КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ

**Физико - технический факультет**

**Кафедра физики твердого тела и нелинейной физики**

|  |  |
| --- | --- |
| Келісілген:    Факультет деканы  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Давлетов А.Е.  № \_10\_"\_31\_" \_\_05\_\_ 2013 ж. | Университет Ғылыми-әдістемелік Кеңесінде бекітілді Хаттама №\_\_\_ «\_\_\_\_»\_маусым\_ 2013 ж.  Оқу жұмысы жөніндегі проректор  **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** Ахмед-Заки Д.Ж.  **"\_\_\_\_\_\_\_"\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**2013 ж. |

# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

**«Экспериментальные методы астрофизики »**

Для магистрантов специальности: 6М0611 – «Астрономия»

Форма обучения: дневная, 1-курс

**г. Алматы 2013 г.**

УМК дисциплины составлен доцентом, к.ф.-м.н. Сванбаевым Е.А. на основании учебного плана направлений подготовки специальности специальности: 6М0611 – «Астрономия»

Рассмотрен и рекомендован на заседании кафедры физики твердого тела и нелинейной физики

от «21» 05 2013 г., протокол № 36

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Приходько О.Ю.

(роспись)

### Рекомендовано методическим Советом (бюро) факультета

«28» 05 2013 г., протокол № 6

Председатель \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Габдуллина Г.А

(роспись)

**Лекции**

## сновные задачи астрофотометрии.

Из всего необъятного круга применений фотометрии в астрономии выделим области, которые могут считаться важнейшими.

Во-первых, как и в древности, звездные величины совместно с координатами служат для целей ориентации и навигации. Только теперь речь идет не об ориентации на поверхности Земли, а об автоматической ориентации и навигации космических аппаратов. Автомат в космосе должен уметь, направив свои датчики в произвольный участок неба, отождествить звезды, попавшие в поле зрения и определить координаты этого участка. Сложность заключается в том, что, как правило, спектральная чувствительность бортовых датчиков сильно отличается от общепринятых в астрономии фотометрических полос. Чаще всего эта полоса сильно сдвинута в красную и инфракрасную область. А там ярчайшими звездами будут уже не голубые Сириус с Вегой, а Бетельгейзе и другие, более слабые в визуальной области, красные звезды. Астрофотометрия должна уметь по измерениям в одной части спектра предсказывать реакцию прибора на излучение звезд в любой другой полосе пропускания.

Чтобы решить эту проблему нужно справиться со второй важнейшей задачей астрофотометрии. Она заключается в том, чтобы на основе многоцветной фотометрии звезд восстановить распределение энергии в их спектрах. Если эта задача будет решена успешно, то фундаментальная астрофизика получит данные о температуре, светимости и химическом составе атмосферы звезды, а прикладная астрономия ― звездную величину в любой наперёд-заданной полосе реакции приемника. Задача восстановления распределения энергии в спектре по фотометрическим данным тесно связана с задачей спектральной классификации. С математической точки зрения спектральная классификация, выполняемая фотометрическими методами, относится к разряду некорректно поставленных задач. Для ее решения нужно многое знать о типичных спектрах звезд. Эти вопросы мы будем рассматривать в 7-й главе.

В последние годы на совершенно новые рубежи вышла астрометрия. В этой области астрономии масса достижений. Астрометрия на Земле и в космосе сумела получить около миллиона измерений точных положений и собственных движений ярких звезд и измерить точные параллаксы практически всех звезд, удаленных не более чем на 200 парсек от Солнца. Современная точность астрометрии ― это примерно 0″,002 угловой секунды. На повестку дня выходят задачи получения астрометрических данных с погрешностями, не превосходящих 0″,00001 угловой секунды. Но, поскольку распространение света в любой среде, кроме абсолютного вакуума, зависит от длины волны, то эту задачу нельзя решить, если не располагать данными высокоточной многоцветной фотометрии.

И, наконец, остается еще одна важнейшая задача астрофотометрии: исследование изменений приходящего от звезды потока излучения со временем. Изучение многочисленных и разнообразных эффектов переменности звезд было и остается крайне необходимым для понимания строения и эволюции звезд и звездных систем. В последнее время возникает все больше задач, требующих предельно высокой фотометрической точности. Это изучение радиальных и нерадиальных пульсаций звезд на разных гармониках, задачи астросейсмологии и многое другое

## Единицы измерения лучистой энергии.

Пусть имеется точечный источник излучения, т.е. такой источник, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до него ― звезда (см. рисунок 1.2). Если точечный источник излучения окружить со всех сторон воображаемой сферой радиуса *R*, то через поверхность этой сферы за интервал времени *t* будет проходить некоторое количество электромагнитного излучения *W.* За единицу времени через поверхность этой сферы пройдет количество лучистой энергии

, (1.1)

которое характеризует полную мощность электромагнитного излучения источника и называется в астрономии *светимостью* *звезды.* Чаще всего светимость выражают не в эргах в секунду или в ваттах, а в долях светимости какой-либо другой звезды, например, Солнца. Напомним, что светимость Солнца равна *.*

Теперь рассмотрим какое-то выделенное направление. Выберем по этому выделенному направлению маленькую площадку на сфере, имеющую площадь *S*. Через эту площадку, которая видна из источника под телесным углом , проходит малая доля излучения звезды *dw.* Если излучение источника изотропно, т.е. одинаково во всех направлениях, то . Мощность излучения, проходящего через площадку *S* (этой площадкой может быть зрачок глаза, объектив телескопа т.п.), называется *энергетическим потоком излучения* или просто *потоком излучения*. Размерность потока *эрг/с* или *Вт.* Когда мы измеряем количество лучистой энергии, мы всегда измеряем именно поток.

CONUSЕсли поток излучения пересчитать на один стерадиан, т.е. умножить *dw* на отношение площади сферы в телесном угле 1 стерадиан () к площади рассматриваемой малой площадки, то такая мощность

 (1.2)

называется *силой света*. Это та мощность лучистой энергии, которая распространяется по выделенному направлению, но пересчитана так, как будто она изотропно излучается источником в конус раствором в один стерадиан. Светимость и сила света являются характеристиками источника и не зависят от свойств приёмника излучения. Величина потока зависит как от свойств источника, так и от размера входного отверстия приемника, а поскольку у разных приемников этот размер различен, (размеры зеркал телескопов разные и т.д.), то нужна единица, которая позволяла бы нам сравнивать мощности излучения, проходящего через площадки разной площади. Совершенно очевидно, что для этого нужно пересчитать количество излучения от общей площади *S* на единицу площади (*см*2, *м*2 и т.п.). Количество излучения, приходящее в единицу времени на единицу площади называется *энергетической освещенностью E*:

Рис.1.2. К определению основных световых величин.

. (1.3)

Освещенность имеет размерность *эрг∙с-1.см*-2 или, если хотите, *Вт/м*2.

Если имеются два точечных источника и один создает в вашем глазу (или на объективе вашего телескопа) освещенность *Е*1, а другой — *Е*2, то два с половиной логарифма этого отношения с отрицательным знаком исторически называется разностью звездных величин источников (1) и (2).

 (1.4)

Формула (1.4) выражает *закон Погсона,* предложенный в середине XIX века. Это абсолютно правильная и абсолютно четкая формула, которая связывает две энергии и две звездных величины.

Иногда закон Погсона (1.4), удобнее записывать не через десятичный, а через натуральный логарифм, и тогда здесь возникает коэффициент, равный 2,5/ln10, что примерно равно 1,086.

. (1.5)

Формула Погсона играла важнейшую роль в астрофотометрии до тех пор, пока единственным приемником излучения являлся человеческий глаз. Но при появлении иных приемников выяснилось, что эта формула нам мало что дает. Энергетические потоки от наших источников ― это совсем не то, что воспринимают наши конкретные приборы (фотопластинка, фотоэлемент и пр.), и нельзя сравнивать звездные величины, определённые с помощью разных приёмников. Все приёмники излучения являются *селективными*, т.е. реагируют не на полную энергию, а только на определенный диапазон электромагнитного излучения, причем одному и тому же количеству световой энергии, пришедшей в разных длинах волн, будут соответствовать разные отклики приёмника. Правда, существуют приёмники, которые реагируют именно на полную энергию. Они называются *болометрами,* воспринимают излучение очень широкого диапазона длин волн и для всех этих длин волн имеют примерно одинаковую чувствительность. Недостаток всех современных болометров прежде всего в том, что чувствительность их низка. Освещать такой прибор нужно достаточно сильным потоком, что далеко не всегда возможно при измерениях астрономических объектов. Селективные же приемники, начиная с глаза и кончая ПЗС, обладают весьма высокой чувствительностью. Глаз человека начинает ощущать свет уже тогда, когда в зрачок попадает несколько десятков квантов. Эмпирически установлено, что если за характерное для глаза время порядка 0,1 *с* в зрачок глаза попадают несколько десятков квантов видимого света, то глаз, хорошо адаптировавшийся к темноте, уже воспринимает этот поток как ощущение света. То же самое можно сказать о современных фотоэлектрических приемниках, о которых мы будем говорить в последующих главах.

На самом деле энергии *Е*1 и *Е*2 в формулах (1.4) и (1.5) суть энергии излучения, распределенные по всему спектральному диапазону. Если взять для некоторой определенной частоты или длины волны отношение потока излучения в узком интервале длин волн к ширине этого интервала, то получим *спектральную плотность энергетического потока*. Аналогично можно получить спектральную плотность силы света или освещённости. Спектральную плотность можно относить как к единице частоты, так и к единице длины волны. Иногда вместо термина «спектральная плотность» говорят об *удельном потоке* или *удельной освещенности,* но следует иметь в виду, что термины *спектральная плотность энергетической освещенности* и *спектральная плотность энергетического потока* приняты по ГОСТ. Для термина *спектральная плотность энергетической освещенности* часто применяют сокращение СПЭО и выражают эту величину в единицах СИ, т.е. в *Вт/м*3 (мощность, отнесённая к единице площади и единице длины волны). В единицах такой размерности представлены данные в целом ряде звездных спектрофотометрических каталогов, в которых содержатся сведения о СПЭО, создаваемыми различных звездами на верхней границе земной атмосферы. Об этих каталогах мы будем говорить в дальнейшем.

Как правило, мы не будем пользоваться техническими терминами «спектральная плотность энергетической освещенности» или «спектральная плотность энергетического потока» потому, что в астрономии все эти функции принято называть *распределением энергии в спектре *.

Следует различать собственное распределение энергии в спектре звезды ** и распределение энергии в спектре звезды на верхней границе земной атмосферы *.* Свет звезды, распространяясь в направлении Солнечной Системы, может испытать ослабление за счет поглощения и рассеяния в межзвездной среде. Очевидно, что

, (1.6)

где  ― закон спектрального ослабления света в межзвездном пространстве, а *X* ― количество единиц межзвездного вещества на пути света звезды.

## 1.5. Cпектральная чувствительность регистрирующего прибора. Понятия и терминология.

Повторим еще раз, что наши измерения практически всегда проводятся с селективным приемником, который имеет чувствительность к определенному и достаточно широкому диапазону длин волн. Внутри этого диапазона селективный приемник имеет разную чувствительность к излучению с разными длинами волн. *Спектральная чувствительность*  приемника излучения ― это функция, которая связывает энергию излучения в данной длине волны и *отклик* приемника на это монохроматическое излучение. Откликом приемника могут быть самые разнообразные физические величины. Для человеческого глаза это психофизиологическая величина ― ощущение. Для других приемников это вполне физическая величина. Для каждого приемника она своя. Для фотографической пластинки ― это количество зерен почерневшего галоидного серебра. Для фотоэлемента или ФЭУ ― это выходной электрический ток. Для приемника с внутренним фотоэффектом, например, для фотосопротивления, ― это его проводимость и т.д. Спектральный отклик приёмника  ― физическая величина, возникающая на выходе приёмника под воздействием энергии излучения. Если последовательно освещать приёмник монохроматическими лучами разных длин волн, то в каждой длине волны можно измерить отношение отклика приемника к падающему потоку излучения. Зависимость этого отношения от длины волны и есть спектральная чувствительность приемника. Очень часто она представляется не в абсолютном виде (в эргах или ваттах), а в виде безразмерных относительных чисел, т.е. абсолютная спектральная чувствительность нормируется на значение в какой-либо характерной длине волны. Относительные спектральные чувствительности типичных приёмников излучения представлены в виде таблиц в большом количестве справочников. (См. Приложение Т.)

Абсолютные значения спектральной чувствительности, как правило, не приводятся. Они различны для различных конкретных приборов. В любом случае на чувствительность собственно светочувствительного элемента накладывается еще достаточно большое количество других функций, которые искажают общую спектральную чувствительность. В частности, если поставить приемник на телескоп, то на чувствительность светоприемника, накладывается спектральное пропускание оптики телескопа (независимо от того, линзовый это или зеркальный телескоп). Пропускающая способность линзы или отражательная способность зеркала всегда зависит от длины волны. Кроме этого, во время наблюдений мы можем использовать какие-либо светофильтры. С одним и тем же приемником, вводя в световой пучок разные светофильтры, мы выделяем излучение в разных диапазонах длин волн и получаем в результате различные *кривые реакции* регистрирующего прибора при одной и той же спектральной чувствительности светоприёмника.

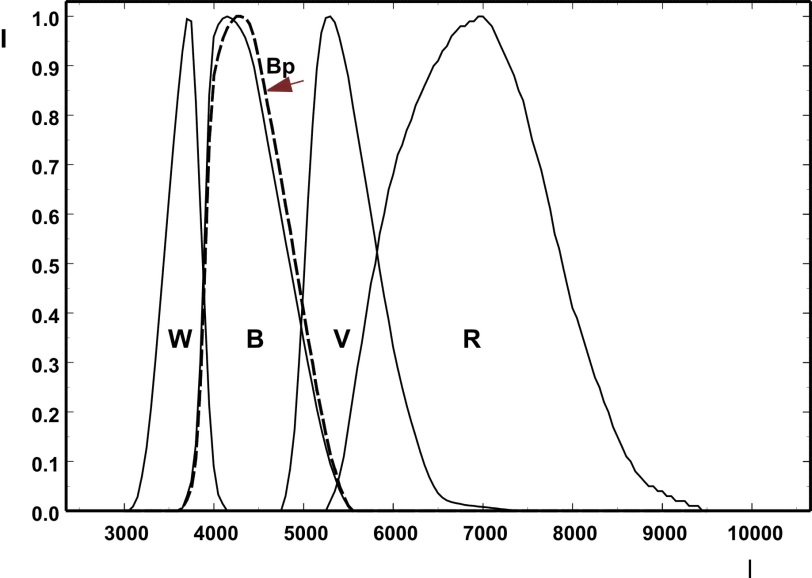
На рис. 1.3 изображены четыре кривых реакции типичной многоцветной широкополосной фотометрической системы. В последующих главах мы подробно обсудим этот рисунок, а сейчас сосредоточим внимание только на одном факте: один и тот же приемник излучения, в данном случае фотокатод, имеющий чувствительность в области от 2500 Å до 9000 Å реагирует на свет в разных участках спектра, которые выделяются светофильтрами. Участки спектра, выделяемые из области спектральной чувствительности светочувствительного приёмника однотипными светофильтрами в сочетании со спектральной чувствительностью этого приёмника, называются *фотометрическими полосами*. Выбирая фотометрическую полосу, мы грубо определяем участок спектра, излучение от которого будет измерять наш прибор. Как правило, фотометрическая полоса определяется двумя параметрами: средней длиной  волны и полушириной . Средняя длина волны фотометрической полосы, заданной кривой реакции *R*(*λ*) определяется по формуле

Рис. 1.3. Кривые реакции типичной многоцветной фотометрической системы *WBVR*.

 (1.7)

где *—* кривая реакции регистрирующего прибора. Поскольку функция  имеет,как правило, один максимум, то можно по обе стороны от него определить значения длины волны, в которых значения  равны половине максимального. Расстояние по шкале длин волн между этими значениями является полушириной .

Кривые реакции, показанные на рис.1.3 — это кривые реакции фотометра, с помощью которого был сделан каталог фотометрических характеристик ярких звезд, выполненный группой исследователей ГАИШ МГУ в Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории во второй половине 1980-х годов. Тянь-Шаньские фотометрические полосы *W, B, V* и *R* похожи на классические полосы *U, B, V* и *R,* введённые знаменитым американцем Гарольдом Джонсоном.

Есть еще один важный эффект, который доставляет нам немало хлопот, еще один светофильтр, который поставила нам сама природа. Этот весьма селективный фильтр ― спектральное пропускание земной атмосферы. Хорошо, если наблюдения проводятся с борта космического аппарата. Однако очень часто ещё приходится работать с поверхности Земли, и поэтому необходимо знать и уточнять на момент измерений функцию *спектрального пропускания земной атмосферы* . Кроме того, что эта функция представляет собой сложную зависимость от длины волны, она зависит ещё и от толщи воздуха, которую проходит свет. Минимальная толща в зените (при зенитном расстоянии ) принимается за единицу *атмосферной (или воздушной) массы *. График типичной функции *спектрального пропускания земной атмосферы в зените* на уровне моря  показан в главе 6 на рис. 6.16. Если отойти от зенита на некоторое расстояние, то, в первом приближении, зенитную функцию следует возвести в степень воздушной массы

. (1.8)

Произведение функции спектральной чувствительности светоприемника на функции пропускания всех светофильтров, включая, если требуется, земную атмосферу, мы будем называть *инструментальной кривой реакции* регистрирующего прибора и обозначать через . Буква *T* (начальная буква в английском слове total ― весь; общий, суммарный) символизирует то, что в эту функцию включены все селективные искажающие эффекты.

Для того, чтобы определить звездную величину небесного объекта нужно, кроме кривой реакции, задать нуль-пункт, т.е. кроме спектральных свойств приёмника излучения определить, какому количеству излучения, на которое реагирует наш приёмник, мы приписываем некоторое конкретное число: *нуль-пункт.*

Инструментальную кривую реакции в совокупности с нуль-пунктом называют, инструментальной *фотометрической системой*. Одну из инструментальных систем принимают в качестве *стандартной* фотометрической системы для данной фотометрической полосы. Впоследствии все измерения, выполненные в инструментальной системе нудно будет редуцировать в стандартную.

Термин *фотометрическая система* употребляется в двух смыслах. Во-первых, как синоним понятия кривая реакции (одноцветная фотометрическая система) плюс нуль-пункт, и, во-вторых, как набор нескольких кривых реакции в нескольких фотометрических полосах (многоцветная фотометрическая система) в совокупности со своими нуль-пунктами в каждой из этих полос. Многоцветные фотометрические системы позволяют приблизительно оценить функцию распределения энергии в спектре. Некоторые дополнительные требования к определению фотометрической системы мы рассмотрим в главе 8.

Состав функции  можно представить как суперпозицию нескольких спектральных функций следующим образом

 (1.9)

Здесь  ― спектральная чувствительность приемника,  ― спектральное пропускание оптики телескопа,  ― спектральное пропускание светофильтра с номером *i*. Смысл верхнего штриха в обозначении  мы разберем далее в разделе 7 настоящей главы. Произведение функций, зависящих только от свойств аппаратуры, будем в дальнейшем обозначать символом 

## 1.6. Гетерохромная звездная величина.

Если вычислить свертку функции распределения энергии в спектре ** с функцией инструментальной кривой реакции , то, в предположении о линейности нашего приёмника излучения, получим величину, пропорциональную полному отклику *G* регистрирующего прибора.

. (1.10)

Здесь *k* ― коэффициент пропорциональности, а  и  ― границы области спектральной чувствительности приемника. Отметим, что в формуле (1.10) смело можно считать, что  ― относительная кривая реакции. В самом деле, она отличается от абсолютной только тем, что в каждой точке нормирована (разделена) на постоянное число, а именно: на свое значение в некоторой характерной длине волны (например, на значение в максимуме). Можно считать, что этот постоянный множитель уже вынесен из под знака интеграла и включен в коэффициент пропорциональности *k.*

Пусть наш регистрирующий прибор отреагировал на излучение двух звезд с номерами (1) и (2) откликами *G*1 и *G*2, соответственно. Тогда, в полной аналогии с формулами (1.4) и (1.5), можно записать

. (1.11)

Заметим, что коэффициенты пропорциональности *k* сократились.

Выражение (1.12) является определением разности *гетерохромных звездных величин*.

Если в пределах интервала (,) функции ** и ** являются константами, т.е. не зависят от длины волны, то их можно вынести из под знака интеграла; тогда интегралы в числителе и знаменателе сокращаются и формула (1.11) приобретает точно такую же форму, что и формулы (1.4) и (1.5). В частности, часто можно считать, что в пределах узкого интервала , где , функция распределения энергии в спектре постоянна. Поэтому формулы (1.4) и (1.5) являются одновременно определением разности *монохроматических звездных величин*.

Представим себе, что для одной из двух звезд, разность величин которых задает формула (1.11), нам известна ее звездная величина, соответствующая фотометрической полосе, заданной кривой реакции . Пусть, для определенности это звезда с номером 2. Такую звезду уместно назвать *стандартом*. Тогда значение отклика на вторую звезду вместе с известной величиной  зададут нам некую константу

. (1.12)

. (1.13)

Эта константа будет единой для данного приемника, она не зависит от распределения энергии в спектре звезд, величину которых мы хотим получить.

Стандарту мы всегда **приписываем** звездную величину. Именно это сделал Гиппарх во 2 веке до н. э. При создании современных фотометрических систем делается то же самое. Определяется процедура, которая позволяет той или иной звезде или группе звезд приписать аксиоматически (выдумать из головы!) некое число и сказать, что это число — звездная величина стандарта. Величина стандарта совместно с измеренным отсчетом задает нам константу в формуле (1.12). Когда в дальнейшем изложении неоднократно будет упоминаться, что звездная величина есть интеграл от произведения функции распределения энергии этой звезды и кривой реакции аппаратуры плюс константа, мы всегда будем понимать, что для определения такой константы нам нужен стандарт. Тогда можно на этот стандарт навестись, измерить его с помощью фотометра, получить отклик и вычислить эту константу.

## 1.7. Показатель цвета и связь фотометрических систем.

Пусть имеются две фотометрических полосы, например *В* и *V* или *U* и *R*, или, в общем случае, какая-то полоса с номером *i* и кривой реакции и другая полоса с номером *j* и кривой реакции . Пусть, как и прежде, имеются две звезды, вторая из которых ― стандарт. Если  и  ― отклики прибора на излучение первой звезды, соответственно, в полосах *i* и *j*, а  и  ― отклики того же прибора на излучение второй звезды (стандарта), с известными величинами  и  то по формуле (1.13)

.

Вычитая второе равенство из первого, и учитывая формулу (1.12), имеем

 (1.14)

Эта разность звездных величин, полученных в двух фотометрических полосах, называется *показателем цвета* или *колор-индексом*. Константа *consti,j* определяется по наблюдениям стандарта. Обычно считается, что для стандартов избранного сорта, а именно: для непокраснённых звезд спектрального класса А0 главной последовательности, звездные величины во всех всевозможных полосах одинаковы, т.е. все возможные показатели цвета для них равны нулю. Поэтому

 (1.15).

Если наблюдения проведены в *n* фотометрических полосах, то из полученных звездных величин можно составить  показателей цвета. Из этих показателей цвета  будут независимыми

Представим, что есть две фотометрические системы *i* и *j* или, скажем, *B* и *V*, и были произведены измерения звездной величины некоторой звезды в одной из этих систем. Для того чтобы вычислить величину звезды в другой системе нужно из первой величины вычесть показатель цвета. Итак, чтобы перевести звездную величину из одной фотометрической системы в другую нужно знать показатель цвета между этими системами.

Собственные, присущие самим звездам показатели цвета называются *нормальными*. В противоположность этому наблюдаемые показатели цвета, искажённые межзвездной экстинкцией, называются *покраснёнными*.

Ещё следует сказать, что, когда мы проводим измерения, у нас в данное время существует какая-то мгновенная функция . Она, безусловно, мгновенная, т.е. существенно изменяется со временем. Если в нее входит атмосфера, то здесь этим одним все сказано. Но даже без атмосферы в нее входит кривая чувствительности приемника, которая зависит от целого ряда изменяющихся параметров. Приемник установлен на телескопе, где может изменяться температура и, как следствие, спектральная чувствительность приемника. Перед светочувствительным элементом установлен светофильтр. Существует много публикаций о том, как пропускание стеклянных светофильтров зависит от температуры. Т. е. мы в любом случае в каждый данный момент производим измерения в какой-то своей оригинальной фотометрической системе. Естественно, что из-за этого нельзя непосредственно сравнивать измерения, сделанные в разное время, даже в две соседних ночи. Именно для того чтобы сравнивать фотометрические измерения, сделанные разными авторами на разных телескопах в разные времена, нужно все измерения переводить в *стандартную фотометрическую систему*. Для такого перевода понадобится знать показатель цвета между инструментальной фотометрической системой  и стандартной системой , где *Т* ― уже без штриха.

## 1.8. Об ошибках при астрофотометрических измерениях.

Как и при всяких измерениях, измерения звездных величин сопряжены со случайными и систематическими ошибками. Часто случается, что, когда говорят об ошибках, имеют в виду только ошибку, возникающую из-за квантовой природы излучения. Разумеется, такая ошибка возникает всегда. И, если измеряется очень слабый поток, эта ошибка ― основная. Но представим себе, что поток настолько велик, что относительная величина квантовых флуктуаций  (*N* ― число зарегистрированных событий) пренебрежимо мала. Тогда на первый план выступают ошибки, связанные с недоучетом аппаратурных эффектов и несовершенством методики проведения измерений и их обработки. Хорошо известен эмпирический факт: если имеется обычный классический фотоэлектрический фотометр, который установлен на столе в лаборатории, то среднеквадратическая ошибка его отклика на постоянный поток излучения не превышает 0,001 звездной величины. Напомним, что в соответствии с формулой (1.5) изменению величины сигнала на 1% соответствует разность звездных величин примерно равная 0*m*,01. Так что неподвижный фотометр в лабораторных условиях даёт относительную случайную ошибку порядка 0,1%. Это высокая точность. Но как только этот фотометр оказывается закрепленным на телескопе, возникает большое количество воздействий на него. Изменяется температура, возникают гнутия в оптической системе, меняется ориентация этого фотометра по отношению к направлению магнитного поля Земли и т.д. Для учета всех этих эффектов мы должны построить адекватные математические модели и из специально организованных измерений определить параметры этих моделей. Разумеется, никакая модель не описывает полностью реальную ситуацию, так что в итоге возникают неучтенные *систематические ошибки*. Наши измерения оказываются выполненными в индивидуальной и нам неизвестной фотометрической системе, перевод из которой в стандартную систему, естественно, будет произведен с ошибками. В отличие от ошибок случайных, систематическую ошибку нельзя уменьшить путем проведения повторных измерений и усреднения результатов.

Одна из основных целей нашего курса и состоит в том, чтобы получить представление о наличии различных видов систематических ошибок, представлять их природу и, таким образом, быть в состоянии моделировать возникновение этих ошибок, чтобы затем учесть их при обработке. В частности, нас всегда будет интересно знать, как получить показатель цвета между двумя фотометрическими полосами, между двумя системами: системой инструментальной, которая сегодня у вас реализуется на телескопе, и системой стандартной.

Подчеркнем, что стандартная система не обязана существовать физически. Нам вовсе не обязательно, чтобы существовал какой-то конкретный фотометр, у которого была бы неизменная стандартная спектральная кривая чувствительности. Вполне достаточно, если эта кривая нарисована в форме графика, или, лучше, представлена в виде таблицы. Такая система уж точно не будет зависеть ни от времени, ни от других факторов. Неопределенности задания стандартной системы прямо войдут в результат ваших измерений и сложатся с их ошибками. Вопросы о переводе данных измерений в стандартную фотометрическую систему будут рассмотрены в Главе 12.

## 1.9. Вынос.

К счастью для нас, но к сожалению для фотометрии, мы живём на планете с атмосферой. При наземных наблюдениях всегда существует светофильтр между приёмником и излучателем. Перепишем формулу (1.9) следующим образом:

 (1.16)

Здесь в множитель  вошли все факторы, не связанные с влиянием атмосферы. Индекс *i* указывает на номер применяемой фотометрической полосы. В дальнейшем изложении в пределах данного раздела мы опустим для простоты записи индекс *i,* временно считая, что мы работаем только в одной полосе.

Если выйти за пределы атмосферы, то, в соответствии с формулой (1.10) реакция нашего приемника (отклик) на излучение звезды с распределением энергии в спектре будет равна

. (1.17)

Под атмосферой тот же самый прибор даст другой отклик, отличающийся от предыдущего на фактор влияния атмосферы:

. (1.18)

Если обе части выражения (1.18) разделить на (1.17) и взять от этого отношения 2,5 логарифма с минусом, то мы узнаем, на сколько звездных величин ослабела звезда, пока свет проходил через атмосферу. В. Страйжис стал называть эту величину *вынос*. Итак, вынос ― это разница в звездных величинах инструментальных величин, полученных под атмосферой и вне атмосферы.

 (1.19)

Обратите внимание на то, что в формуле (1.19) одинаковые функции  и  входят в подынтегральные выражения и в числителе и в знаменателе. Поэтому значение выражения не изменится, если значения этих функций в каждой точке умножить или разделить на одинаковое число. Эти константы можно будет вынести из под интегралов и они сократятся. Следовательно, как распределение энергии в спектре, так и кривые реакции могут быть выражены в относительных единицах, например, нормированы на свой максимум.

Опишем теперь последовательность действий при выносе измеренной податмосферной величины за атмосферу. Чтобы из отсчетов под атмосферой на исследуемую звезду (с номером 1) и на стандарт (с номером 2) получить внеатмосферные величины, нужно определить для них значения выносов.

Первый шаг.

Возвращаясь к формулам (1.11)-(1.13) признаемся теперь, что известной является именно внеатмосферная звездная величина стандарта  в стандартной фотометрической системе , а не в инструментальной . (Нижний индекс «2» обозначает номер звезды, а верхний индекс «0» обозначает, что это внеатмосферная величина в стандартной системе.) Однако мы проводим измерения не в стандартной, а в инструментальной системе. Следовательно, первое, что надо сделать при учете атмосферы, это перевести стандартную внеатмосферную величину стандарта во внеатмосферную инструментальную и получить величину . (Как и раньше, верхний штрих относится к величинам в инструментальной системе.) Измерить разность между стандартной и инструментальной величинами стандарта, очевидно, не удастся. Но её можно вычислить, если представлять себе внеатмосферное распределение энергии в спектре стандарта  и знать нашу инструментальную систему . По формуле (1.14) вычисляем:

. (1.20)

Второй шаг.

Теперь знаем внеатмосферную инструментальную величину стандарта. Внесем ее под атмосферу, используя формулу для выноса (1.19) и модельную функцию спектрального пропускания атмосферы.

. (1.21)

Третий шаг.

Теперь используем полученную податмосферную величину стандарта в инструментальной системе, чтобы по формулам (1.12) и (1.13) получить податмосферную величину звезды (1) в инструментальной системе

. (1.22)

Четвертый шаг.

По формуле (1.19) получаем внеатмосферную величину звезды в инструментальной системе.

. (1.23)

Теперь осталось перевести инструментальную внеатмосферную величину звезды (1) в стандартную систему. Эта процедура будет рассмотрена в главе 12.

Глядя на формулу (1.19) нельзя не задать себе вопрос: что же получается?! Ведь чтобы вычислить внеатмосферную звездную величину звезды, мы, оказывается, должны знать распределение энергии в её спектре. А если знать распределение энергии в спектре звезды, да еще все кривые реакции, то можно вычислить этот интеграл и получить все, что нужно безо всяких наблюдений! Но ведь мы не знаем распределения энергии в спектре исследуемой звезды!

Тут необходимы два соображения.

Первое: если мы не знаем распределение энергии в спектре звезды точно, но знаем, это хотя бы грубо, знаем, например, что эта звезда спектрального класса А, а не К, значит уже как-то можно оценить интеграл. Если мы не знаем достаточно хорошо мгновенную кривую реакции, но знаем ее среднее, значит тоже уже можно что-то оценить. Тогда из наблюдений мы постараемся получить не полную разность истинной внеатмосферной и измеренной податмосферной величин звезды, а поправку к нашей оценке, полученной на основании предварительных сведений о подынтегральных функциях. Основной, главный член нашей разности вычислим по этим формулам, а из наблюдений будем искать малую поправку. Поскольку она мала, даже большая ошибка ее определения внесёт не слишком большую ошибку в результат.

Второе: можно надеяться, что эта поправка может быть вычислена итерационным методом. На каждом шаге итераций мы будем уточнять как кривую энергии звезды, так и кривую реакции, и, в результате, процесс сойдется к правильному значению нашей малой поправки.

Понятно, что чем точнее мы будем представлять вид и поведение функций, входящих в подынтегральное выражение (1.11) тем с большим успехом можно будет реализовать изложенную выше идею. В последующих главах мы разберем, какие бывают звезды с точки зрения распределения энергии в их спектре, какие бывают приемники с точки зрения их спектральной чувствительности, какие можно применять светофильтры, что внесет атмосфера, и как представить хорошей математической моделью функции в формуле (1.11). Если мы найдем такую совершенную модель, которая даст результат совпадающий с истинным, тогда мы сразу получим правильный ответ. Но поскольку наша модель, конечно, не будет столь совершенной, мы рассмотрим вопрос о том, как из наблюдений получить поправку к результату.

Анализ и способы исследования функций и  и составляют содержание курса основ астрофотометрии.

**казахский национальный университет имени аль-фараби**

**Физико-технический факультет**

**Кафедра физики твердого тела и нелинейной физики**

|  |  |
| --- | --- |
|  | Утверждено на заседании Ученого совета факультета  Протокол №\_10 от 31.05.2013 г.  Декан факультета \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Давлетов А.Е. |

### СИЛЛАБУС (SYLLABUS)

**Экспериментальные методы астрофизики**

для магистрантов 1-го курса по направлению подготовки

6М0611 – Астрономия

**Лектор:** Е.А.Сванбаев , к.ф..-м. н., ст. преподаватель, т.8775 846 4415, e-mail:eldos54@mail.ru

каб. 202:

**Преподаватель (практические, семинарские, лабораторные занятия):**

Ф.И.О., ученая степень, звание, должность, телефоны (рабочий, домашний, мобильный), e-mail: , каб.:

**Цель и задачи дисциплины:**

**Цель:**  ознакомление с современными принципами и методами измерения количества светового излучения, приходящего от космических источников, изучение принципов действия оптических и оптоэлектронных приборов, применяемых в астрофотометрии, и развитие навыков применения полученных знаний на практике.

**Задачи:** В курсе излагаются вопросы, касающиеся методов измерения количества приходящего от космических источников электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, простирающемся от нескольких сотен ангстрем до сотен микрометров, а также способов повышения точности этих измерений.

**Компетенции:**

**После прохождения курса** студент **должен**

**знать** задачи, инструментальную базу и методы современной астрономической фотометрии,

**иметь представление** о факторах, влияющих на результаты звездной фотометрии, и методах учета соответствующих систематических ошибок,

**уметь** применять инструментальную базу и методы современной астрономической фотометрии.

**Пререквизиты:** Для усвоения курса студент должен иметь знания по общей астрономии, основам электромагнетизма и оптики в объеме читаемых на факультете курсов.

**Постреквизиты:** Знания и умения, полученные студентами при усвоении дисциплины «Экспериментальные методы астрофизики» являются базой для применения в прикладных астрофотометрических исследованиях.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **содержание** | **Часы** | **Задания СРСП** |
| **1** | **Лекция 1.** Проблемы и ограничения наземной астрометрии. |  |  |
| **Семинар 1.** Первые фотометрические каталоги. |  |
| **Лаб. Раб. 1** Изучение энергетической характеристики низкопорогового фотоприемника. |
| **2** | **Лекция 2.** Возможности меридианных телескопов с  автоматическим управлением. |  | СРСП 1. История и содержание некоторых фотометрических каталогов: система UBV; новые каталоги |
| **Семинар 2.** Фотометрические каталоги системы UBV. |  |
| **Лаб. Раб. 2** Изучение спектров поглощения воды |
| **3** | **Лекция 3.** Меридианный телескоп зеркально-линзовой  системы. |  |  |
| **Семинар 3.** Описание фотографического вертикального круга Л.А. Сухарева (Пулковская  обсерватория). |  |
| **Лаб. Раб. 3** Анализ спектров поглощения воды в атмосере. |
| **4** | **Лекция 4.** Современные методы исследований и наблюдений. |  | СРСП 2. Телескопы, их виды, строение и характеристики: оптические телескопы |
| **Семинар 4.** Принципиальная схема и особенности АМК (НАО, Украина). |  |
| **Лаб. Раб. 4** Исследование вольт-амперной характеристики полупроводникового фотоэлемента |
| **5** | **Лекция 5.** Фотографическая фотометрия с рефлекторами. Фотографическая фотометрия с зеркально-линзовыми телескопами. |  |  |
| **Семинар 5.** Информация – тәуелсіз физикалық шама. |  |
| **6** | **Лекция 6.** Спектральная чувствительность фотослоев. Достоинства и недостатки фотографии. |  | СРСП 3. Стандартные светофильтры для астрофотометрии. |
| **Семинар 6.** Спектральные параметры светофильтров. |  |
| **Лаб. Раб. 6** Исследование спектральных характеристик тонкопленочных фотопреобразователей |
| **7** | **Лекция 7.** Приборы и устройства фотоэлектрической фотометрии: регистрация фототока, вывод формул учета нелинейности в методе счёта фотонов, оценка влияния нелинейности на измерение световых потоков. |  |  |
| **Семинар 7.** Телескопы, их виды, строение и характеристики: оптические телескопы. |  |
| **Лаб. Раб. 7** исследованиеэнергетической характеристики фоторезистора. |
| **8** | **Лекция 8.** Астрофотометрия с помощью приборов с зарядовой связью: устройство ПЗС, спектральная чувствительность ПЗС. |  | СРСП 4. многоканальные астрофотометры; фотоэлектрический сканирующий спектрометр |
| **Семинар 8.** История и содержание некоторых фотометрических каталогов: система UBV; новые каталоги. |  |
| **9** | **Лекция 9.** Классический фотоэлектрический фотометр, Приборы и устройства фотоэлектрической фотометрии: счетная характеристика фотоумножителя,. |  |  |
| **Семинар 9.** Приборы и устройства фотоэлектрической фотометрии: диафрагма, светофильтры, линза Фабри, фотоумножители. |  |
|  |
| **10** | **Лекция 10.** Астрофотометрия с помощью приборов с зарядовой связью: передача зарядовых пакетов, переполнение пикселов, учет неравномерности чувствительности пикселов при фотометрии с ПЗС, функция рассеяния точки.. |  | СРСП 5. Свойства излучения и основы спектрального анализа: тепловое излучение; излучение абсолютно черного тела. |
| **Семинар 10.** фотография и фотографические звездные величины. |  |
|  |  |
| **11** | **Лекция 11.** Распределение энергии в спектрах звезд различных спектральных типов: фотометрия, спектрофотометрия и спектроскопия; абсолютное распределение энергии в спектре звезд;. |  |  |
| **Семинар 11.** свойства и параметры полупроводникового фотоприемника. |  |
| **Лаб. Раб. 8** Исследование спектральной характеристики вакуумного фотоэлемента. |
| **12** | **Лекция 12.** спектральная классификация и распределение энергии в спектре; каталоги спектрофотометрических данных. |  | СРСП 6. Влияние межзвездного поглощения света на внеатмосферное распределение энергии |
| **Семинар 12.** абсолютное распределение энергии в спектре звезд |  |
|  |
| **13.** | **Лекция 13.** Обработка фотометрических наблюдений: создание системы стандартов; измерение кривой реакции фотометра. |  |  |
| **Семинар 14.** Астрофотометрия с помощью приборов с зарядовой связью: устройство ПЗС, спектральная чувствительность ПЗС |  |
|  |
| **14** | **Лекция 14.** Организация, проведение и обработка фотометрических наблюдений: порядок подготовки данных и проведения измерений в ходе составления |  | СРСП 7. Распределение энергии в спектрах звезд различных спектральных типов: примеры распределений энергии в спектрах звезд разных спектральных типов |
| **Семинар 14.** Спектральная классификация звезд |  |
|  |
| **15** | **Лекция 15. О**бработка данных измерений Тянь-Шаньского WBVR-каталога. |  |  |
| **Семинар 15. М**етоды учета влияния атмосферы и других факторов на точность звездной фотометрии. |  |  |
|  |

**Литература**

**Основная литература**

1. Миронов А.В. Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и спектрофотометрии. М.: МГУ, 2005.
2. Кононович Э.В., Мороз В.И. - Общий курс астрономии. М. ,УРСС, 2001. – 544с.
3. Иванов В.В., Кривов А.В., Денисенков П.А. Парадоксальная Вселенная.175 задач по астрономии. С-Пб, 1997.

**Дополнительная литература**

1. Кульбачинский В.А. Структуры малой размерности в полупроводниках. – М.: Изд. МГУ, 1998.
2. Киселев В.Ф., Козлов С.Н., Зотеев А.В. Основы физики поверхности твердого тела. – М.: Изд. МГУ, 1999.
3. Stone R.C. CCD observations linking the radio and optical reference frames. Astronomical Journal, v. 108, 1994, pp. 313 – 325.
4. [www.astronet.ru](http://www.astronet.ru/)
5. [http://astra.prao.psu.ru](http://astra.prao.psu.ru/)

АКАДЕМИЧЕСКАЯ Политика курса

Все виды работ необходимо выполнять и защищать в указанные сроки. Студенты, не сдавшие очередное задание или получившие за его выполнение менее 50% баллов, имеют возможность отработать указанное задание по дополнительному графику. Студенты, пропустившие лабораторные занятия по уважительной причине, отрабатывают их в дополнительное время в присутствии лаборанта, после допуска преподавателя. Студенты, не выполнившие все виды работ, к экзамену не допускаются. Кроме того, при оценке учитывается активность и посещаемость студентов во время занятий.

будьте толерантны, уважайте чужое мнение. Возражения формулируйте в корректной форме. Плагиат и другие формы нечестной работы недопустимы. Недопустимы подсказывание и списывание во время сдачи СРС, промежуточного контроля и финального экзамена, копирование решенных задач другими лицами, сдача экзамена за другого студента. Студент, уличенный в фальсификации любой информации курса, несанкционированном доступе в Интранет, пользовании шпаргалками, получит итоговую оценку «F».

За консультациями по выполнению самостоятельных работ (СРС), их сдачей и защитой, а также за дополнительной информацией по пройденному материалу и всеми другими возникающими вопросами по читаемому курсу обращайтесь к преподавателю в период его офис-часов.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Оценка по буквенной системе | Цифровой эквивалент баллов | %-ное содержание | Оценка по традиционной системе |
| А | 4,0 | 95-100 | Отлично |
| А- | 3,67 | 90-94 |
| В+ | 3,33 | 85-89 | Хорошо |
| В | 3,0 | 80-84 |
| В- | 2,67 | 75-79 |
| С+ | 2,33 | 70-74 | Удовлетворительно |
| С | 2,0 | 65-69 |
| С- | 1,67 | 60-64 |
| D+ | 1,33 | 55-59 |
| D- | 1,0 | 50-54 |
| F | 0 | 0-49 | Неудовлетворительно |
| I  (Incomplete) | - | - | «Дисциплина не завершена»  (*не учитывается при вычислении GPA)* |
| P  (Pass) | **-** | **-** | «Зачтено»  (*не учитывается при вычислении GPA)* |
| NP  (No Рass) | **-** | **-** | «Не зачтено»  (*не учитывается при вычислении GPA)* |
| W  (Withdrawal) | - | - | «Отказ от дисциплины»  (*не учитывается при вычислении GPA)* |
| AW  (Academic Withdrawal) |  |  | Снятие с дисциплины по академическим причинам  (*не учитывается при вычислении GPA)* |
| AU  (Audit) | - | - | «Дисциплина прослушана»  (*не учитывается при вычислении GPA)* |
| Атт. |  | 30-60  50-100 | Аттестован |
| Не атт. |  | 0-29  0-49 | Не аттестован |
| R (Retake) | - | - | Повторное изучение дисциплины |

**Выставление оценок**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Вид контроля | Максимальный балл | Минимальный балл или рейтинг допуска) | Примечание |
| 1 | Рубежный контроль 1 | 100 | 50 | Сумма оценок по все видам заданий за 1 - 7 недели |
| 2 | Рубежный контроль 2 | 100 | 50 | Сумма оценок по все видам заданий за 8 - 15 недели |
| 3 | Оценка текущей успеваемости | (РК1+РК2)/2=100 | 50 | Среднее арифметическое РК1 и РК2 |
| 4 | Оценка итогового контроля (экзаменационная оценка) | 100 | 50 |  |
| 5 | Итоговая оценка по дисциплине | 100 | 50 | Среднее арифметическое оценки текущей успеваемости и экзаменационной оценки |

*Рассмотрено на заседании кафедры*

*протокол № 36 от « 21» мая 2013 г.*

Зав.кафедрой Приходько О.Ю.

Лектор Сванбаев Е.А.

**Лабораторная работа № 1**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В ВОДЕ**

*Цель работы:* Изучение спектра поглощения воды.

Приборы и принадлежности:

1. Спектрофотометр СФ-26.

1.1 Атмосферное ослабление света

Распределение энергии в спектре звезды при прохождении через атмосферу Земли к регистрирующему прибору искажается. Существуют три основных фактора атмосферного ослабления света. Во-первых, это релеевское (молекулярное) рассеяние, вызываемое неоднородностями плотности воздуха, т.е. вариациями количества молекул в элементарном его объеме. Во-вторых, это рассеяние на аэрозольных частицах. К таковым относятся частицы пыли, мельчайшие капельки воды и льда. В третьих, это истинное поглощение молекулами газов, из которых состоит воздух. Для видимой и ближней ультрафиолетовой областей спектра важное значение имеют молекулы озона O3 , кислорода O2 и водяного пара H2O. В более далекой ультрафиолетовой или инфракрасной области гораздо сильнее начнет влиять поглощение водяным паром, а также появится сильное влияние разных соединений углерода и азота.

Ослабление света в атмосфере довольно значительно и непостоянно. Со временем изменяется содержание аэрозоля и соотношение содержания различных газов, прежде всего озона.

Прохождение света через вещество ведет к возникновению колебаний электронов атомов среды под действием электромагнитного поля волны и сопровождается потерей энергии волной, которая тратится на возбуждение колебаний электронов. Частично эта энергия вновь возвращается излучению в виде вторичных волн, посылаемых электронами, частично она может переходить в другие виды энергии, например, во внутреннюю энергию тела (в тепло). Поэтому интенсивность света при прохождении через вещество уменьшается, свет поглощается в веществе. Основные полосы поглощения света в земной атмосфере приведены на рисунке 1.

[\begin{figure}\begin{center}
\epsfxsize =0.8\textwidth\epsfbox{lfig4_9.eps}\end{center}\end{figure}](http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1159114&uri=img374.gif)

Рисунок 1 - Основные полосы поглощения водяного пара

Опыт показывает, что интенсивность света при прохождении через вещество уменьшается по экспоненциальному закону (закон Ламберта-Бугера):

I = Io\*exp ( - αd). (1)

Здесь Iо – интенсивность волны, вступающей в вещество, I – интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной d, α - коэффициент поглощения, зависящий от свойств поглощающего вещества.

Численное значение коэффициента поглощения обратно пропорционально толщине слоя *d*, после прохождения которого интенсивность плоской волны убывает в *е* раз.

Коэффициент поглощения α зависит от длины волны падающего света. У вещества, атомы которого практически не воздействуют друг на друга (газы и пары металлов при невысоком давлении), коэффициент поглощения для большинства длин волн близок к нулю и лишь для узких спектральных областей обнаруживает узкие максимумы. Эти максимумы соответствуют резонансным частотам колебаний электронов внутри атомов. В случае многоатомных молекул обнаруживаются также частоты, соответствующие колебаниям атомов внутри молекул. Но, поскольку масса атома много больше массы электрона, эти молекулярные частоты намного меньше атомных (и находятся в инфракрасной части спектра). Газы при высоком давлении, жидкости и твердые тела дают широкие полосы поглощения.

По мере повышения давления газов максимумы на кривых зависимости коэффициента поглощения от длины волны света становятся все более и более расплывчатыми и приближаются к спектрам жидкостей. Это показывает, что на поглощение света влияет взаимодействие атомов или молекул друг с другом.

В тех случаях, когда имеет место поглощение света молекулами вещества, растворенного в практически не поглощающем растворителе, коэффициент поглощения оказывается пропорциональным числу поглощающих молекул на единицу длины пути, то есть, пропорционален *концентрации вещества* *с*: α=*Ас*, и обобщенный закон Бугера (или закон Бугера – Ламберта – Бера) будет выглядеть следующим образом:

I = Io\*exp ( - Асd), (2)

где А – новый коэффициент, не зависящий от концентрации, и характерный для молекул поглощающего вещества.

Для характеристики прозрачности (или непрозрачности) веществ принято использовать помимо коэффициента поглощения понятие оптической плотности D (иногда ее называют экстинкцией раствора). Оптическая плотность характеризует ослабление света, вызванное как поглощением, так и рассеянием света в веществе. Для неотражающего слоя вещества оптическая плотность

D = lg(Io / I) = Kλd, (3)

где Io, I – интенсивности излучения падающего на слой вещества толщиной *d* и прошедшего через него соответственно, *Kλ* - показатель поглощения среды для длины волны *λ*, связанный с удельным показателем поглощения в законе Бугера соотношением *Kλ* = 2,303*αλ*.

Оптическая плотность может быть определена и как логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания слоя вещества τ [τ = (I / Io)\*100%]

D = lg(1/τ). (4)

Введение оптической плотности удобно при вычислениях, так как она меняется на несколько единиц, тогда как величина *I / Io* может для различных образцов и на различных участках спектра изменяться на несколько порядков.

**1.2 Устройство приборов и методика эксперимента.**

В данной работе измерения выполняются с помощью спектрофотометра СФ–26, который позволяет измерять коэффициент пропускания, оптическую плотность, как твердых, так и жидких образцов в зависимости от длины волны. В качестве источника света используется осветитель с лампой накаливания, имеющей непрерывный спектр излучения. Для получения монохроматического света определенного состава используется дифракционная решетка, которая выделяет свет в некотором диапазоне длин волн.

Для обеспечения работы спектрофотометра в широком диапазоне спектра используются два фотоэлемента и два источника излучения сплошного спектра. Сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с окном из кварцевого стекла применяется для измерений в области спектра от 186 до 650 нм, кислородно-цезиевый фотоэлемент - для измерений в области спектра от 600 до 1100 нм. Длина волны, при которой следует переходить от измерений с одним фотоэлементом к измерениям с другим фотоэлементом, указывается в паспорте спектрофотометра.

Дейтериевая лампа предназначается для работы в области спектра от 186 до 350 нм, лампа накаливания - для работы в области спектра с 340 до 1100 нм. Для проверки градуировки используется ртутно-гелиевая лампа. Сигнал с фотоприемника поступает на вход усилителя. Шкалы переключаются с помощью переключателя В1 и подобраны так, что при переключении из положения “х1” в положение “х0.1” показания прибора изменяются в 10 раз, при переключении из положения КАЛИБР в положение “х0.01” - в 100 раз.

Для повышения точности отсчета при измерении образцов, мало отличающихся друг от друга по пропусканию, в спектрофотометре предусмотрена возможность включения компенсирующего напряжения. Изменение напряжения компенсации происходит дискретно с помощью переключателя В2. В положении “х1” переключателя В1 компенсируется любое показание измерительного прибора, больше 10 делений шкалы. В положении КАЛИБР переключателя В1 компенсируются показания прибора в пределах 1--10 делений шкалы.

В результате измерения прозрачности образца Т(%) в диапазоне 0.4-1.2 мкм получим спектральную зависимость пропускания примерно такого вида, как показано на рисунке 2.

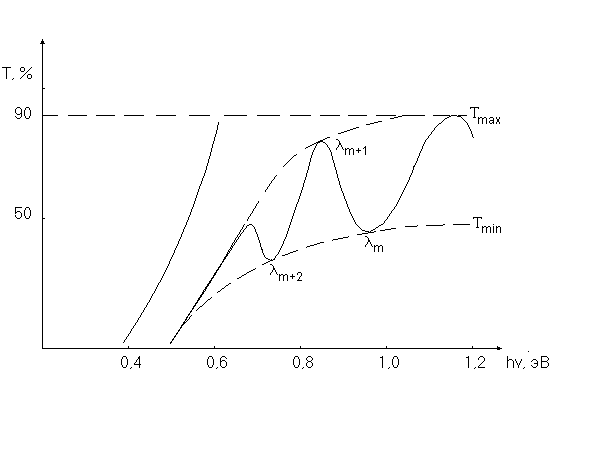


Рисунок 2 - Спектральная зависимость пропускания тонкой пленки воды

# Порядок выполнения работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с инструкцией по технике безопасности в учебной лаборатории.

Приступая к выполнению работы необходимо:

1. Ознакомиться с описанием спектрофотометра.
2. Установить кювету с водой в специальном держателе спектрофотометра.
3. Произвести измерения прозрачности образца Т(%) в диапазоне 0.2-1.2 мкм.
4. Построить график зависимости прозрачности образца Т(%) от длины волны λ..
5. Рассчитать спектральную зависимость коэффициента поглощения воды и построить ее график.

Литература

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособ. для вузов. 2-е изд. - М.: Лаборатория Базовых знаний, 2000.- 488с.
2. Итоги науки и техники. Серия Электроника, т.16, Москва, 1984.
3. Раков А.В. “Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур”, М., “Советское радио”, 1975.
4. Cванбаев Е.А. Диэлектрические параметры адсорбированной воды. Вестник КазНУ, сер. , физическая, 2005 г., №2(20), с 99-101.
5. Cванбаев Е.А. Исследование диэлектрических параметров воды на начальных стадиях формирования фазы. Тез. докл. 4-й международной конф. “Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование”, Алматы, 5-7 окт 2005 г., с 78

***Лабораторная работа № 2***

Вакуумные ФОТОПРИЕМНИКИ

Цель работы:

Исследование харктеристик вакуумных фотоприемников.

Приборы и принадлежности:

Спектрофотометр СФ-26

2.1 Классификация и технические характеристики фотодетекторов

Фотоприемники предназначены для преобразования оптического сигнала в электрический. Они называются также фотодетекторами, так как осуществляют детектирование оптического сигнала, т.е. его демодуляцию. Фотоприемник является первым и основным элементом системы демодуляции и обработки оптического сигнала. Все фотоприемники по принципу действия можно разделите на две   
большие группы: тепловые и фотонные. В свою очередь фотонные приемники подразделяют на фотодетекторы, основанные на:

а) внешнем фотоэффекте (фотоэлектронные умножители и вакуумные фотоэлементы, электронно-оптические преобразователи);

б) внутреннем фотоэффекте (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и т. п.).

Для определения технических возможностей конкретного фотоприемника используются следующие характеристики.

1. Спектральная (монохроматическая) чувствительность - мера реакции фотоприемника на оптическое излучение с длиной волны () Для тепловых приемников (болометров) чувствительность не зависит от длины волны, а для фотонных приемников существует максимальная длина волны (красная граница) *m* выше которой энергии фотона Е = *hc* /  недостаточно для возникновения фотоэффекта. На рис.1 представлены спектральные характеристики идеализированного теплового и фотонного приемников.

2. Интегральная чувствительность *S* - мера реакции фотоприемника на световой поток Ф заданного спектрального состава. Для идеального теплового приемника *S* не зависит от спектра. Для реальных фотоприемников величина S зависит от спектра регистрируемого света. Наиболее часто в качестве эталонного светового потока для определения S используют излучение абсолютно черного тела с заданной температурой или излучение эталонной лампы накаливания с вольфрамовой нитью. Если температура нити накала равна 2850 К, то такой режим принято называть режим А.

[\begin{figure}\begin{center}
\epsfxsize =0.8\textwidth\epsfbox{lfig3_7.eps}\end{center}\end{figure}](http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1159114&uri=img189.gif)

Рисунок 1 - Спектральная зависимость фоточувствительности некоторых вакуумных фотокатодов

Наименьшую чувствительность в визуальной области имеет катод типа S1 (обозначение по ГОСТу С1). Это серебряно-кислородно-цезиевый катод. Он обладает двумя замечательными особенностями. Во-первых, это исторически первый из катодов, применяющихся в фотоумножителях. Во-вторых, хотя у этого катода невысокая относительная чувствительность в видимой области, зато зона его спектральной чувствительности простирается до  = 1200 нм, т.е. он работает в ближней инфракрасной области.

Фотоумножитель с катодом типа S11 (обозначение по ГОСТу С6) это сурьмяно-цезиевый катод. В области около  = 400 нм он имеет в 20 раз больший квантовый выход, по сравнению с катодом типа S1. О на длине волны примерно  = 650 нм чувствительность этого катода падает практически до нуля. Именно этим спадом чувствительности определялись положение и форма длинноволновой границы спектральной полосы V у Джонсона. Фотокатод типа S20 (обозначение по ГОСТу С11), называемый мультищелочным*.* В его состав входит Sb(Na2K), с адсорбированным слоем цезия на поверхности. Эти катоды обладают рядом бесспорных преимуществ и сейчас наиболее употребительны в звездной фотометрии. Их чувствительность с длинноволновой стороны простирается до = 900 нм. Именно с катодом такого типа строится полоса R фотометрической системы *WBVR*, употребляемой в Тянь-Шаньской обсерватории. Чувствительность его в максимуме несколько выше, чем у сурьмяно-цезиевого.

Катод, состоящий из арсенида галлия, представляют заметный интерес для звездной фотометрии, хотя недостаточно распространены. Арсенид-галлиевые катоды являются непрозрачными, и фотоумножитель конструируется с учетом того, что фотоэлектроны выходят с той же стороны, с которой падает свет. Эти фотокатоды отличаются высоким квантовым выходом в красной и ближней инфракрасной областях. Некоторые типы арсенид-галлиевых катодов имеют в максимуме спектральной чувствительности квантовый выход, достигающий 50%.

Одной из важных характеристик любого фотоприемника является минимально различимый сигнал *Ф*min - та величина светового потока, измеряемая в [Вт], которая на выходе фотоприемника создает сигнал, равный шуму. Так как интенсивность белого шума пропорциональна корню квадратному из полосы пропускания *f* усилительного тракта, то вводят следующую характеристику. Эквивалентная мощность шума NEP (Noise Equivalent Power) - величина светового потока, которая на выходе фотоприемника в единичной   
полосе частот вызывает сигнал, равный шуму: Обнаружительная способность D обратно пропорциональна эквивалентной мощности шума.

Эта величина зависит от площади приемника А, так как шум пропорционален A. Детектирующая способность D\*, называемая также нормированной обнаружительной способностью. Это наиболее объективная и важная характеристика фотодетектора данного типа, поскольку она не зависит от его площади и полосы частот усилителя.

Способность фотоприемника без искажения регистрировать быстрые изменения интенсивности светового потока зависит от его инерционности. Инерционность характеризуется граничной частотой fmах, при которой чувствительность фотоприемника падает в заданное число раз (обычно в 2 или е раз), или постоянной времени.

Принцип действия тепловых фотоприемников основан на регистрации изменения свойств материала при изменении его температуры вследствие поглощения оптического излучения. Существуют различные типы тепловых фотоприемников, основанных на различных эффектах. Среди них наиболее   
распространены:

а) болометры, использующие изменение сопротивления тонкой металлической, полупроводниковой или сверхпроводящей пленки;

б) термоэлектрические детекторы типа термопар или термостолбиков, использующие эффект возникновения термо ЭДС на контактах двух металлов;

в) пироэлектрические приемники, основанные на пироэлектрическом эффекте, в том числе в ферроэлектрических кристаллах вблизи температуры Кюри;

г) оптико-акустические приемники (ОАП), называемые иногда пневматическими ИК-детекторами или элементами Голея, использующие периодическое расширение и сжатие газа при его нагреве от промодулированного по амплитуде оптического излучения, поглощаемого тонкой мембраной. Инерционность тепловых приемников велика (> 10 мс), а чувствительность сравнительно низка. Поэтому в системах передачи информации они не используются. Тепловые приемники применяются там, где необходимо обеспечить постоянство спектральной чувствительности, а также в   
далекой ИК-области спектра.

Фотонные приемники эффективно работают в той области спектра, где энергия фотона существенно превышает kT. В случае, когда тепловая энергия сравнима или превышает энергию фотона, тепловое возбуждение действует активнее оптического и эффективность фотонного приемника резко падает. Поэтому фотонные приемники, предназначенные для работы в области >=3мкм, как правило, требуют охлаждения тем более глубокого, чем больше рабочая длина волны.

Пусть на верхней границе земной атмосферы мы имеем распределение энергии в спектре некоторой звезды E() . Эта энергия воздействует на нашу аппаратуру (телескоп + фотометр), имеющую инструментальные кривые реакции Ti () нескольких (с номерами i ) фотометрических полос. За границей атмосферы в каждой i -й полосе отклик прибора

|  |  |
| --- | --- |
| \begin{displaymath} G_i^{\circ} = k_i \int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}E(\lambda)T'_i (\lambda)\,d\lambda, \end{displaymath} | ((1) |

где  1 и 2 - границы пропускания данной спектральной полосы, а ki- коэффициент пропорциональности, зависящий от конкретного экземпляра аппаратуры.

# Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием спектрофотометра.
2. Регулируя щель на различных длинах волн определить положение максимума фоточувствительности вакуумного фотоприемника «К» и на этой длине волны, регулируя щель, установить 100%.
3. Провести измерения спектра фоточувствительности вакуумного фотоприемника в диапазоне 0.4-1.2 мкм.
4. Построить график зависимости фоточувствительности вакуумного фотоприемника от длины волны λ.
5. Считая температуру нити накала Т = 1840С, определить истинный спектр фоточувствительности.

Литература

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособ. для вузов. 2-е изд. - М.: Лаборатория Базовых знаний, 2000.- 488с.
2. Итоги науки и техники. Серия Электроника, т.16, Москва, 1984.
3. Раков А.В. “Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур”, М., “Советское радио”, 1975.
4. Р.М. Айтмамбетов, Е.А.Cванбаев, Ш.Б.Байганатова, А.С.Калшабеков, Б.Капланбеков, Т.И.Таурбаев. Структура и свойства некоторых функциональных фотопреобразователей и солнечных элементов. Мат. научно-практической конференции «Роль фунда-ментальных общеобразовательных дисциплин и применение информационных технологий при подготовке специалистов в технических ВУЗах», ВИИРС, Алматы, 2004, с. 15-19.
5. Ю. А. Дудников, С.М. Манаков, Е.А.Cванбаев, А.А. Стамкулов, Т.И.Таурбаев, Л.Л. Хренов, Фотопреобразователи на основе аморфного гидрогенизированного кремния. Ж. «Оптико-механическая Промышленность», №12, 1989, стр. 49-51.

***Лабораторная работа № 3***

*Полупроводниковые фоторезисторы.*

Цель работы:

Исследование энергетических харктеристик полупровдниковых фоторезисторов на основе аморфного кремния.

Приборы и принадлежности:

1. Блок питания постоянного тока.
2. Светодиодный осветитель регулируемый.
3. Цифровой микроамперметр

**3.1 Виды фотоприемников**

Оптическую информацию, передаваемую или принимаемую в оптической электронике, можно разделить на два вида: 1) оптические сигналы 2) оптические образы или картины.

Соответственно все фотоприемники можно разбить на две группы.

1. Дискретные, как правило, одноэлементные фотоприемники с малой рабочей площадью, обладающие высокой чувствительностью *S*, большой детектирующей способностью D\* и малой   
инерционностью в сравнительно узкой области спектра, предназначенные для приема оптических   
сигналов. Лучшим сочетанием параметров в этой группе приборов обладают фоторезисторы и фотодиоды, особенно p-i-n и лавинные фотодиоды.

2. Фотоприемники, предназначенные для восприятия световых образов. Это многоэлементные фотоприемники с самосканированием и высокой пространственной разрешающей способностью, обладающие хорошей чувствительностью в ограниченном спектральном интервале. Лучшими характеристиками из этой группы приемников обладают фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Многоэлементные фотоприемники в большинстве случаев уже заменили фотопластины при фотографировании космоса.

И дискретные и многоэлементные фотоприемники изготавливаются на основе полупроводников, принцип действия которых основан на использовании внутреннего фотоэффекта. Полупроводниковые фотоприемники обладают малой инерционностью и высокой обнаружительной способностью. В ряде современных приборов достигнуты значения этих величин, близкие к своему теоретическому пределу. Поэтому в астрофотометрии и оптической электронике часто применяются фотонные приемники, на свойствах которых мы остановимся ниже.

**3.2 Внутренний фотоэффект.**

Внутренним фотоэффектом называют увеличение числа свободных носителей в веществе под действием света. Внутренний фотоэффект может иметь место в полупроводниках или диэлектриках. При освещении полупроводника поглощаемым светом происходит отрыв какого-то числа электронов (в идеальном случае число оторванных электронов равно числу поглощенных фотонов) из валентной зоны и их переход в зону проводимости, а в валентной зоне при этом появляется столько же вакансий, т.е. дырок. Появившиеся за счет света дополнительные носители (электроны и дырки) называют фотогенерированными носителями. Избыточные фотогенерированные носители заряда являются неравновесными по отношению к равновесным темновым «тепловым» носителям. После выключения света неравновесные носители исчезают за счет рекомбинации и в темноте остаются только равновесные тепловые носители.

Генерация дополнительных фотогенерированных носителей заряда приводит к изменению проводимости. Изменение проводимости полупроводника при освещении называется фотопроводимостью.

Генерация неравновесных носителей заряда в полупроводниках приводит к изменению концентрации свободных носителей, не изменяя их энергии и подвижности.

**3.3 Поглощение света в полупроводнике.**

Поглощение света возможно лишь тогда, когда имеется электрон в исходном состоянии и имеется свободное энергетическое состояние, на которое может перейти этот электрон. Поглощение света происходит только порциями (квантами) с энергией hПри поглощении света энергия фотона передается электрону.

При поглощении квантов света возможны четыре основных типа пере­ходов:

1) Межзонное собственное поглощение света основными атомами кристалла приводит к одновременному образованию свободного электрона и свободной дырки на каждый поглощенный фотон (переходы типа 1 на рисунке 1).

F

3

4

EC

EV

A

Рисунок 1 - Возможные типы электронных переходов при поглощении света в полупроводниках

Eg

1

2

2) Поглощение света с участием примесей или локальных несовершенств в кристалле с высвобождением электрона в зону проводимости. При этом на каждый поглощенный фотон образуется свободный электрон и связанный с соответствующим центром неподвижный положительный заряд (переходы типа 2).

3) Поглощение света с участием примесей или локальных несовершенств в кристалле с перебросом электронов из валентной зоны на эти локализованные состояния. При этом на каждый поглощенный фотон образуется свободная дырка в валентной зоне и неподвижный отрицательный заряд электрона, связанного с соответствующим центром (переходы типа 3).

4) В четвертую группу объединены многофотонные переходы. При этом электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости с участием одного или более локализованных состояний. При этом поглощается энергия двух или более фотонов. Скорость многофотонной генерации существенно меньше и заметный вклад такого процесса может быть лишь при высокой концентрации дефектов.

Поглощение света может не приводить к появлению свободных носителей заряда при переходах электронов с дефекта на дефект и при экситонном поглощении. Экситонное поглощение приводит к созданию связанной пары электрон - дырка, являющейся электрически нейтральным образованием. Однако если экситон при движении в решетке диссоциирует в результате поглощения дополнительной энергии, то каждый экситон приводит к появлению двух свободных носителей заряда: электрона и дырки. Если же экситон рекомбинирует, то экситонное поглощение не приводит к увеличению проводимости.

**3.4 Биполярная и монополярная генерация**

Генерацию, при которой одновременно образуется одинаковое число свободных электронов и дырок (Δn = Δр), называют биполярной генерацией. Биполярная генерация имеет место лишь при межзонных переходах типа 1 на рис. 1.

Генерацию, при которой образуется только один тип свободных носителей (или свободные электроны, или свободные дырки), называют монополярной генерацией. Монополярная генерация может идти только с участием дефектных состояний в запрещенной зоне. На рис. 1 переходы типа 2 приводят к образованию только свободных электронов, а переходы типа 3 соответствуют генерации только дырок. Экспериментально монополярную генерацию можно наблюдать лишь при высокой концентрации дефектов.

Для возбуждения собственных атомов полупроводника (переходы типа 1) фотон должен обладать энергией hv1 ≥ ΔEg. Максимальная длина волны (красная граница фотопроводимости), при которой свет создает свободные носители заряда, определяется соотношениями:

для собственной фотопроводимости

λмакс.i *= hc/Eg* . (1)

Постоянная hсравна 1,24 эВ/мкм. Энергия активации 1 эВ соответствует длине волны 1,24 мкм.

Для примесной фотопроводимости

λ макс.пр *= hc/ΔE пр* , (2)

где ΔЕпр, - энергия активации примесных атомов (переходы типа 2 и 3 на рис 1).

Электроны или дырки, генерируемые светом являются не равновесными носителями заряда. Полная концентрация носителей заряда в неравновесном состоянии равна сумме концентраций равновесных (по , ро*)* и неравновесных (Δ*n*, Δ*р*) носителей заряда:

*n = no + Δn* ; (3)

*p = po + Δp* . (4)

Полная проводимость полупроводника при этом равна:

*σ = σr + Δσ = q(n0un + p0up) + q(Δn un + Δp up),* (5)

где σ***r*** - темновая (равновесная) проводимость; un и up – подвижности электронов и дырок, Δσ - неравновесная проводимость (фотопроводимость). Фотопроводимостью называют величину, равную изменению проводимости при освещении. Тогда для фотопроводимости можно записать:

*Δσ = q (Δn un + Δp up).* (6)

Если электроны и дырки в результате поглощения фотона стали свободными, то они будут оставаться свободными до тех пор, пока не будут захвачены каким-либо дефектом или рекомбинируют. Центры захвата носителей можно разделить на две группы – центры прилипания и центры рекомбинации:

1) центры прилипания, когда захваченный носитель имеет большую вероятность перейти снова в свободное состояние в результате теплового возбуждения. На рисунке 2 переходы с участием центров прилипания отмечены как 1, 1/ и 2, 2/.

2) центры рекомбинации расположены более глубоко, поэтому захваченный носитель не может вернуться в делокализованную зону за счет тепловой энергии решетки и имеет большую вероятность рекомбинировать с носителем противоположного знака.

На рисунке 2 процесс захвата электрона - переход 3, а дырки - 4. Процессы рекомбинации захваченных электрона и дырки показаны переходами 3/ и 4/ . Прямая рекомбинация свободного электрона из зоны проводимости с дыркой валентной зоны называется межзонной рекомбинацией и показана переходом 5. Дефекты в межзонной рекомбинации не участвуют.

1 1/

2 2/

3

4

5

EV

EC

3/

4/

Рисунок 2 - Процессы захвата/освобождения с участием электронных (1 и 1*'*) и дырочных (2 и 2*'*) уровней прилипания и процессы рекомбинации (3-3/,4-4/,5)

В реальных полупроводниках с большим числом примесных и дефектных уровней прямая межзонная рекомбинация менее вероятна. В большинстве случаев рекомбинация происходит через центры захвата типа 3, 4 когда примесным центром сначала захватывается электрон, а затем дырка (переходы 3, 3/) или, сначала захватывается дырка, а затем на примесный уровень падает электрон из зоны проводимости (переходы 4 и 4/).

При рекомбинации носителей, так же как и при генерации, должны соблюдаться законы сохранения энергии и импульса. При рекомбинации освобождаемая энергия может излучаться в виде света (излучательная рекомбинация), выделяться в виде фононов (безизлучательная рекомбинация) или передаваться другому свободному электрону (ударная рекомбинация).

**3.5 Фототок фоторезистора.**

Рассмотрим связь фотопроводимости с интенсивностью света при равномерной по объему генерации. При освещении полупроводника светом с энергией кванта примерно равной запрещенной зоне hν1≅ΔE коэффициент поглощения мал и происходит равномерная генерация свободных электронов и дырок по всему объему. Условие малого значения коэффициента поглощения записывается в виде:

*d << 1*, (7)

где ** - коэффициент поглощения света, d – толщина полупроводника. Пусть на поверхность полупроводника падает монохроматический световой поток интенсивностью I=hN. Если коэффициент отражения света от поверхности полупроводника r, то величина потока, входящего в полупроводник равна:

*I= (1-r)I* . (8)

Если коэффициент поглощения света α мал, то число квантов света, поглощенных в единице объема за единицу времени

*N = a I/h .* (9)

Эффективность фотогенерации характеризуют внутренним квантовым выходом, равным отношению числа фотогенерированных носителей Δn к общему числу поглощенных квантов света*:*

 (10)

Внутренний квантовый выход может принимать значение, равное единице для фотоактивных поглощений или нуля для нефотоактивных поглощений. Однако экспериментально измеряемая величина  может быть как меньше, так и больше единицы. Значение квантового выхода меньше единицы объясняется нефотоактивными поглощениями света (экситонами, свободными электронами и др.). Значение квантового выхода больше единицы объясняется тем, что при облучении полупроводника излучением с большой энергией кванта, электрон получает кинетическую энергию, достаточную для одного или несколько актов ударной ионизации.

Скорость межзонной генерации носителей заряда зависит от квантового выхода фотоионизации:

*Δn = (1-r) β α N = βn α N;* (11)

*Δp= (1-r) β α N = βр α N*, (12)

где βn = (1-r)β - внешний квантовый выход электронов, βр = (1-r)β - внешний квантовый выход дырок, рассчитанные на падающий световой поток. Если фотопроводимость обусловлена поглощением локализованными состояниями, то одна из величин - βn или βp - равна нулю. Для собственной фотопроводимости (область фундаментального поглощения) βn = βp и Δn = Δp.

Если бы существовали только процессы генерации, то концентрация неравновесных носителей с течением времени *t* увеличивалась бы по линейному закону

*Δn = Δp = βn αNt.* (13)

В действительности же существует обратный процесс рекомбинации. Когда скорость рекомбинации достигнет скорости генерации носителей, тогда устанавливается стационарное состояние неравновесной концентрация фотоносителей. В двух простейших частных случаях линейной и квадратичной рекомбинации фотoпроводимость подчиняется соотношениям для концентрации неравновесных электронов:

Δnст = τтβ αN, (14)

и фотопроводимости

 (15)

Величину τn в этом случае называют постоянной времени релаксации фотопроводимости.

Если выключить освещение полупроводника, то концентрация неравновесных носителей начнет уменьшаться за счет рекомбинации:

 (16)

Решая уравнение (17) с учетом начальных условий (при t = 0, Δn = Δnст ), получим:

для концентрации неравновесных электронов

 (17)

для фотопроводимости

 (18)

Кривые нарастания и спада концентрации неравновесных носителей называются кривыми релаксации (Рисунок 3).

n(t)

nст

0   0  t

Рисунок 3 - Кривые нарастания и спада фотопроводимости

Релаксация неравновесной концентрации носителей заряда и фотопроводимости в случае линейной рекомбинации при мгновенном выключении света происходит по экспоненциальному закону. Это дает возможность по исследованию релаксационных кривых непосредственно определять величину τ = τn = τp. Касательная к начальному участку кривой нарастания (спада) пересекается с линией стационарного значения фотопроводимости (осью абцисс) в точке t = . Зависимость фотопроводимости Δσ и фототока Iф от интенсивности света определяются типом рекомбинации. Если рекомбинация линейная, то фототок пропорционален интенсивности света:

*~ N, ~ N* (19)

Если рекомбинация квадратичная то фотопроводимость и фототок пропорциональны корню квадратному из интенсивности света:

~ ~  (20)

Определить тип рекомбинации линейный или квадратичной можно графически, построив зависимость фототока от интенсивности света в разных координатах, как показано на рисунке 4.

Iф

мкА

10

5

0 100 200 Е, лк. 0 10 20 (Е, лк.)1/2

Рисунок 4 - Люкс-амперные характеристики фоторезистора при линейной и квадратичной рекомбинации

Iф

мкА

10

5

~ N****, (21)

Отношение фотопроводимости  к интенсивности света N называется фоточувствительностью полупроводникового вещества

 (22)

Фотоэлектрический полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании фоторезистивного эффекта (фотопроводимости), называется фотосопротивлением или фоторезистором.

**3.6 Описание установки**

Фоторезистор включают в электрическую цепь последовательно с источником напряжения. В темноте через него будет течь темновой ток I*Т*, при освещении же его поверхности в цепи будет течь световой ток IC. Разность между световым и темновым токами представляет собой фототок.

**В7 - 27**

Б5 - 30

Рисунок 5 - Блок - схема установки для измерения спектральных и люкс-амперных характеристик

При исследованиях фотопроводимости для создания освещения использовались красный, зеленый, синий и ИК светодиоды. Питание на светодиоды подавалось от источника питания Б5-30. Изменение силы тока через светодиоды позволяет изменить интенсивность освещения.

Для ИК светодиода (АЛ-123) максимум спектра излучения равен 0,94 мкм (1,3 эВ), и ширина спектральной характеристики 0,05 мкм на уровне 0,5. У красного светодиода (АЛ-316) максимум спектра излучения равен 0,67 мкм (1,85 эВ), и ширина спектральной характеристики 0,05 мкм на уровне 0,5. Для зеленого светодиода (КИПД-02В) максимум спектра излучения равен 0,56 мкм (2,12 эВ), и ширина спектральной характеристики также 0,05 мкм на уровне 0,5. Спектральные кривые излучения светодиодов приведены на рисунке 13.

0,4 0,6 0,8 1,0 , мkm

Рисунок 6 - Спектральные кривые излучения светодиодов

**Рабочее задание**

1. Устанавливая разные светодиоды и меняя силу тока через светодиод снимите зависимость тока фоторезистора от тока через светодиод.
2. Постройте зависимости *Iф=f(I)* для исследуемого фоторезистора в линейном и квадратичном масштабах и определите тип рекомбинации.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие носители заряда называют неравновесными?

2. Объясните возможные переходы электронов при поглощении квантов света и рекомбинации

4. Какими выражениями определяется красная граница фотопроводимости для собственных и примесных полупроводников?

5. Каков физический смысл понятия «квантовый выход»?

6. Как зависит стационарная фотопроводимость от интенсивности света при линейной и квадратичной рекомбинации?

**Литература**

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособ. для вузов: - 2-е изд. - М.: Лаборатория Базовых знаний, 2000.- 488с.
2. C.Зи. Физика полупроводниковых приборов. Изд. “Наука”, 1984г, 364 с.
3. Шалимова К. И.Физика полупроводников. М., Энергоатомиздат, 1985, 392 с.
4. Р.М. Айтмамбетов, Е.А.Cванбаев, Ш.Б.Байганатова, А.С.Калшабеков, Б.Капланбеков, Т.И.Таурбаев. Структура и свойства некоторых функциональных фотопреобразователей и солнечных элементов. Мат. научно-практической конференции «Роль фундаментальных общеобразовательных дисциплин и при-менение информационных технологий при подготовке специалистов в технических ВУЗах», ВИИРС, Алматы, 2004, с. 15-19.
5. Ю. А. Дудников, С.М. Манаков, Е.А.Cванбаев, А.А. Стамкулов, Т.И.Таурбаев, Л.Л. Хренов, Фотопреобразователи на основе аморфного гидрогенизированного кремния. Ж. «Оптико-механическая Промышленность», №12, 1989, стр. 49-51.