

В ходе выполнения данной курсовой работы были получены следующие результаты:

1) Были изучены теоретические основы явления фотоэмиссии, структур энергетических уровней и мультищелочных фотокатодов.

2) Произведены расчёты для нахождения спектральной чувствительности фотокатода и по ней построена зависимость спектра квантового выхода от длины волны. Получены величины квантового выхода и работы выхода: $Y_{\lambda} = 0,125$ при $\lambda = 550 - 570$ нм, $A = 1,4 - 1,44$ эВ.

3) Построены энергетические распределения эмитированных фотоэлектронов для фотокатода при длинах волн 550 и 850 нм.

Стоит отметить, что результаты измерений получились типовыми.

Список используемой литературы

- 1) Н.А. Соболева, А.Г. Берковский, Н.О. Чечик. Фотоэлектронные приборы. (1965)
- 2) Д.В. Сивухин. Общий курс физики Том 3 Электричество. (1977)
- 3) М.Е. Левинштейн, Г.С. Симин. Барьеры. (1987)
- 4) Косинов А.Д. МЕТОДЫ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
- 5) Русецкий В. С., Терещенко О. Е. Исследование фотоэмиссионных свойств мультищелочных фотокатодов.
- 6) Орлов Д.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭМИССИИ ИЗ GaAs С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ СРОДСТВОМ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ ЭМИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ.