**ЛЕКЦИЯ 7 (АИ 2 курс)**

**ФОТОЭФФЕКТ**

План

1. Опыты Столетова.

2. Законы фотоэлектрического эффекта.

3. Уравнение Эйнштейна.

4. Практическое применение фотоэффекта.

**1.11**

Гипотеза Планка, блестяще решившая задачу излучения абсолютно черного тела, получила дальнейшее развитие при объяснении фотоэффекта. Это явление было открыто в 1887 году Г. Герцем, который, облучая ультрафиолетовыми лучами находящиеся под напряжением электроды, наблюдал ускорение процесса разряда. Позднее было установлено, что причиной данного явления служит появление при облучении свободных электронов.

Явление испускания электронов веществом под действием света было названо *фотоэффектом.*

В 1888-1890 годах А.Г. Столетов провел систематическое исследование фотоэффекта.

*R*

Б

К

А

*G*

*V*

Рис. 1.11

Схема исследования фотоэффекта

-

Принципиальная схема для исследования фотоэффекта приведена на рис. 1.11. Два электрода в вакуумной трубке подключены к батарее Б так, что с помощью потенциометра *R* можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на электроды напряжения. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом (через кварцевое окошечко), измеряется включенным в цепь гальванометром *G* .

Облучая катод светом различных длин волн, Столетов установил следующие свойства фотоэффекта:

Ускоряющее

напряжение

Тормозящее

напряжение

*U*з

*U*

*–U*

*I*н1

*I*н2

*I*

Ф1

Ф2>Ф1

Рис. 2.11.

Вольт-амперная характеристика фотоэффекта

1) под действием света вещество теряет только отрицательные заряды;

2) наиболее эффективное действие оказывают ультрафиолетовые лучи;

3) фотоэффект практически безинерционен, т.е. промежуток времени между моментом освещения и началом разрядки ничтожно мал.

**2.11**

Приведенная на рис. 1.11 экспериментальная установка позволяет получить вольт-амперные характеристики фотоэффекта – зависимости фототока *I* (поток электронов, испускаемых катодом под действием света) от напряжения *U* между электродами при различных световых потоках ( Ф1 *≠* Ф2 ) и постоянной частоте света ν (рис. 2.11).

При изучении вольт-амперных характеристик было установлено следующее:

1. Фототок возникает не только при *U* = 0, но и при *U* < 0, причем фототок отличен от нуля до строго определенного для данного катода отрицательного значения *U* = *U*з− так называемого задер­живающего потенциала. Величина *U*з не зависит от светового потока (совпадение начальных точек обеих кривых).

2. Пологий ход кривых указывает на то, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. При напряжении *U* = *U*зсила фототока равна нулю, т.е. ни одному из электронов, даже обла­дающему при вылете из катода наибольшим значением скорости *v*max не удается преодолеть задерживающее поле и достигнуть анода. Поэтому можно записать, что

 . (1.11)

Таким образом, измерив *U*з, можно определить максимальную скорость электронов *v*max.

При некотором напряжении фототок достигает определенного значения *I*н, которое при дальнейшем увеличении *U* не изменяется − фототок достигает насыщения. Сила фототока насыщения *I*н определяется количеством электронов, испускаемых катодом в едини­цу времени, следовательно, пропорциональна световому потоку Ф.

Другая серия опытов, проведенная П.И. Лукирским и С.С. Прилежаевым, состояла в снятии вольт-амперных характеристик при различных частотах ν, но при постоянном значении светового потока Ф *=* const (рис. 3.11).

Рис. 3.11.

Вольт - амперная характеристика

фотоэффекта при различных частотах

*U*з3

*U*з2

*U*з1

*U*

0

*I*

Ф=const

ν2

ν3

ν1 > ν2 > ν3

ν1

Анализ кривых рис. 3.11 показывает, что:

1) величина задерживающего потенциала *U*з пропорциональна частоте падающего света, следовательно, максимальная скорость вылетевших из катода фотоэлектронов зависит только от частоты света и не зависит от величины светового потока;

2) существует такая частота света νкр*,* при которой скорость электронов равна нулю, так как *U*з = 0. При всех ν < νкр фототока не будет.

На основании обобщения полученных экспериментальных данных были сформулированы **три закона фотоэффекта**:

1)При фиксированной частоте падающего света (ν = const) сила фототока насыщения *I*н прямо пропорциональна падающему на катод световому потоку Ф.

2)Максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов (максимальная скорость электрона *v*max) растет с ростом частоты падающего света и не зависит от светового потока.

3)Фотоэффект не возникает, если частота света меньше некоторой характерной для каждого металла величины νкр, называемой *"красной границей"* фотоэффекта. Частота νкр зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности.

**3.11**

С точки зрения волновой теории света объяснить законы фотоэффекта невозможно. Действительно, согласно этой теории электроны должны постепенно накапливать энергию, "раскачиваясь" в электрическом поле световой волны, и этот процесс должен зависеть от амплитуды световой волны (светового потока). Соответствующие расчеты дают время "раскачки" порядка нескольких минут. Этот вывод противоречит безинерционности фотоэффекта и независимости энергии вырванных электронов от светового потока (второй закон фотоэффекта). Кроме того, совершенно непонятно существование минимальной частоты света, необходимой для возникновения фотоэффекта, так как согласно волновой теории свет любой частоты, но достаточно большой интенсивности (пропорциональной световому потоку Ф) должен был бы вырывать электроны из металла.

В 1905 году А.Эйнштейн, опираясь на работы М.Планка по излучению нагретых тел, предложил квантовую **теорию фотоэффекта.**

*В основу этой теории положено две идеи.*

1. Свет не только излучается, но также распространяется в пространстве и поглощается веществам в виде отдельных порций энергии − квантов. Следовательно, распространение электромагнитного излучения нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных квантов, движущихся со скоростью распространения света в вакууме *c*. Эти кванты электромагнитного излучения были названы световыми частицами *фотонами.*

2. Процесс поглощения света веществом сводится к тому, что фотоны передают всю свою энергию электронам вещества, причем каж­дый квант поглощается только одним электроном.

Таким образом, процесс поглощения света происходит прерывно как в пространстве, так и во времени.

Эти идеи Эйнштейна легли в основу квантовой теории света, которая позволила успешно объяснить законы фотоэффекта и многие другие оптические явления, не укладывающиеся в рамки классической электромагнитной теории.

Основываясь на вышеизложенных идеях и применив к фотоэффекту закон сохранения энергии, Эйнштейн предложил уравнение, которое устанавливает связь между энергией кванта *h*ν , возбуждающего фотоэффект, работой *А* (работа выхода), которая затрачивается на выход электрона из металла, и максимальной кинетической энергией вылетающего электрона .

Уравнение Эйнштейна имеет следующий вид:

, (2.11)

где *А*вых − работа выхода (наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твердого или жидкого тела в вакуум, зависит от природы и состояния поверхности металла).

Уравнение (2.11) объясняет все свойства и законы фотоэффекта. Действительно:

- безинерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно;

- по Эйнштейну каждый квант поглощается только одним электроном, поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально числу поглощенных фотонов, т.е. световому потоку (первый закон фотоэффекта);

- из уравнения (2.11) непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от величины светового потока (числа фотонов), так как ни работа выхода *А*, ни частота излучения ν от светового потока не зависят;

- формула (2.11) показывает, что существует некоторая минимальная частота света νкр, необходимая для возникновения фотоэффекта (кинетическая энергия фотоэлектронов равна нулю ().

В этих условиях

 или , (3.11)

т.е. фотоэффект имеет "красную границу" (этот термин подчеркивает невозможность возбуждения эффекта при частоте, меньшей νкр). Так как "красная граница" определяется работой выхода электрона из металла, она зависит лишь от химической природы вещества и состояния его поверхности.

"Красная граница" фотоэффекта  соответствует фотонам, энергии которых „хватает“ только на работу выхода. Если энергия фотона больше, чем работа выхода: *h*ν> *А*вых, то электроны получают кинетическую энергию . При подаче на анод отрицательного (запирающего) потенциала электроны будут тормозиться и при некотором значении *U* = *U*з электроны не достигнут анода (фототок прекратится).

Величина задерживающего потенциала определяется из условия (1.11). Подставив (1.11) в (2.11) и поделив полученное равенство на заряд электрона *е*, получим

. (4.11)

Таким образом, величина задерживающего потенци­ала не зависит от свето­вого потока, а зависит только от частоты пада­ющего света.

Работу выхода электрона из данного металла *А* и постоянную Планка *h* можно определить, построив график зависимости *U*з от частоты падающего света ν (рис. 4.11).

Рис. 4.11

*U*з

α

νкр

ν

0



*С*

Как видно из рис. 4.11 и формулы (1.11), tgα *=* и отрезок 0*С*, отсекаемый на оси потенциала, дает – *А/е*.

**4.11**

В зависимости от судьбы электронов, поглотивших энергию светового фотона, различают три основных вида фотоэффекта: внешний фотоэффект (рассмотрен нами выше), внутренний и вентильный фотоэффекты.

**Внутренний фотоэффект** (или фотопроводимость) −это явление увеличения электропроводности полупроводников и диэлектриков под влиянием освещения.

**Вентильный фотоэффект** (или фотоэффект в запирающем слое) – это явление возникновения ЭДС при освещении контакта двух разных полупроводников (р и п − типа) или полупроводника и металла в отсутствие внешнего электрического поля.

Изучение явления фотоэффекта сыграло большую роль не только в науке для установления правильного взгляда на природу света, но и в практической деятельности человека.

Приборы, действие которых основано на явлении фотоэффекта (любого вида), называются фотоэлементами. Фотоэлементы являются основной частью в конструкциях фотореле, имеющих широчайшее применение для целей автоматизации, сигнализации, телеуправления, а также в звуковом кино и телевидении. Кроме того, фотореле применяются: для предохранения от травматизма при работе на штампах, прессах; для охраны сейфов и помещений; для счета массовой продукции, движущейся по конвейеру; в автоматических маяках; в фотоэкспонометрах, применяемых в фотографии, и люксметрах, измеряющих освещенность помещений, и т.д.

Исключительный интерес представляет вентильный фотоэффект, при котором происходит непосредственное преобразование световой энергии в электрическую без всяких вспомогательных механизмов. Вентильный фотоэффект наблюдается в р−п переходах, с которыми мы познакомились при изучении полупроводниковых выпрямителей.

Рассмотрим механизм действия вентильного фотоэлемента (рис. 5.11). На границе двух полупроводников р− и п− типа существует р−п переход с направлением электрического поля в нем от п− к р− по­лупроводнику.

*I*

*р*

*n*

*G*

*R*

**

Рис. 5.11.

Схема вентильного фотоэлемента

Если на р−полупроводник направить свет, то осво­божденные им связанные электроны начнут двигаться в направлении силы, действующей со стороны поля , т.е. из р−области в п−область. В результате в п−полупроводнике образуется избыток электронов, а в р−полупроводнике – избыток дырок. Эти электроны и дырки собираются на противоположных поверхностях фотоэлемента, поэтому между ними образуется фото-эдс, и во внешней цепи возникает ток I. Сила фототока растет прямо пропорционально увеличению светового потока. КПД вентильного фотоэлемента определяется отношением получаемой электроэнергии к падаю­щей на фотоэлемент энергии излучения (КПД достигает 20%). Батарея вентильных фотоэлементов, преобразующих солнечный свет в электрический ток, называется солнечной батареей. Солнечные батареи питают радиоаппаратуру космических кораблей и искусственных спутников Земли.