

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра общей физики

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ОПТИКА

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 10.05.01 Компьютерная безопасность

Оренбург
2015

УДК 537:535(076.5)
ББК 22.33я7+22.34я7
Э 45

Рецензент – профессор, доктор физ.-мат. наук О.Н. Каныгина

Авторы: М.Н. Перунова, О.Г. Белокопытова, Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина, А.В. Михайличенко

Э 45 Электричество и оптика : методические указания к лабораторным работам / М.Н. Перунова, О.Г. Белокопытова, Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина, А.В. Михайличенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2015. - 40 с.

Методические указания предназначены студентам – бакалаврам – инженерам для выполнения лабораторных работ по электричеству и оптике.

Методические указания включают теоретическое введение и описание лабораторных работ, методики проведения измерений и обработки результатов, а также контрольные вопросы для самопроверки.

УДК 537:535(076.5)
ББК 22.33я7+22.34я7

© Перунова М.Н.,
Белокопытова О.Г.,
Пискарёва Т.И.,
Анисина И.Н.,
Михайличенко А.В., 2015
© ОГУ, 2015

Содержание

1. Лабораторная работа №1 Измерение ЭДС источника компенсационным методом.....	4
1.1 Теоретическая часть.....	4
1.2 Практическая часть.....	8
1.3 Контрольные вопросы.....	9
1.4 Список использованных источников.....	10
Приложение А.....	11
2. Лабораторная работа №2 Исследование электрических цепей.....	12
2.1 Теоретическая часть.....	12
2.2 Практическая часть.....	14
2.3 Контрольные вопросы.....	17
3. Лабораторная работа №3 Электрический ток в газе. Несамостоятельный и самостоятельный разряды.....	18
3.1 Теоретическая часть.....	18
3.2 Практическая часть.....	28
3.3 Контрольные вопросы.....	31
3.4 Список использованных источников.....	31
4. Лабораторная работа №4 Дифракция Фраунгофера на одной щели и на препятствии.....	32
4.1 Теоретическая часть.....	32
4.2 Практическая часть.....	34
4.3 Контрольные вопросы.....	37
4.5 Список использованных источников.....	37
Приложение Б.....	38

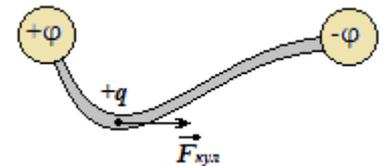
1 Лабораторная работа №1 Измерение ЭДС источника компенсационным методом

Цель работы: научиться использовать компенсационный метод для определения ЭДС источника.

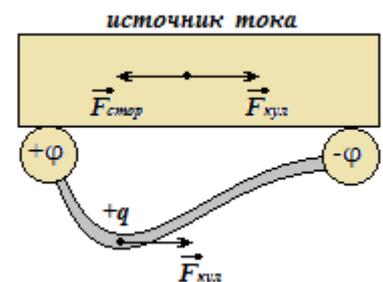
Оборудование: блок питания Б5-7, источник неизвестной ЭДС – батарейка, нормальный элемент, амперметр, вольтметры с пределом измерения 7,5 В и разными сопротивлениями, миллиамперметр с пределами измерения 200 и 2 мА, реостат 500 Ом, соединительные провода.

1.1 Теоретическая часть

Одним из условий существования тока в проводнике является наличие в нем электрического поля. Если два тела, *имеющие разные потенциалы*, соединить проводником, то в нем появляется электрическое поле). Это поле приводит свободные заряды, имеющиеся в проводнике, в направленное движение. По проводнику течет ток до тех пор, пока разность потенциалов на концах проводника не станет равной нулю.



Для поддержания тока в проводнике необходимо поддерживать разность потенциалов на его концах. Для этого необходимо положительные заряды с тела, имеющего меньший потенциал, возвращать на тело, имеющее более высокий потенциал. Кулоновские силы этого сделать не могут, они заставляют положительные заряды двигаться в сторону уменьшения потенциала. Нужны силы некулоновского происхождения – *сторонние*. Такие силы действуют внутри источника.



Для характеристики поля сторонних сил вводят следующие величины:

$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{стор}}{q}$ - напряженность поля сторонних сил -

величина, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, внесенный в данную точку поля;

$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$ - электродвижущая сила – величина, численно равная работе

сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура.

Единица измерения ЭДС совпадает с единицей измерения напряжения

$$1 \text{ вольт} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}.$$

Что показывает вольтметр, подключенный к клеммам источника?

Вольтметр ведет себя как резистор сопротивлением R_v . Запишем закон Ома для замкнутой цепи:

$$IR_v + Ir = \varepsilon$$

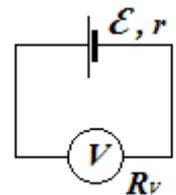


Рисунок 1

Вольтметр показывает напряжение на самом себе $U_v = IR_v$. Тогда

$$U_v + Ir = \varepsilon$$

Видим, что показания вольтметра не совпадают с ЭДС источника. Показания вольтметра, подключенного к клеммам источника всегда меньше ЭДС источника.

Выразим ток в цепи через показания вольтметра и его сопротивление

$I = \frac{U_v}{R_v}$. Закон Ома принимает вид

$$U_v + \frac{U_v}{R_v} r = \varepsilon,$$

$$U_v \left(1 + \frac{r}{R_v} \right) = \varepsilon.$$

Очевидно, если сопротивление прибора намного больше внутреннего сопротивления источника, значение скобки близко к единице. В этом случае

отличие показаний вольтметра от ЭДС источника может оказаться меньше приборной погрешности, и можно считать, что мы измерили ЭДС.

Компенсационный метод определения ЭДС источника

Вариант 1

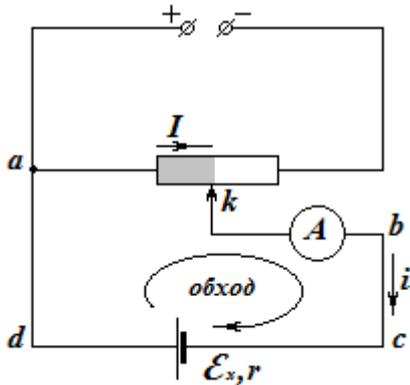


Рисунок 2

Метод позволяет **измерить (!)** ЭДС вольтметром, не задумываясь о том, как соотносятся между собой сопротивления источника и прибора. Рассмотрим цепь, в которую включен источник с неизвестной ЭДС ε_x . Реостат в цепи работает в качестве потенциометра. Участок цепи с источником неизвестной ЭДС ε_x подключен параллельно к

части витков реостата (на схеме эта часть заштрихована).

Если сопротивление выделенной части реостата R , по ней течет ток I , а через источник неизвестной ЭДС – ток i , то второе правило Кирхгофа для контура $abcd$ выглядит следующим образом:

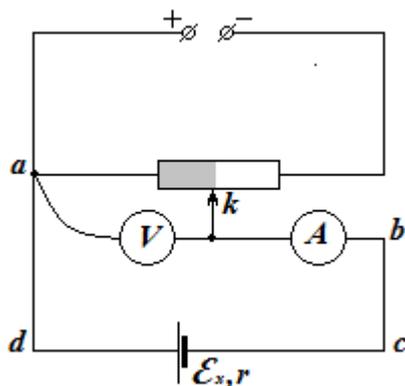


Рисунок 3

$$IR + i(r + R_A) = \varepsilon_x.$$

Перемещая ползунок реостата можно добиться того, чтобы показания амперметра стали равными нулю. В этом случае напряжение IR на заштрихованной части реостата компенсирует ЭДС неизвестного источника:

$$IR = \varepsilon_x$$

Напряжение на участке реостата ak можно измерить вольтметром. Таким образом, вольтметр показывает ЭДС источника.

$$U_V = \varepsilon_x.$$

Преимущество компенсационного метода измерения ЭДС заключается в том, что погрешность измерения ЭДС совпадает с погрешностью вольтметра, который используется в эксперименте. Не требуется дополнительных расчетов, которые приводили бы к увеличению погрешности.

Вариант 2

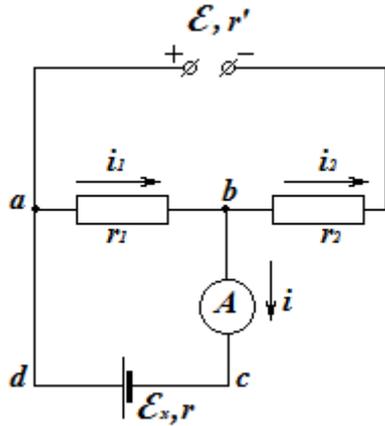


Рисунок 4

Для более точного определения ЭДС источника можно применить иной вариант компенсационного метода.

Собирают цепь, изображенную на рисунке. Переменные сопротивления r_1 и r_2 представляют собой магазины сопротивлений со спаренными рукоятками, чтобы увеличение одного сопротивления сопровождалось уменьшением

другого сопротивления на такую же величину. При этом $r_1 + r_2 = R = const$.

Изменяя сопротивления r_1 и r_2 , опять добиваются того, чтобы ток через амперметр стал равным нулю. В этом случае

$$i_1 = i_2 = \frac{\mathcal{E}}{r_1 + r_2 + r'} = \frac{\mathcal{E}}{R + r'}$$

Записав второе правило Кирхгофа для контура $abcd$, опять получаем

$$\mathcal{E}_x = i_1 r_1 = \frac{\mathcal{E} r_1}{R + r'} \quad (1)$$

Заменим источник с \mathcal{E}_x на другой, ЭДС которого нам известна - \mathcal{E}_n . Опять добиваемся режима компенсации. Для этого сопротивление r_1 изменится на r_n . Тогда

$$\mathcal{E}_n = \frac{\mathcal{E} r_n}{R + r'} \quad (2)$$

Разделив почленно выражения (1) и (2), получаем

$$\frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}_n} = \frac{r_1}{r_n} \quad \rightarrow \quad \mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n = \frac{r_1}{r_n}.$$

Поскольку сопротивление проволоки прямо пропорционально ее длине, то отношение сопротивлений r_1 и r_n равно отношению длин l_1 и l_n .

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{l_1}{l_n}. \quad (3)$$

Очевидно, что точность определения неизвестной ЭДС в данном случае не зависит от внутренних сопротивлений источников и сопротивлений приборов. Точность определения \mathcal{E}_x зависит от точности определения ЭДС источника \mathcal{E}_n , который используется для сравнения, и значений сопротивлений r_1 и r_n . В качестве вспомогательного источника, как правило, используется нормальный элемент, ЭДС которого определена очень точно. Сопротивления измеряются точными магазинами сопротивлений.

1.2 Практическая часть

Задание 1 Измерение ЭДС источника вольтметром

1. Определите класс точности и приборную погрешность вольтметров.
2. Подключите вольтметр 1 к клеммам батарейки. Запишите показания вольтметра.
3. Подключите вольтметр 2 к клеммам батарейки. Запишите показания вольтметра. Почему показания вольтметров отличаются?

Задание 2 Определение ЭДС источника компенсационным методом

Вариант 1

1. Соберите цепь по рисунку 3 используя вольтметр № 2.
2. Установите предел измерения миллиамперметра 200 мА.

3. Перемещая ползунок реостата, добейтесь того, чтобы показания амперметра стали равными нулю.
4. Переключите режим миллиамперметра на 20 мА. Перемещая ползунок реостата, снова добейтесь нулевых показаний прибора.
5. Запишите показания вольтметра с учетом приборной погрешности. Показания вольтметра совпадают с ЭДС ε_x .
6. Измерьте длину части реостата, параллельно к которой подключен источник неизвестной ЭДС.

Вариант 2

1. Замените источник неизвестной ЭДС на нормальный элемент.
2. Установите предел измерения миллиамперметра 200 мА.
3. Перемещая ползунок реостата, добейтесь того, чтобы показания амперметра стали равными нулю.
4. Переключите режим миллиамперметра на 20 мА. Перемещая ползунок реостата, снова добейтесь нулевых показаний прибора.
5. Измерьте длину части реостата, параллельно к которой подключен нормальный элемент.
6. Используя соотношение (3), рассчитайте ЭДС неизвестного источника. Рассчитайте погрешность определения ε_x .
7. Сравните значения ЭДС, полученные при непосредственном измерении ЭДС вольтметром и использовании компенсационного метода. Сделайте выводы.

1.3 Контрольные вопросы

1. Условия существования тока в проводнике.
2. Какие силы называют сторонними?
3. Что такое ЭДС источника? Каков физический смысл этой величины?
Единицы измерения ЭДС?
4. Что показывает вольтметр, подключенный к клеммам источника?
5. Объясните суть компенсационного метода измерения ЭДС источника.

Список использованных источников

1. Калашников, С.Г. Электричество: учебное пособие / С.Г. Калашников. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 624 с. – ISBN 5-9211-0312-1.
2. Электричество / Д.В. Сивухин. – 3-е изд., стер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 654 с.

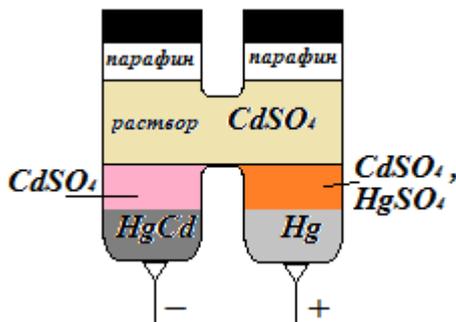
Приложение А

Что такое нормальный элемент?

Нормальный элемент представляет собой гальванический элемент, составленный из веществ, обеспечивающих постоянство разности потенциалов между электродами.

Нормальный элемент состоит из двух пробирок. В одной из них – ртуть, на дне другой – амальгама кадмия. Положительным электродом является ртуть, отрицательным – амальгама кадмия. Напряжение между электродами при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $1,0186\text{ В}$. При изменении температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ это напряжение изменяется менее, чем на $0,0001\text{ В}$.

Нормальный элемент рассчитан на маленькие токи, порядка нескольких микроампер. Только при этом условии напряжение между электродами практически не изменяется.



Нормальный элемент в электроизмерительной технике является своеобразным эталоном напряжения, подобно тому, как в механике есть эталоны длины (метр) и массы (килограмм).

2 Лабораторная работа №2 Исследование электрических цепей

Цели работы:

1. Научиться регулировать ток в цепи и напряжение на нагрузке.
2. Выяснить соотношения между сопротивлениями реостата и нагрузки для плавной регулировки тока и напряжения.
3. Проверить законы последовательного и параллельного соединений.

Оборудование: реостаты с сопротивлениями обмоток 30 и 200 Ом; источник постоянного тока; прибор ТЛ – 4М; амперметр; панель с резисторами; соединительные провода.

2.1 Теоретическая часть

Реостат – это регулируемое сопротивление или переменный резистор). Он предназначен для регулирования силы тока в цепи и включается последовательно с нагрузкой так, как показано на рисунке 1.

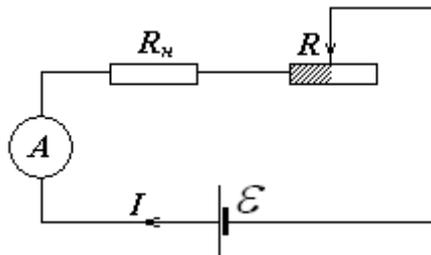


Рисунок 1

Обычно реостат представляет собой обмотку из проволоки с высоким удельным сопротивлением, намотанную на изолирующий жаростойкий цилиндр. По обмотке скользит подвижный контакт, позволяющий изменять сопротивление той части реостата, которая включена в цепь.

Чтобы регулировать ток в нагрузке в широких пределах, между сопротивлениями нагрузки R_n и реостата R должно выполняться определенное соотношение. Если пренебречь сопротивлением источника тока, то по закону Ома ток в цепи равен:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_n}$$

Очевидно, если сопротивление реостата R много меньше сопротивления нагрузки R_n , то знаменатель дроби практически не будет изменяться при изменении сопротивления реостата, и ток в цепи будет определяться исключительно сопротивлением нагрузки $I \approx \frac{\mathcal{E}}{R_n} = const$. В этом случае изменение сопротивления реостата не влияет на изменение тока в цепи.

Если же сопротивление реостата много больше сопротивления нагрузки $R \gg R_n$, то в этом случае ток в цепи $I \approx \frac{\mathcal{E}}{R}$ будет практически полностью зависеть от сопротивления реостата.

Потенциометр – устройство для плавной регулировки напряжения на нагрузке. Его устройство не отличается от реостата, но схема включения в цепь будет другой (см. рисунок 2).

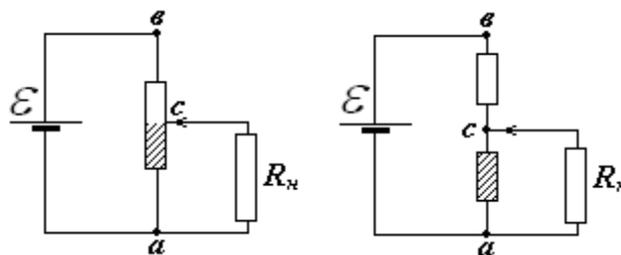


Рисунок 2

Подвижный контакт делит обмотку реостата на две части с сопротивлениями R_{ac} и R_{cb} так, что $R_{ac} + R_{cb} = R$. На эквивалентной схеме справа видно, что нагрузка подключается параллельно к части витков реостата R_{ac} .

При этом напряжение на нагрузке будет равно

$$\begin{aligned}
U_n = U_{ac} &= I \cdot R_{ac-нагрузка} = \frac{\mathcal{E}}{(R - R_{ac}) + \frac{R_{ac} \cdot R_n}{R_{ac} + R_n}} \cdot \frac{R_{ac} \cdot R_n}{R_{ac} + R_n} = \\
&= \frac{\mathcal{E} \cdot R_{ac} \cdot R_n}{(R - R_{ac}) \cdot (R_{ac} + R_n) + R_{ac} \cdot R_n} = \frac{\mathcal{E} R_{ac} \cdot R_n}{RR_{ac} + RR_n - R^2_{ac} - R_{ac} R_n + R_{ac} R_n} = \\
&= \frac{\mathcal{E} R_{ac} R_n}{RR_{ac} + RR_n - R^2_{ac}} = \frac{\mathcal{E}}{\frac{RR_n}{R_{ac} R_n} + \frac{R_{ac}(R - R_{ac})}{R_{ac} R_n}} = \frac{\mathcal{E}}{\frac{R}{R_{ac}} + \frac{(R - R_{ac})}{R_n}}
\end{aligned}$$

При $R_n \gg R$ (сопротивление нагрузки много больше сопротивления реостата) слагаемое $\frac{(R - R_{ac})}{R_n}$ стремится к нулю, тогда $U_n \approx \frac{\mathcal{E} \cdot R_{ac}}{R} = n \cdot \mathcal{E}$, где

$n = \frac{R_{ac}}{R}$ - часть реостата, параллельно к которой подключена нагрузка. Видим,

что напряжение в этом случае меняется прямо пропорционально числу витков, с которых снимают напряжение. Это оптимальный режим использования потенциометра в цепи.

Если же сопротивление нагрузки меньше сопротивления реостата $R_n \ll R$, то значительная часть тока будет в точке С ответвляться на нагрузку и напряжение на нагрузке будет меняться нелинейно. Это неудобно для практического использования потенциометра.

2.2 Практическая часть

Задание 1 Регулирование силы тока в цепи.

1. Соберите цепь по рисунку 1, используя реостат сопротивлением 30 Ом и резистор 300 Ом (или 200 Ом) с панели.
2. Плавно меняя сопротивление части реостата (n), включенной в цепь, проследите за изменением тока в цепи. Показания амперметра занесите в таблицу.
3. Постройте график зависимости $I(n)$.
4. Замените реостат на двухсотоммный и повторите измерения. Показания амперметра занесите в таблицу.

5. Постройте на той же координатной плоскости график $I(n)$ для цепи с реостатом, сопротивление которого 200 Ом.
6. Сделайте вывод о том, каким должно быть соотношение сопротивлений реостата и нагрузки для того, чтобы можно было плавно регулировать ток в цепи.

Таблица 1 - Результаты измерений

Часть реостата - n	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Сила тока, А (реостат 30 Ом)											
Сила тока, А (реостат 200 Ом)											

Задание 2 Регулирование напряжения на нагрузке при помощи потенциометра.

1. Соберите цепь по рисунку 2, включив в нее реостат сопротивлением 30 Ом и резистор 600 Ом в качестве нагрузки (два последовательно соединенных резистора по 300 Ом с панели).
2. Параллельно нагрузке подключите вольтметр (предел измерения 30 В).
3. Плавно меняя сопротивление части реостата, с которой снимается напряжение на нагрузку, проследите за изменением показаний вольтметра. Измерения занесите в таблицу.
4. Постройте график зависимости напряжения на нагрузке от части реостата, с которой снимается напряжение $U(n)$.
5. Замените потенциометр реостатом с сопротивлением обмотки 200 Ом и повторите измерения.
6. Измерения занесите в таблицу и постройте соответствующий график для потенциометра сопротивлением 200 Ом.
7. Сделайте вывод о том, каким должно быть соотношение сопротивлений нагрузки и реостата, чтобы реостат можно было использовать в качестве потенциометра для регулирования напряжения на нагрузке.

Таблица 2 – Результаты измерений

Часть реостата - n	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Сила тока, А (реостат 30 Ом)											
Сила тока, А (реостат 200 Ом)											

Задание 3 Проверка законов последовательного и параллельного соединений.

1. Соберите цепь по рисунку 3.

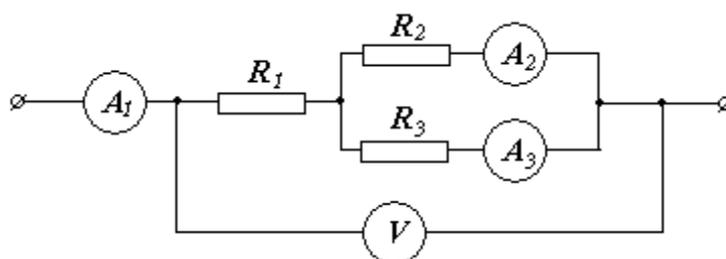


Рисунок 3

2. Измерьте общее напряжение, подаваемое на нагрузку, силу тока в неразветвленной части цепи и силы токов в отдельных ветвях.
3. Результаты измерений занесите в таблицу 3.
4. Зная сопротивления резисторов на панели, рассчитайте соответствующие токи, пользуясь законами последовательного и параллельного соединений. Результаты расчетов занесите в таблицу 3.
5. Сравните расчеты с экспериментальными данными.
6. Сделайте вывод.

Таблица 3

Сопротивление R, Ом	Расчетный ток I, А	Опытное значение I, А

Контрольные вопросы

1. Как устроен и работает реостат?
2. Каким должно быть сопротивление реостата для регулирования тока в цепи?
3. Как устроен потенциометр?
4. Каким должно быть сопротивление реостата для использования его в качестве потенциометра?
5. Сформулируйте законы последовательного соединения проводников.
6. Сформулируйте законы параллельного соединения проводников.
7. Закон Ома для полной цепи.
8. Что называют полезной мощностью в цепи?
9. При какой нагрузке мощность, выделяемая во внешней цепи, максимальна?
10. Что понимать под КПД электрической цепи.
11. Каким должно быть сопротивление нагрузки, чтобы КПД цепи был большим?

3 Лабораторная работа № 3 Электрический ток в газе.

Несамостоятельный и самостоятельный разряды

Цель работы:

Получить вольтамперные характеристики несамостоятельного и самостоятельного тлеющего разрядов. Проанализировать результаты.

Оборудование: лабораторный стенд содержащий:

- 1) источники питания, миллиамперметр, вольтметр с двумя пределами измерений, газонаполненный элемент ЦГ-4;
- 2) стабилатрон СГ1С, микроамперметр, магазин сопротивлений.

3.1 Теоретическая часть

Прохождение электрического тока через газы называется **газовым разрядом**. Газы в нормальном состоянии являются изоляторами, носители тока в них практически отсутствуют. Лишь при создании особых условий в газах появляются носители тока (ионы, электроны) и в присутствии электрического поля возникает электрический разряд. Газ становится проводником электрического тока, когда некоторая часть его атомов (молекул) *ионизируется*, т.е. происходит их расщепление на ионы и электроны. Для этого газ нужно подвергнуть действию какого-либо внешнего ионизатора: сильному нагреву (энергия молекул становится настолько большой, что при столкновении они разбиваются на ионы), коротковолновым электромагнитным излучением (ультрафиолетовые, рентгеновские, γ – излучение), ионизирующему излучению (потоки электронов, протонов, α – частиц) и т.д. При такой ионизации газов происходит вырывание из некоторых атомов (молекул) одного или нескольких электронов, в результате чего эти молекулы становятся положительно заряженными ионами (процессы 1 и 3 на рисунке 1). При некоторых условиях электроны могут захватываться нейтральными молекулами, которые таким образом становятся отрицательными ионами (процесс 2). Процесс ионизации газов может происходить в объеме газа (объемная ионизация) или на границе раздела

между газом и твердым электродом (поверхностная ионизация). Одновременно с процессом ионизации газа всегда протекает и обратный процесс – *рекомбинации*: при встрече положительных и отрицательных ионов или положительных ионов и электронов происходит образование нейтральных молекул или атомов (процесс 4). При этом излучается квант энергии, за счет чего возможен фотоэффект с катода.

Рассмотрим цепь, содержащую газовый промежуток (рисунок 1), непрерывно подвергающийся действию какого-либо ионизатора. В результате такого воздействия в цепи потечет электрический ток, созданный положительными ионами, движущимися в направлении электрического поля, и отрицательными ионами и электронами, движущимися против направления поля.

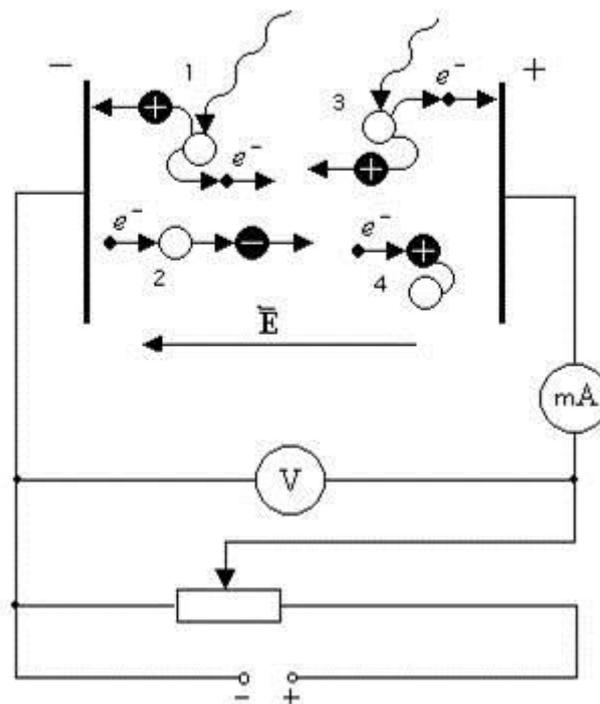


Рисунок 1

Зависимость этого тока от приложенного к электродам напряжения представлена на рисунке 2. На участке ОА сила тока подчиняется закону Ома, т.е. растет пропорционально напряжению. При дальнейшем увеличении ($U > U_A$) напряжения выполнение закона Ома нарушается – рост силы тока замедляется (участок АВ), а затем прекращается совсем (участок ВС). Это объясняется тем, что все носители заряда, создаваемые внешним

ионизатором за некоторое время успевают достичь электродов. В результате имеем ток *насыщения*. Такой разряд при малом значении разности потенциалов между анодом и катодом в газе называется *тихим разрядом*. На участке СДЕ имеем режим газового усиления: ток возрастает за счет вторичной электронной эмиссии. На длине свободного пробега электрон приобретает энергию, достаточную для ударной ионизации атома (молекулы) газа ($U > U_c$). Но более тяжелые ионы ($m_u \gg m_e$) ионизации не производят (т.к. длина свободного пробега $\lambda_u < \lambda_e$). Количество фотонов при рекомбинации относительно невелико, поэтому вероятность фотоэффекта весьма мала. В этих условиях при прекращении действия ионизатора все электроны в газовом промежутке через некоторое малое время достигнут электрода и разряд прекратится. Если на любом участке кривой ОАВСДЕ прекратить действие ионизатора, то прекратится и газовый разряд. Разряды, существующие только под действием внешних ионизаторов, называются **несамостоятельными**.

Кроме электронных лавин возникают еще и ионные. В газоразрядном промежутке положительные ионы движутся к катоду, а электроны – к аноду. Вторичные электроны вновь ионизируют молекулы газа, и, следовательно, общее количество электронов и ионов будет *лавинообразно* возрастать по мере продвижения электронов к аноду. Это является причиной увеличения электрического тока на участке СДЕ (рисунок 2).

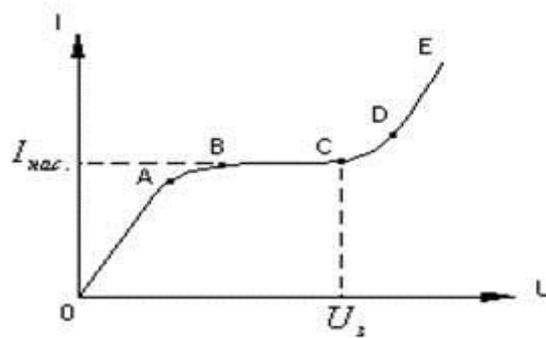


Рисунок 2 - Зависимость электрического тока от приложенного к электродам напряжения

Описанный процесс называется *ударной ионизацией (газовым усилением)*. В этом случае сила тока определяется как интенсивностью

воздействия ионизатора, так и газовым усилением, которое зависит от давления газа и напряженности электрического поля в области, занимаемой разрядом.

Однако ударная ионизация под действием электронов недостаточна для поддержания разряда при удалении внешнего ионизатора. Разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора, называется *самостоятельным*. Для перехода несамостоятельного разряда в самостоятельный необходимо «включение» каких-то новых механизмов генерации носителей заряда. В этом случае происходит «пробой» газового промежутка. Нужно, чтобы электронно-ионные лавины «воспроизводились», т.е. чтобы в газе под действием каких-то процессов возникали новые электроны. Это может происходить в результате следующих процессов:

1) ускоренные полем положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны;

2) положительные ионы, сталкиваясь с молекулами газа, приводят их в возбужденное состояние; переход таких молекул в нормальное состояние сопровождается испусканием фотона;

3) фотон, поглощенный нейтральной молекулой, ионизирует ее, происходит так называемый процесс фотонной ионизации молекул;

4) под действием фотонов происходит выбивание электронов из катода.

5) и наконец, при значительных напряжениях между электродами газового промежутка наступает момент, когда положительные ионы, обладающие меньшей длиной свободного пробега, чем электроны, приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа.

В результате описанных процессов (2 – 5) разряд становится самостоятельным, т.е. сохраняется после прекращения действия внешнего ионизатора. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, называется напряжением пробоя, или напряжением зажигания U_3 (рисунок 2).

Многообразие условий, определяющих исходное состояние газа (состав, давление и т. д.), внешних воздействий на газ, форм, материала и

расположения электродов, геометрии возникающего в газе электрического поля и т. п. приводит к тому, что существует множество видов электрических разрядов в газах, причём законы, которые их описывают сложнее, чем законы прохождения электрического тока в металлах и электролитах. Самые распространенные типы самостоятельного разряда:

1) **Тлеющий разряд** возникает при низких давлениях. Если к электродам, впаянным в стеклянную трубку длиной 30-50 см, приложить постоянное напряжение в несколько сотен вольт, постепенно откачивая из трубки воздух, то при давлении $\approx 5,3 \div 6,7$ кПа возникает разряд в виде светящегося извилистого шнура красноватого цвета, идущего от катода к аноду. Это происходит потому, что распределение ионов и электронов в газовой промежутке неравномерно. Концентрация ионов возрастает с приближением к катоду. Объемный положительный заряд у катода создает сильное электрическое поле, т.к. происходит преимущественно описанный выше процесс 2.

Тлеющий разряд широко используется в технике. Так как свечение положительного столба имеет характерный для каждого газа цвет, то его используют в газосветных трубках для светящихся надписей и реклам. В лампах дневного света, более экономичных, чем лампы накаливания, излучение тлеющего разряда, происходящее в парах ртути, поглощается нанесенным на внутреннюю поверхность трубки флуоресцирующим веществом (люминофором), начинающим под воздействием поглощенного излучения светиться. Спектр свечения, при соответствующем подборе люминофоров, близок к спектру солнечного излучения.

2) **Искровой разряд**, наблюдающийся при нормальном давлении и большой напряженности поля между электродами, имеет вид прерывистых ярких зигзагообразных нитей – каналов ионизованного газа. Нити пронизывают пространство между электродами и исчезают, сменяясь новыми. При этом наблюдается яркое свечение газа и выделяется большое количество теплоты. В искровых каналах, где создаются высокое давление и весьма высокие температуры, возникают электронные и ионные лавины,

которыми определяются все свойства искрового разряда. Его примером является молния. Сила тока в канале молнии достигает 10000—20000 А, длительность импульса тока составляет несколько десятков микросекунд. Самостоятельный электрический разряд между грозовым облаком и Землей после нескольких ударов молнии сам собою прекращается, так как большая часть избыточных электрических зарядов в грозовом облаке нейтрализуется электрическим током, протекающим по плазменному каналу молнии.

При увеличении силы тока в канале молнии происходит нагревание плазмы до температуры свыше 10 000 К. Изменения давления в плазменном канале молнии при увеличении силы тока и прекращении разряда вызывают звуковые явления, называемые громом.

3) **Дуговой разряд** является формой разряда при большой плотности тока и сравнительно небольшом напряжении между электродами, порядка нескольких десятков вольт. Основной причиной дугового разряда является интенсивная термоэлектронная эмиссия раскаленного катода. Электроны ускоряются электрическим полем и производят ударную ионизацию молекул газа, уменьшается электрическое сопротивление газового промежутка, а его проводимость сильно возрастает. Между электродами возникает столб ярко светящегося газа (электрическая дуга). При атмосферном давлении температура катода достигает 3000 °С, бомбардировка анода электронами создает в нем углубление (за счет «испарения» вещества с анода) дуги с температурой 4000 °С. Температура газа в канале электрической дуги 5000 °С – 6000 °С. Дуговой разряд, как мощный источник света, используется в прожекторах, проекционной и киноаппаратуре, для электросварки, резки твердосплавных материалов.

4) **Коронный разряд** наблюдается при нормальном давлении в газе, находящемся в сильно неоднородном электрическом поле (около остриев, проводов линий высокого напряжения и т.д.). Ионизация газа электронным ударом и его свечение, напоминающее корону, происходят только в небольшой области, прилегающей к электроду (коронирующий электрод). Светящийся слой называется коронирующим слоем. Если коронирует катод,

то электроны, которые вызывают ионизацию в объеме коронирующего слоя, выбиваются из катода положительными ионами. Если коронирует анод, то электроны возникают вблизи анода благодаря ионизации газа под действием излучения коронирующего слоя. При повышенном напряжении коронный разряд на острие имеет вид светящейся кисти – тонких светящихся линий, которые выходят из острия, имеют изгибы и изломы, изменяющиеся с течением времени (кистевой разряд). Коронный разряд ограничивает напряжение на высоковольтных линиях.

Электрические разряды в газах подчиняются закону Ома лишь при очень малой приложенной извне разности потенциалов, поэтому их электрические свойства описывают с помощью вольтамперной характеристики (ВАХ). Рассмотрим ВАХ газового разряда в двухэлектродном приборе, наполненном газом (рисунок 3а). Если, приложить к электродам небольшое напряжение, то через прибор потечет незначительный ток (10^{-12} А – 10^{-18} А), обусловленный внешним ионизатором. С увеличением напряжения ток возрастает (участок ОА) и быстро достигает насыщения (АБ).

При дальнейшем повышении напряжения до значения $U_a > U_i$ (потенциал ионизации) вследствие ударной ионизации газа (участок БВ) ток увеличивается. Выбиваемые первичными электронами из атомов газа вторичные электроны, разгоняясь полем между анодом и катодом, выбивают при столкновениях с атомами газа новые электроны, которые также производят ударную ионизацию. Т.к. число электронов, летящих к аноду, вследствие ударной ионизации все время увеличивается, то на пути к аноду создается «лавина» электронов и ионов (несамостоятельный тихий разряд, участок БВ). Участок ОА, соответствующий очень низким токам практически не используется. В точке Г самостоятельный тлеющий разряд зажигается.

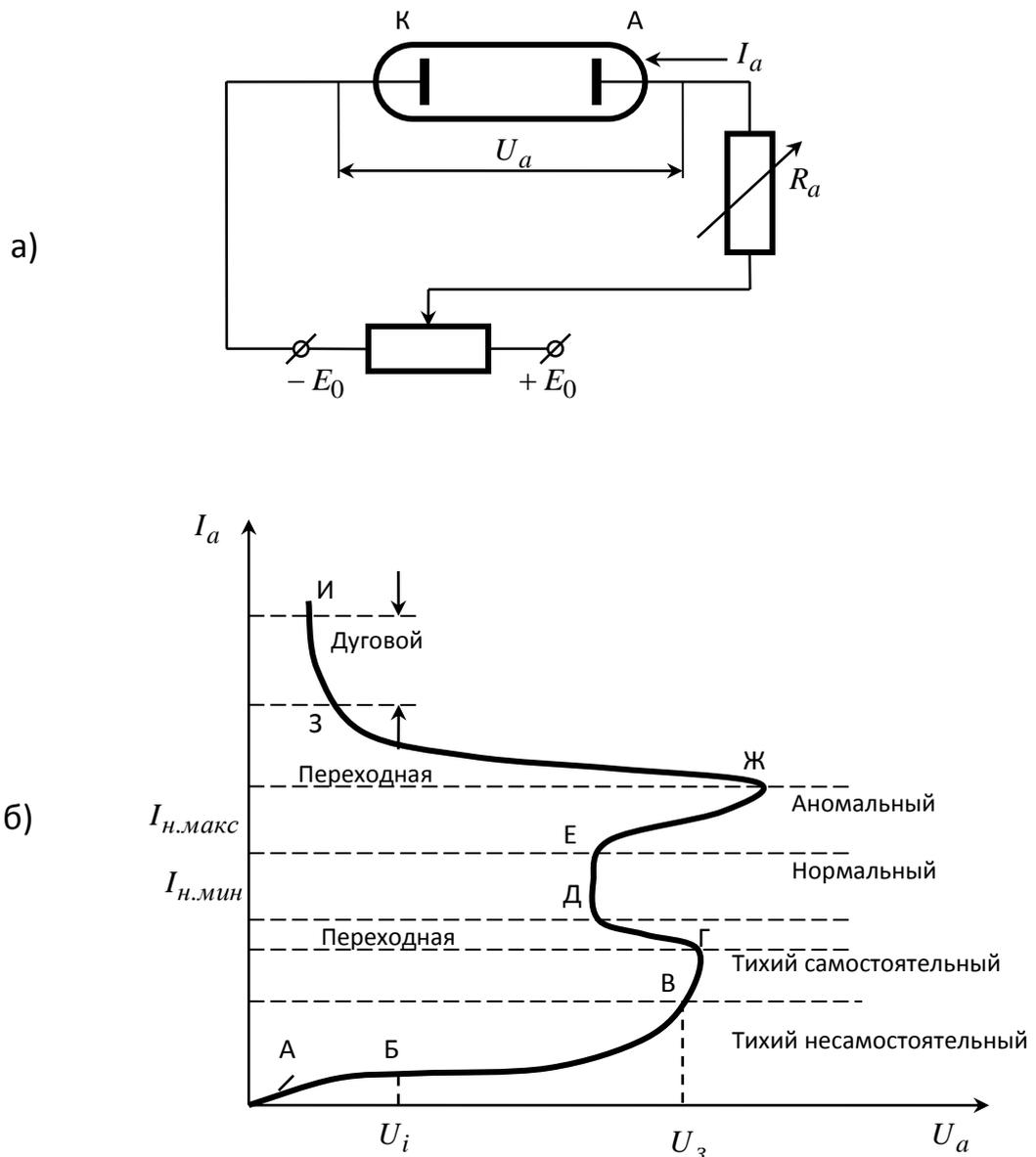


Рисунок 3: а – схема включения диода, б – зависимость $I_a = f(U_a)$

В точке Г на ВАХ тихий несамостоятельный разряд (участок ОАБВ) переходит в самостоятельный тихий (коронный) или тлеющий разряд в зависимости от величины ограничительного сопротивления R_a и давления газа в приборе. При относительно небольших R_a участок ВГ почти не наблюдается и разряд через проходную область ГД переходит в нормальный тлеющий (участок ДЕ).

При увеличении тока до значения $I_a > I_{н.макс}$ падение напряжения на приборе с ростом тока увеличивается (участок ЕЖ). Это участок отличающийся от участка ДЕ увеличенной плотностью и повышенным падением напряжения, соответствует аномальному тлеющему разряду.

Дальнейшее увеличение тока за счет уменьшения R_a или повышения E_0 может привести к тому, что аномальный разряд скачком превратится в дуговой разряд (участок ЖЗ). Малое падение напряжение объясняется образованием мощной газоразрядной плазмы (сильно ионизированный газ), имеющей незначительное сопротивление.

При анализе работы различных схем с газоразрядными приборами одним из основных является вопрос о том, какой вид разряда установится в приборе после пробоя основного газоразрядного промежутка и насколько он будет устойчив. Вид установившегося после пробоя разряда зависит от многих условий, но главными из них являются состояние газа (плотность тока j , давление p) и напряженность электрического поля E (рисунок 4).

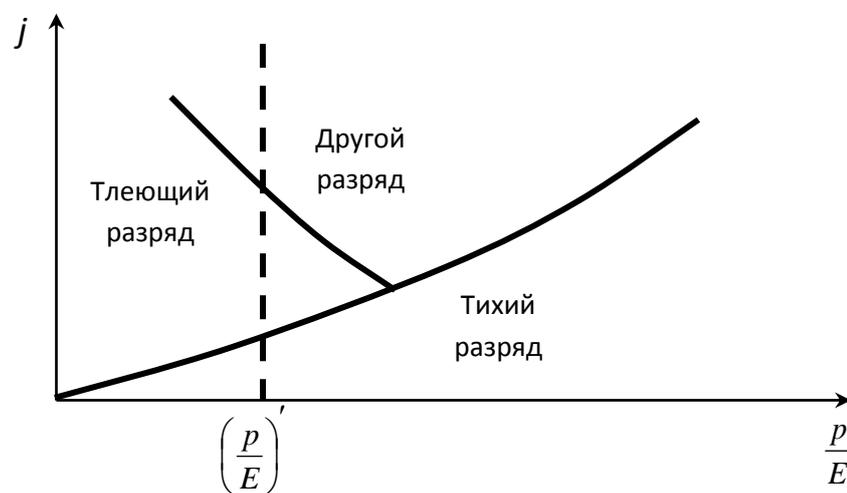


Рисунок 4

Из приведенной на рисунке 4 характеристики видно, что при некотором значении $\left(\frac{p}{E}\right)'$ в приборе можно наблюдать все три вида разряда в зависимости от плотности тока j .

Тихому разряду соответствуют незначительные токи ($I_a \leq 10^{-4} \div 10^{-5}$ А) при напряжении U_a порядка сотен и даже тысяч вольт.

Тлеющему разряду соответствует анодный ток от десятых долей миллиампера до десятых долей ампера при $U_a =$ от 50 до 160 В.

При дуговом разряде анодный ток может изменяться от 10^{-1} до 10^4 А, а анодное напряжение лежит в пределах 10-30 В.

Применение электрических разрядов. Глубокое понимание процессов, сопровождающих газовый разряд, привело к созданию ряда приборов и устройств, которые широко используются в различных областях науки и техники.

Удары электронов, разгоняемых электрическим полем, приводят не только к ионизации атомов (молекул) газа, но и к возбуждению атомов (молекул), сопровождающемуся излучением света. Световое излучение плазмы самостоятельного электрического разряда широко используется в народном хозяйстве и в быту. Это лампы дневного света и газоразрядные лампы уличного, освещения, электрическая дуга в кинопроекторном аппарате и ртутно-кварцевые лампы, применяемые в больницах и поликлиниках.

Высокая температура плазмы дугового разряда позволяет применять его для резки и сварки металлических конструкций, для плавки металлов. С помощью искрового разряда ведется обработка деталей из самых твердых материалов.

Электрический разряд в газах бывает и нежелательным явлением, с которым в технике необходимо бороться. Так, например, коронный электрический разряд с проводов высоковольтных линий электропередач приводит к бесполезным потерям электроэнергии. Возрастание этих потерь с увеличением напряжения ставит предел на пути дальнейшего увеличения напряжения в линии электропередач, тогда как для уменьшения потерь энергии на нагревание проводов такое повышение весьма желательно.

Газоразрядные приборы очень разнообразны, они различаются видом используемого разряда. Они предназначены для стабилизации напряжения, защиты от перенапряжения, выполнения переключательных функций, индикации электрического состояния и т.д. Например, искровой разряд нашел широкое применение в науке и технике. С его помощью инициируют взрывы и процессы горения, измеряют напряжение, используют в спектральном анализе, для регистрации заряженных частиц, в

переключателях электрических цепей, для обработки металлов, разрушения высокопрочных материалов и пород.

В последнее время для повышения защиты уязвимых и ответственных объектов, например, пусковых комплексов ракет, пытаются реализовать различные формы управления молнией, в частности лазерное инициирование молнии. Лазерное инициирование основано на создании в воздухе ионизированного канала с помощью лазерного излучения.

3.2 Практическая часть

Задание 1

Исследование проводится с левой частью лабораторного стенда, которая содержит: источник питания, микроамперметр, вольтметр, газонаполненный фотоэлемент ЦГ – 4 (рисунок 5).

Фотоэлемент с цезиевым фотокатодом заполнен разряженным газом, обычно аргоном при давлении 0,1 мм рт. ст. – 1 мм рт. ст.

В этой части работы проверяют зависимость анодного тока от напряжения при несамостоятельном разряде – участок ОАБВ на рисунке 3б.

В качестве внешнего ионизатора для ионизации с катода носителей тока используют светодиод.

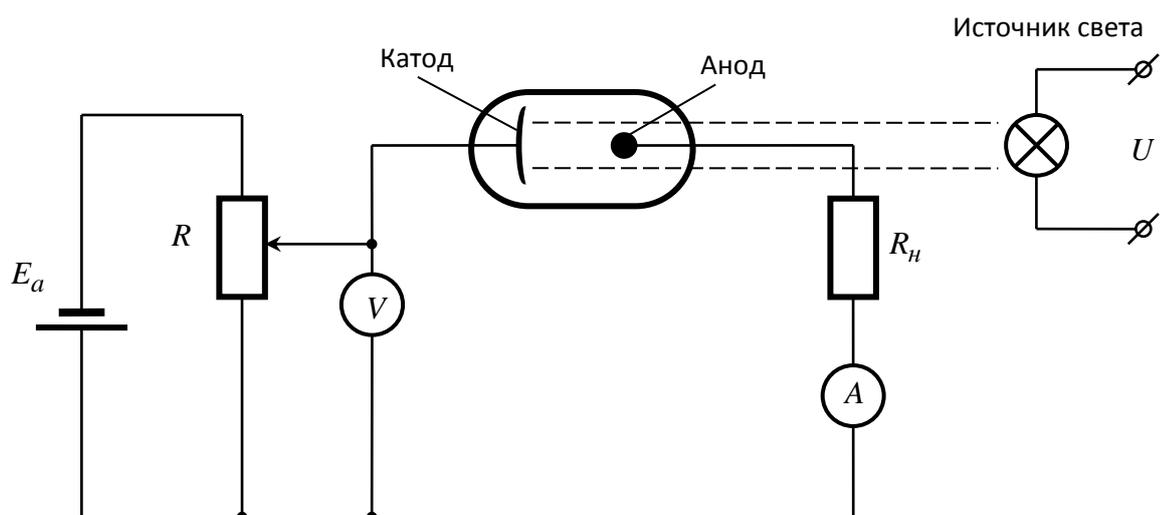


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки

1. Внимательно рассмотрите лабораторный стенд.
2. Включите питание установки в сеть. Переключите в рабочее положение первый блок питания.
3. Переключите вольтметр в предел измерения 50 В. С помощью потенциометра I установите рабочее напряжение 0 В.
4. К левой части лабораторного стенда подсоедините к «+» и «-» с помощью соединительных проводов микроамперметр переключенный в предел измерений 100 мкА.
5. С помощью ручки потенциометра I подайте напряжение на фотоэлемент. Включите и выключите ионизатор, чтобы убедиться, что разряд не самостоятельный.
6. При включенном ионизаторе ручкой потенциометра I плавно и медленно меняя напряжение вольтметра с шагом 2 В, которое подается на газонаполненный элемент, и контролируя ток снимите ВАХ и показания занесите в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

U, В	0	2	4	6	...	20	25	30	...
I, мкА									

7. Отключите на лабораторном стенде ионизатор, убавьте показания вольтметра до нуля, выключите левый блок питания. Отсоедините микроамперметр.
8. Постройте график зависимости $I_a=f(U_a)$ анодного тока от напряжения.
9. Сравните полученные результаты с рисунком 3б теоретической части работы. Сделайте вывод.

Задание 2

Исследование проводится с правой частью лабораторного стенда, которая содержит: источник питания, миллиамперметр, вольтметр, магазин сопротивлений, стабилитрон СГ1С.

В этом задании экспериментально исследуют самостоятельный тлеющий разряд. Проверяют зависимость анодного тока от напряжения – участок ГДЕ на рисунке 3б.

1. К правой части лабораторного стенда с помощью соединительных проводов подключите магазин сопротивлений, выставленный на максимальное значение сопротивления.
2. Переключите в рабочее положение второй блок питания, располагающийся справа.
3. Переключите вольтметр в предел измерения 100 В.
4. С помощью ручки потенциометра II плавно и медленно увеличивая напряжение вольтметра при практически неизменном токе определить точку зажигания U_z , т.е. напряжение при котором возникает тлеющий газовый разряд. Она соответствует резкому падению напряжения на вольтметре при продолжении вращения ручки потенциометра II. На рисунке 3б это значение напряжения U_z соответствует точке Г.
5. Не изменяя положения ручки потенциометра II, рукоятками на магазине сопротивлений поочередно уменьшаем значение сопротивления. Изменения напряжения и силы тока занесите в таблицу 2.

Таблица 2

U, В									
I, мкА									

6. Убавьте показания вольтметра до нуля, выключите правый блок питания и сеть. Отсоедините магазин сопротивлений.
7. Постройте график зависимости $I_a=f(U_a)$ анодного тока от напряжения.
8. По полученной зависимости $I_a=f(U_a)$ на участке соответствующему кривой ДЕ на рисунке 3б выберите три точки и определите для них сопротивление газового промежутка используя закон Ома для участка цепи.
9. Сравните полученные результаты с рисунке 3б теоретической части работы. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. В результате каких процессов в газе появляются носители тока?
2. При каких условиях возможен переход несамостоятельного разряда в самостоятельный?
3. Типы самостоятельного разряда и их применение.
4. Объясните ВАХ при тихом газовом разряде.
5. Почему при включении самостоятельного газового разряда происходит падение напряжения при увеличении силы тока (на рисунке 3б участок ГД)?
6. От каких условий зависит тип газового разряда?
7. Почему на разных участках ВАХ меняется сопротивление газового промежутка?

Список использованных источников

1. Генис, А.А. Приборы тлеющего разряда / А.А. Генис, И.Л. Горнштейн, А.Б. Пугач – «Техника», 1970. – 404 с.
2. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.- М.: Высшая школа, 2000. – 718 с.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 5 кн.: Кн. 1, кн. 2, кн. 3, кн. 4, кн. 5: Учеб. пособие для вузов / И.В. Савельев. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2003.
4. Телеснин, Р.В. Курс физики. Электричество / Р.В. Телеснин, В.Ф. Яковлев – М.: Просвещение, 1970. – 488 с.
5. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: Высшая школа, 2004. – 544 с.

4 Лабораторная работа № 4 Дифракция Фраунгофера на одной щели и на препятствии

Цель работы:

1. Изучить теорию явления дифракции света на одной щели и препятствии.
2. Исследовать дифракционную картину на одной щели и экспериментально измерить ширину щели.
3. Исследовать дифракционную картину на препятствии (нити) и экспериментально измерить толщину нити.

4.1 Теоретическая часть

Пусть на длинную узкую щель шириной «а» в непрозрачном экране (рисунок 1) падает плоская монохроматическая волна (пучок параллельных лучей). Каждая точка фронта волны в плоскости щели (А, А', В', В...) является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны вперёд от щели.

Рассмотрим за щелью пучок параллельных, отклонившихся на угол φ (угол дифракции) от первоначального направления. Поместим на пути собирающую линзу L_1 , а в фокальной плоскости линзы - экран \mathcal{E}_2 . Лучи соберутся в точке Р и, т.к. они когерентны, будут интерферировать. Результат интерференции в точке Р определяется разностью фаз вторичных волн в этой точке. Для различных волн разность хода различна. Проведём плоскость АС перпендикулярно дифрагированным лучам. Разность хода возникает только на пути волн от плоскости АВ до плоскости АС. Для волн, исходящих из точек А и В, разность хода равна:

$$\Delta = BC = a \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где a - ширина щели

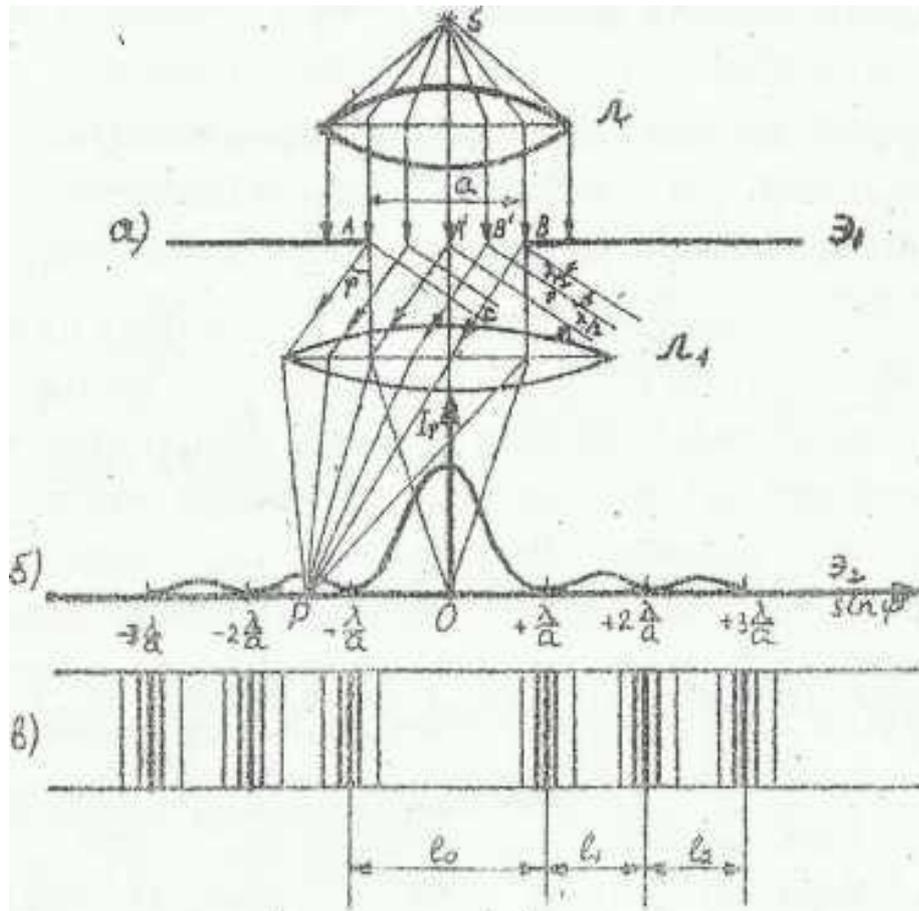


Рисунок 1

Разделим разность хода A на отрезки длиной $\frac{\lambda}{2}$ и из точек деления проведём плоскости (параллельные AC), которые, пересекаясь с плоскостью щели AB , разделяют её на ряд узких равных по ширине полосок - зон Френеля. Колебания в точке P , возникающие в результате действия таких двух соседних зон Френеля, имеют одинаковые амплитуды и отличающиеся на π фазы (т.к. разность хода между ними $\frac{\lambda}{2}$). Поэтому их суммарная амплитуда равна нулю. Таким образом, действие двух соседних зон Френеля взаимно уничтожается (происходит погашение колебаний). Зон Френеля в щели будет столько, сколько полуволин содержится в разности хода Δ , т.е.

$$m = \frac{\Delta}{\lambda/2} \quad m - \text{где число зон (2)}.$$

Интенсивность света в точке P определяется числом m ; при m чётном - минимальна, при m нечётном - максимальна. Условие минимума и

максимума интенсивности света в точке Р соответственно запишется (с учётом рисунка 1):

$$\text{Минимум } a \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

$$\text{Максимум } a \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

При $m=0$ в точке О экрана Э₂ наблюдается центральный максимум интенсивности света - максимум нулевого порядка; при $m = 1$ - максимум (минимум) первого порядка и т.д. Таким образом, число m - центрального максимума называется расстояние между двумя минимумами первого порядка (рисунок 1). Шириной первого порядка называется расстояние I_1 между первым и вторым минимумами и т.д. На экране Э₂, напротив центра линзы Л₁, наблюдается центральная, наиболее яркая, полоса, а по обе стороны от неё - чередующиеся тёмные и светлые полосы.

При освещении щели белым светом дифракционные максимумы для различных длин волн не будут совпадать (кроме центрального, нулевого). На экране около центральной белой полосы, по краям красной, будут видны цветные полосы (спектры, обращённые фиолетовым краем к центру).

4.2 Практическая часть

Задание 1 Наблюдение и анализ дифракционной картины от одной щели.

Внешний вид экспериментальной установки показан на рисунке 2. Свет от лазера (1) направляется на диафрагму (2) с вертикальной щелью, ширина которой может меняться с помощью микрометрического винта (3). Дифракционная картина наблюдается на экране (4), на котором закрепляется миллиметровая бумага.

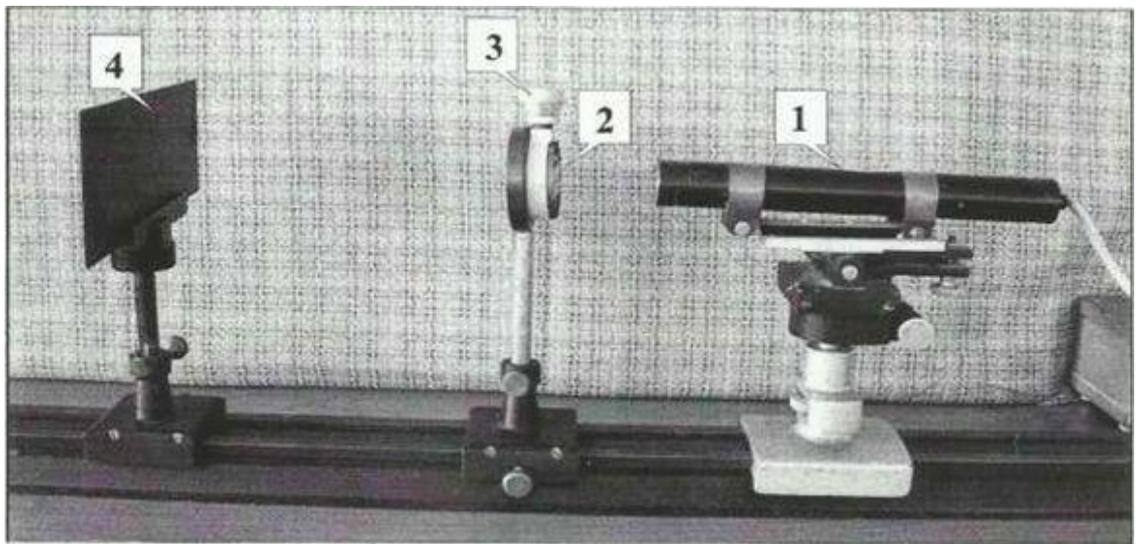


Рисунок 2 – Экспериментальная установка

Если на пути лазерного пучка поставить щель, то на экране за щелью будет наблюдаться дифракционная картина в виде центрального (наиболее яркого) максимума и системы симметричных относительно него максимумов различных порядков, разделённых минимумами (рисунок 3).

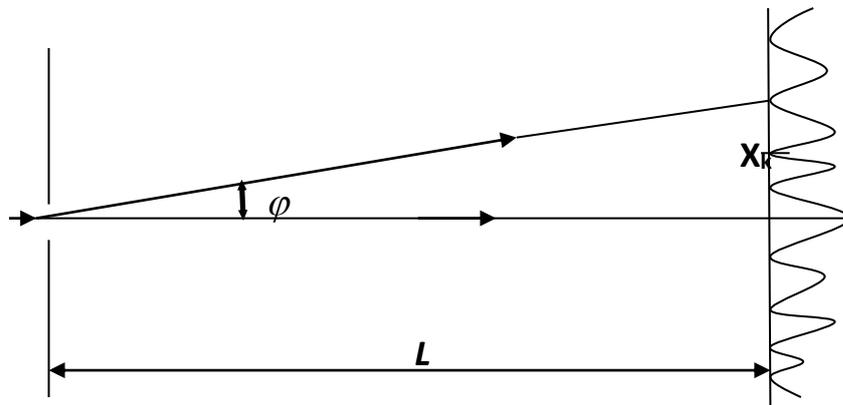


Рисунок 3

1. Меняя ширину щели, пронаблюдать изменения дифракционной картины и установить ширину щели такой, чтобы ширина дифракционных полос на экране была наилучшей для измерений.
2. Определить ширину щели по формуле для дифракционных минимумов от щели $a \sin \varphi = k\lambda$ где a - ширина щели; $k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ - порядок минимума; φ - угол дифракции, соответствующий минимуму k -го порядка.
3. Учесть, что в данной работе наблюдаемые углы дифракции малы,

поэтому можно считать $\sin \varphi_k \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_k}{L}$ (рисунок 2). Следовательно, $x_k = \frac{k\lambda L}{a}$,

где x_k - расстояние от центра дифракционной картины до минимума k -го порядка. При переходе от k -го минимума к $(k+1)$ -му x_k меняется на Δx , и

легко видеть, что $\Delta x = \frac{\lambda L}{a}$ (5), где Δx называется шириной дифракционной

полосы. Из формулы (5) рассчитать ширину дифракционной щели $a = \frac{\lambda L}{\Delta x}$.

Длина волны излучения лазера $\lambda = 6,63 \cdot 10^{-7}$ м, L - расстояние от дифракционной щели до экрана, измеренное по шкале оптической скамьи. Для большей точности измерения ширины дифракционной полосы следует измерить интервал, содержащий N полос, а затем вычислить ширину Δx одной полосы.

Задание 2 Изучение дифракции от нити

1. На оптической скамье установите диафрагму с тонкой нитью, и получите на экране чёткую дифракционную картину в виде центрального (наиболее яркого) максимума и системы симметричных относительно него максимумов различных порядков, разделённых минимумами.
2. Измерьте расстояние X_{33} и X_{44} между третьими и четвёртыми минимумами.

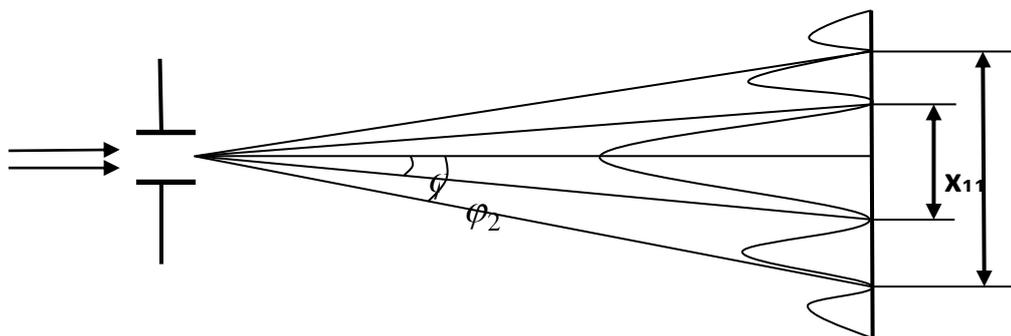


Рисунок 4

3. Вместо диафрагмы с нитью закрепите на оптической скамье щель и, меняя её ширину получите точно такую же дифракционную картину, которая

наблюдалась от нити (чтобы расстояния X_{33} и X_{44} были бы такими же, как и в случае дифракции от нити).

4. Определите ширину щели методом, описанном в упражнении 1. Согласно теореме Ж. Бабине, толщина нити должна быть равна ширине щели.

5. Для сравнения определите ширину контрольного отрезка нити с помощью микрометра.

Контрольные вопросы

1. В чём заключается явление дифракции света? Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
2. Сформулируйте условия максимума и минимума для одной щели.
3. Как изменяется дифракционная картина при увеличении щели, толщины нити? Выполнить рисунки.
4. Вывести формулу для расчёта ширины щели.
5. Сформулируйте цель работы, опишите экспериментальную часть и обсудите её.
6. В чём заключается принцип действия лазера? (см. Приложение В).
7. Каковы характерные особенности лазерного излучения?

Список использованных источников

1. Савельев И.В. Курс общей физики: в 4 т. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учебное пособие / И.В. Савельев; под общ. ред. В.И. Савельева. – М.: КНОРУС, 2009.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1990.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 т Т.5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие для вузов/ И.В. Савельев. - М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2002.- С. 170-175.

Приложение Б

(справочное)

Лазер (оптический квантовый генератор, от начальных букв англ. фразы: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает «усиление света вынужденным излучением») – устройство, преобразующее различные виды энергии (электрическую, световую, химическую, тепловую и т.д.) в энергию *когерентного электромагнитного излучения*.

Устройство лазера зависит от его режима работы, назначения, диапазона генерируемых длин волн λ и уровня генерируемой мощности. Оно во многом определяется также тем, какой вид энергии преобразуется лазером в когерентное излучение. Тем не менее, любой лазер, работающий как генератор когерентного излучения, должен состоять из *трех элементов*: (1) *устройства, поставляющего энергию*; (2) *активной среды, преобразующей полученную энергию в когерентное излучение*; (3) *устройства, осуществляющего обратную связь (резонатора)*.

В основе работы лазера лежит процесс *вынужденного испускания фотонов возбужденными квантовыми системами* – атомами, молекулами, жидкостями и твердыми телами.

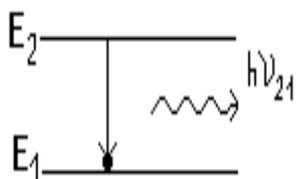


Рисунок Б.1

Простейшая форма *энергетической схемы* лазера выглядит следующим образом: выбирается атом (молекула, ион), среди энергетических состояний которого есть 2 энергетических уровня с возможным переходом. Атом, находящийся в энергетическом состоянии E_2 может уменьшить свою энергию и перейти в состояние E_1 , а избыток энергии $E_2 - E_1$ испустить в виде фотона, энергия которого $h\nu_{21}$. Частота ν_{21} фотона связана с изменением энергетического состояния атома соотношением $h\nu_{21} = E_2 - E_1$ (рисунок Б.1).

Спонтанные и вынужденные переходы

Для того, чтобы уяснить физическую основу работы оптического квантового генератора – лазера, необходимо выяснить, что такое *спонтанное и вынужденное излучение атомов*, а также выявить особенности *резонансного поглощения* фотонов атомами вещества.

Возбужденный атом из состояния E_2 может перейти в состояние E_1 с испусканием фотона как самопроизвольно (*спонтанное испускание*), так и под действием электромагнитного излучения (*индуцированное, или вынужденное испускание*).

Так как спонтанное излучение происходит самопроизвольно в произвольный момент времени, то при этом частота кванта света, направление распространения и фаза произвольны. Таким образом, спонтанное излучение является некогерентным.

Индукцированное излучение кванта света происходит под воздействием падающего на атом света. При этом испускаемый квант света будет той же частоты, что и частота падающего кванта. Это означает, что индукцированное излучение является когерентным.

В 1916 г. А. Эйнштейн предположил, что переход электрона с верхнего энергетического уровня на нижний с излучением фотона может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля с частотой, равной собственной частоте перехода. Предложение об использовании вынужденного испускания для усиления света было сделано в 1940 г В.А. Фабрикантом.

При *вынужденном* испускании испущенные фотоны полностью тождественны фотонам, воздействующим на систему атомов. Например, если воздействующая электромагнитная волна монохроматична, то индукцированно испускаемая волна будет тоже монохроматической, имеющей ту же частоту и те же направления распространения и поляризации (рисунок Б.2а). Вероятность индукцированного испускания пропорциональна вероятности резонансного поглощения и зависит от ее частоты. Вероятность индукцированного испускания максимальна, если частота ν воздействующей волны совпадает с ν_{21} .

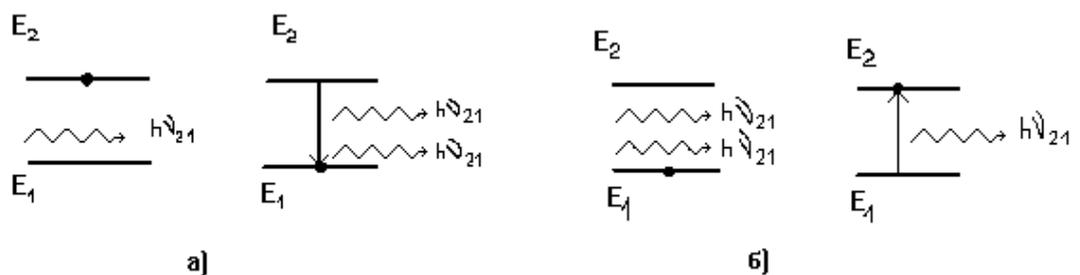


Рисунок Б.2

Рассмотрим условие, при котором может происходить усиление света при его прохождении через слой вещества.

Если атом находится в состоянии E_1 , то под действием внешней электромагнитной волны может происходить резонансное поглощение фотонов, сопровождающееся переходом $E_1 \rightarrow E_2$ (рисунок Б.2б). При резонансном поглощении энергия воздействующей волны уменьшается, а при индукцированном испускании увеличивается. Вероятность резонансного поглощения равна вероятности индукцированного испускания. Поэтому будет

ли преобладать в реальной системе атомов процесс вынужденного испускания или процесс резонансного поглощения, зависит от населенности энергетических уровней N_1 и N_2 .

Если больше половины атомов вещества находиться в возбужденном состоянии, то мощность светового излучения увеличивается после прохождения через вещество. Такое состояние называется состоянием с *инверсной* (от лат. Inversion- переворачивать) населенностью уровней. Хотя, состояние вещества, в котором меньше половины атомов находится в возбужденном состоянии, более типично

Преобладание вынужденного испускания над поглощением возможно лишь при выполнении условия $N_2 > N_1$. Данное условие $N_2 > N_1$, называемое *инверсией населенностей*, может быть достигнуто путем подвода энергии в неравновесной системе.

Процесс создания инверсной населенности называется *накачкой*, а подводимая энергия – *энергией накачки*. Накачка может осуществляться несколькими способами, в зависимости от усиливающей среды лазера. К ним относятся: оптическая накачка, химическое возбуждение, электронно-лучевое возбуждение, накачка при столкновениях в электрическом разряде.