

Измерение энергии первого уровня атома гелия методом электронного возбуждения

Маслов Артём, Дедков Денис
группа Б01-108а
16.10.2023

Цель и задачи работы:

1. Методом электронного возбуждения измерить энергию первого уровня атома гелия динамическим и статическим методами.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1:

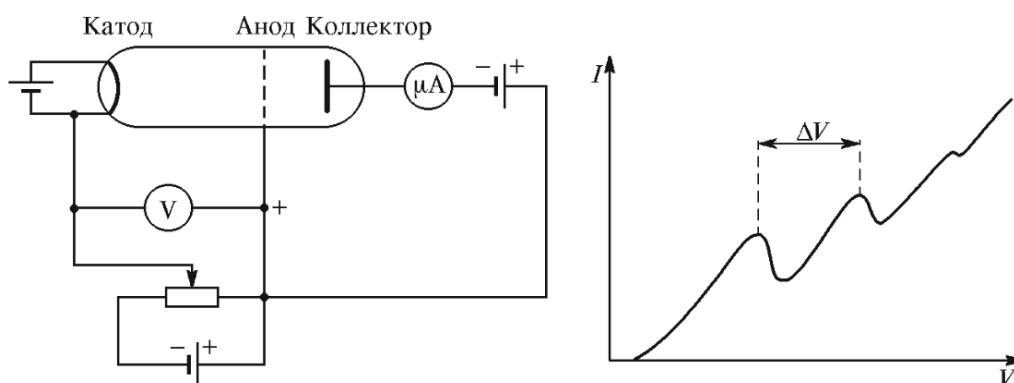


Рис. 1: Слева схема экспериментальной установки. Справа схематичный график зависимости тока коллектора от напряжения на аноде.

Разреженный гелий заполняет трехэлектродную лампу. Электроны, испускаемые разогретым катодом, ускоряются в постоянном электрическом поле, созданном между катодом и сетчатым анодом лампы. Передвигаясь от катода к аноду электроны сталкиваются с атомами гелия. Если энергия электрона, налетающего на атом, недостаточна для того, чтобы перевести его в возбуждённое состояние, то возможны только упругие соударения, при которых электроны почти не теряют энергии, так как их масса в тысячи раз меньше массы атомов.

По мере увеличения разности потенциалов между анодом и катодом энергия электронов увеличивается и, в конце концов, оказывается достаточной для возбуждения атомов. При таких неупругих столкновениях одному из атомных электронов передаётся кинетическая энергия налетающего электрона и происходит переход атомного электрона на свободный энергетический уровень или ионизация.

Третьим электродом лампы является коллектор. Между ним и анодом поддерживается небольшое постоянное задерживающее напряжение. Ток коллектора, пропорциональный числу электронов, попадающих на него за секунду, измеряется микроамперметром.

При увеличении потенциала анода ток коллектора сначала растет, но когда энергия электронов становится достаточной для возбуждения атомов, ток коллектора резко уменьшается. Электроны при неупругих столкновениях теряют часть энергии и уже не могут преодолеть задерживающий потенциал. При дальнейшем увеличении потенциала анода, коллекторный ток возрастает. Следующее замедление роста тока происходит в момент, когда часть электронов неупруго сталкивается с атомами два раза. Таким образом, на кривой зависимости тока коллектора от напряжения анода имеется ряд максимумов и минимумов, отстоящих друг от друга на равные расстояния ΔV , которое равно энергии первого возбуждённого состояния.

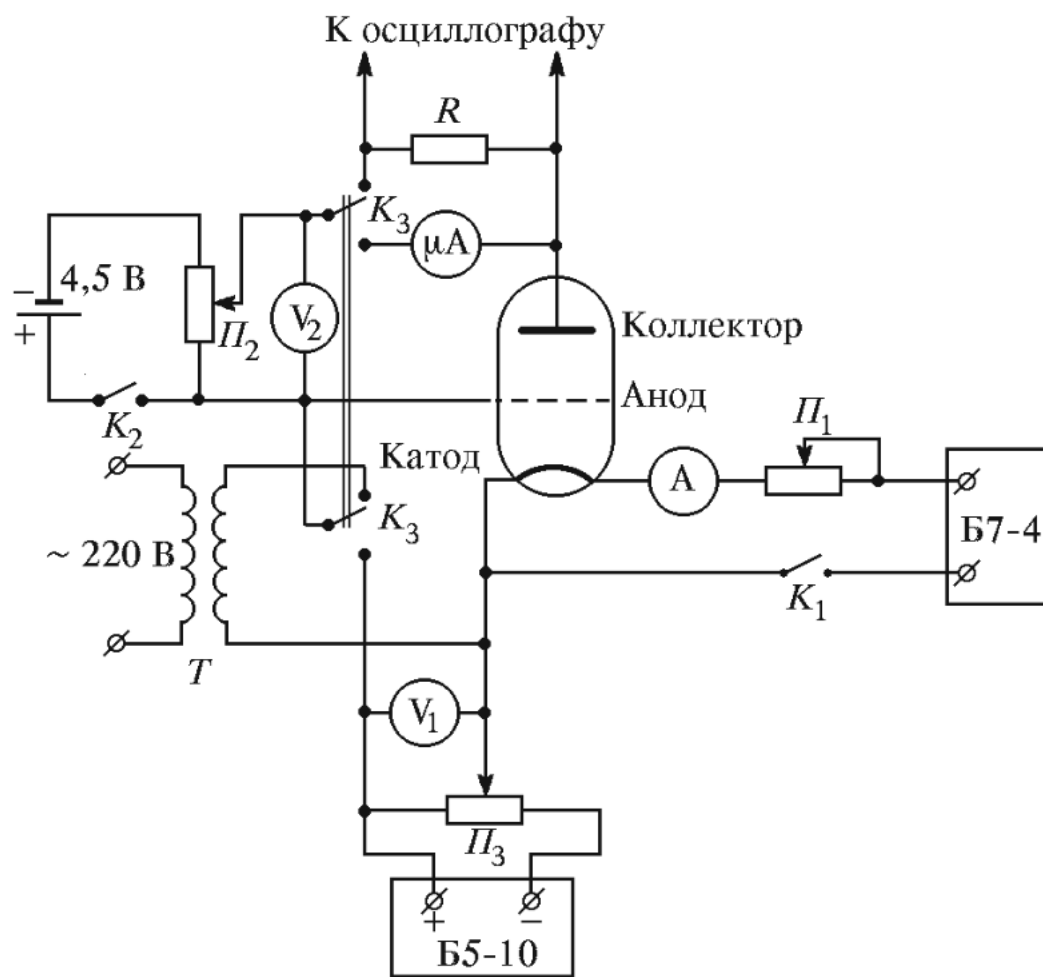


Рис. 2: Слева схема экспериментальной установки. Справа схематичный график зависимости тока коллектора от напряжения на аноде.

Оборудование и приборы

Экспериментальная установка №1.14.

1. Трехэлектродная лампа.
2. Вольтметр GDM-8145. Инвентарный номер №210104003106. Погрешность измерения $\sigma_v = \pm(0.03\%rdg + 4digits)$.
3. Микроамперметр GDM-8145. Инвентарный номер №21014000539. Погрешность измерения $\sigma_a = \pm(0.3\%rdg + 2digits)$.
4. Осциллограф GOS-620. Инвентарный номер №21014000590. Линейность по горизонтальной оси 3%.
5. Блок питания. Инвентарный номер №410134125562.

Первичные экспериментальные данные

В таблицах 1-3 приведены первичные экспериментальные данные статического метода.

Оценим погрешности первичных экспериментальных данных. Суммарная погрешность измерения тока и напряжения складывается из погрешностей приборов ($\sigma_v = \pm(0.03\%rdg + 4digits)$, $\sigma_a = \pm(0.3\%rdg + 2digits)$) и случайной погрешностью сигнала, которая определяется шумом в электрической цепи $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{приб.}}^2 + \sigma_{\text{случ.}}^2}$. Измеряемое значение напряжения флуктуировало примерно на $\pm 0.1\text{ V}$ и не зависело от величины измеряемого напряжения. Поэтому случайную погрешность измерения напряжения оценим величиной этой флуктуации: $\sigma_{\text{н.с.}} = \pm 0.01\text{ V}$. При измерении коллекторного тока микроамперметром среднеквадратичное отклонение сигнала от среднего зависело от величины измеряемого тока. Проведя серию измерений среднего значения тока и максимального отклонения измеряемого значения от среднего было установлено, что относительная случайная

погрешность измерений составляет примерно $\varepsilon_{\text{т.с.}} \approx 2\%$. Далее считаем, что относительная случайная погрешность измерения тока одинакова во всём диапазоне значений измеряемого сигнала.

Таблица 1. Статический метод. $U_{\text{зад}} = 4$ В.

$U = 4$ В			
U , В	σ_U , В	I , А	σ_I , А
0.00	0.04	0.009	0.001
1.19	0.04	0.023	0.001
2.11	0.04	0.039	0.001
3.03	0.04	0.056	0.001
4.02	0.04	0.075	0.002
5.06	0.04	0.096	0.002
6.01	0.04	0.116	0.002
7.04	0.04	0.139	0.003
8.09	0.04	0.164	0.003
8.50	0.04	0.175	0.004
9.04	0.04	0.188	0.004
9.50	0.04	0.200	0.004
9.90	0.04	0.211	0.004
10.00	0.04	0.210	0.004
10.00	0.04	0.213	0.004
10.50	0.04	0.226	0.005
11.02	0.04	0.240	0.005
11.50	0.04	0.253	0.005
12.10	0.04	0.268	0.005
13.07	0.05	0.292	0.006
14.03	0.05	0.320	0.007
15.00	0.05	0.340	0.007
15.04	0.05	0.340	0.007
16.00	0.05	0.370	0.008
17.00	0.05	0.392	0.008
18.00	0.05	0.415	0.008
19.00	0.05	0.439	0.009
20.00	0.05	0.450	0.009
20.00	0.05	0.456	0.009
21.00	0.05	0.468	0.009
22.00	0.05	0.481	0.010
23.00	0.05	0.480	0.010
24.00	0.05	0.488	0.010
24.50	0.05	0.406	0.008
25.00	0.05	0.416	0.008
25.00	0.05	0.410	0.008
26.00	0.05	0.449	0.009
27.00	0.05	0.481	0.010
28.00	0.05	0.507	0.010
30.00	0.05	0.560	0.011
30.00	0.05	0.570	0.012
33.00	0.05	0.678	0.014
34.00	0.05	0.702	0.014
35.00	0.05	0.727	0.015
36.00	0.05	0.736	0.015
37.00	0.05	0.746	0.015
38.00	0.05	0.745	0.015
39.00	0.05	0.737	0.015
40.00	0.05	0.690	0.014
43.00	0.05	0.684	0.014
44.00	0.05	0.678	0.014
45.00	0.05	0.675	0.014
46.00	0.05	0.679	0.014
47.00	0.06	0.685	0.014
50.00	0.06	0.690	0.014
55.00	0.06	0.750	0.015
60.00	0.06	0.790	0.016
70.00	0.06	0.820	0.017

Таблица 2. Статический метод. $U_{\text{зад}} = 6$ В.

$U = 6$ В			
U , В	σ_U , В	I , А	σ_I , А
0.00	0.04	0.004	0.001
5.00	0.04	0.056	0.001
10.00	0.04	0.172	0.004
15.00	0.05	0.305	0.006
20.00	0.05	0.428	0.009
21.00	0.05	0.448	0.009
22.00	0.05	0.464	0.009
23.00	0.05	0.473	0.010
24.00	0.05	0.476	0.010
25.00	0.05	0.300	0.006
26.00	0.05	0.289	0.006
27.00	0.05	0.314	0.006
28.00	0.05	0.349	0.007
30.00	0.05	0.420	0.009
32.00	0.05	0.492	0.010
35.00	0.05	0.579	0.012
36.00	0.05	0.588	0.012
37.00	0.05	0.594	0.012
38.00	0.05	0.601	0.012
39.00	0.05	0.598	0.012
40.00	0.05	0.587	0.012
42.00	0.05	0.558	0.011
45.00	0.05	0.523	0.011
46.00	0.05	0.516	0.010
47.00	0.06	0.513	0.010
48.00	0.06	0.513	0.010
49.00	0.06	0.518	0.011
50.00	0.06	0.526	0.011
55.00	0.06	0.570	0.012
60.00	0.06	0.613	0.012
65.00	0.06	0.622	0.013
70.00	0.06	0.618	0.013

Таблица 3. Статический метод. $U_{\text{зад}} = 8 \text{ В}$.

$U = 8 \text{ В}$			
$U, \text{ В}$	$\sigma_U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$\sigma_I, \text{ А}$
0.00	0.04	0.004	0.001
5.00	0.04	0.022	0.001
10.00	0.04	0.125	0.003
15.00	0.05	0.255	0.005
20.00	0.05	0.384	0.008
22.00	0.05	0.422	0.009
23.00	0.05	0.433	0.009
24.00	0.05	0.444	0.009
25.00	0.05	0.443	0.009
25.50	0.05	0.200	0.004
26.00	0.05	0.188	0.004
27.00	0.05	0.188	0.004
28.00	0.05	0.199	0.004
29.00	0.05	0.225	0.005
30.00	0.05	0.266	0.005
31.00	0.05	0.305	0.006
35.00	0.05	0.437	0.009
37.00	0.05	0.468	0.009
38.00	0.05	0.476	0.010
39.00	0.05	0.477	0.010
40.00	0.05	0.468	0.009
45.00	0.05	0.405	0.008
48.00	0.06	0.372	0.008
49.00	0.06	0.367	0.007
50.00	0.06	0.366	0.007
51.00	0.06	0.369	0.007
52.00	0.06	0.373	0.008
55.00	0.06	0.398	0.008
60.00	0.06	0.434	0.009
65.00	0.06	0.439	0.009
70.00	0.06	0.428	0.009

В таблице 4 приведены первичные экспериментальные данные динамического метода. Первые 4 строки соответствуют измерению по верхней кривой, а следующие 4 точки – по нижней; на рисунке 3 подписаны номера соответствующих точек. Погрешность измерения напряжения определяется погрешностью осциллографа $\varepsilon_{\text{приб}} = 3\%$ и погрешностью определения положения максимума. Данные с осциллографа оцифровывались для увеличения точности измерения и удобства обработки измеренных данных: делалась фотография измеряемого сигнала так чтобы плоскость камеры была параллельная плоскости экрана осциллографа и изображение было четким (камера сфокусирована на экране осциллографа), затем координаты максимумов измерялись в пикселях на компьютере и переводились в соответствие со шкалой прибора, отградуированной в пикселях. При этом возникает дополнительная погрешность, связанная с конечным разрешением камеры и её позиционированием в пространстве, но она мала по сравнению с погрешностью определения максимума сигнала. Погрешность определения положения максимума сигнала оценим как полуширину наблюдаемой на экране осциллографа линии, которая была настроена максимально тонкой и яркой при измерениях. Полуширина линии сигнала составляет 8 пикселей, когда погрешность, связанная с конечным разрешением камеры составляет ~ 0.5 пикселя. Тогда погрешность снятия показаний с осциллографа $\sigma_{\text{цифр}} = \sqrt{8^2 + 0.5^2} \approx 8$ пикселя, что соответствует $\sigma_{\text{цифр}} = 0.35 \text{ В}$. Общая погрешность $\sigma_{\text{осц}} = \sqrt{\sigma_{\text{цифр}}^2 + (V \cdot \varepsilon_{\text{приб}})^2}$.

Таблица 4. Динамический метод.

$U = 4 \text{ В}$		$U = 6 \text{ В}$		$U = 8 \text{ В}$	
$x_i, \text{ В}$	$\sigma_{x_i}, \text{ В}$	$x_i, \text{ В}$	$\sigma_{x_i}, \text{ В}$	$x_i, \text{ В}$	$\sigma_{x_i}, \text{ В}$
-20.1	0.7	-21.8	0.7	-23.8	0.8
-14.5	0.6	-14.8	0.6	-15.2	0.6
-1.8	0.4	-3.2	0.4	-4.3	0.4
0.1	0.4	-0.3	0.4	-0.6	0.4
-20.4	0.7	-22.0	0.7	-23.4	0.8
-14.2	0.6	-14.4	0.6	-15.3	0.6
-3.2	0.4	-4.3	0.4	-5.1	0.4
0.1	0.4	-0.6	0.4	-1.8	0.4

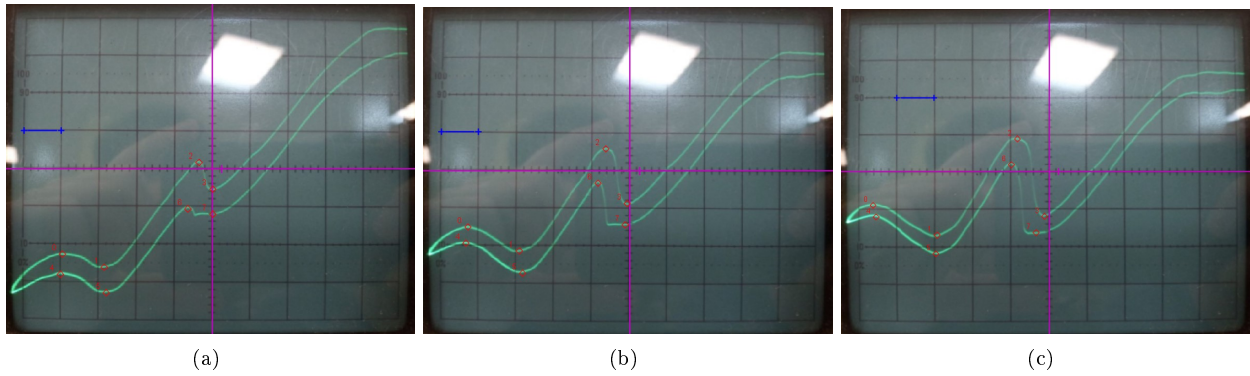


Рис. 3: (a) $U = 4$ В (b) $U = 6$ В (c) $U = 8$ В

Обработка экспериментальных данных

Динамический метод

По координатам максимумов и минимумов определим энергию первого возбужденного уровня гелия.

Таблица 4. Динамический метод.

$\Delta V_{max}^{(1)}$, В	$\sigma_{\Delta V_{max}^{(1)}}$, В	$\Delta V_{min}^{(1)}$, В	$\sigma_{\Delta V_{min}^{(1)}}$, В	$\Delta V_{max}^{(2)}$, В	$\sigma_{\Delta V_{max}^{(2)}}$, В	$\Delta V_{min}^{(2)}$, В	$\sigma_{\Delta V_{min}^{(2)}}$, В
18.3	0.8	14.6	0.7	17.1	0.8	14.3	0.7
18.6	0.8	14.5	0.7	17.7	0.8	13.8	0.7
19.5	0.9	14.6	0.7	18.3	0.9	13.6	0.7

Погрешность ΔV оценим суммой погрешностей отсчета и определения пика. Вторая ошибка варьируется в зависимости от ширины пика. Тогда полная погрешность разности $\sigma_{\Delta V} = \sqrt{\sigma_{V_1}^2 + \sigma_{V_2}^2}$.

Определим среднее значение энергии первого возбужденного уровня гелия $E = 16 \pm 2$ эВ. Погрешность результата оценим по формуле $\sigma_E = \sqrt{\sigma_{E_{сл}}^2 + \overline{\sigma_{E_i}^2}}$. $\sigma_{E_{сл}} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_i \frac{(E_i - E_i)^2}{N}}$.

Статический метод

Построим график зависимости коллекторного тока от потенциала анода.

Определим разности между соседними максимумами и минимумами:

$U_{зад}$, В	ΔV_{min} , В	ΔV_{max} , В
4	23.0 ± 1.4	14.5 ± 1.4
6	21.5 ± 1.4	14.0 ± 1.4
8	19.5 ± 1.4	13.5 ± 1.4

Погрешность измерения ΔV оценим следующим образом. Точки брались дискретно с шагом 1 В. Сделать шаг меньше в эксперименте не было возможности, так как ручка регулировки напряжения была очень чувствительной. Если на определённом шаге следующее измеренное значение V_2 было меньше текущего V_1 , то это означает о наличии скачка тока на графике $I(V)$. При этом максимум точно находится между V_1 и V_2 . Считаем, что так как не известна информация о математической формуле кривой $I(V)$ и нет возможности провести аппроксимацию (аппроксимация полиномом даст плохой результат, так как на график $I(V)$ не является гладким из-за скачка тока после первого максимума), то пусть вероятность нахождения максимума справа от точки V_1 подчиняется гауссовому распределению. Тогда с вероятностью $\approx 98\%$ максимум находится в интервале $3\sigma = 1$ В. Тогда погрешность $\sigma(\Delta V) = \sqrt{2}\sigma_V \approx 0.5$ В.

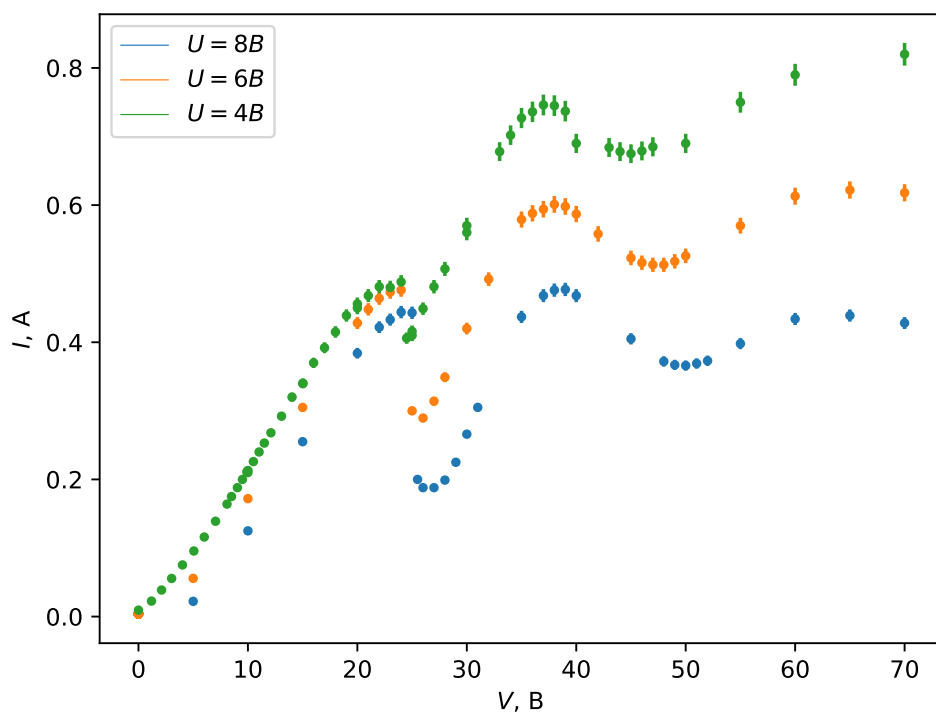
На графиках видна интересная особенность: резкий спад, приводящий к практически полному совпадению первых максимумов и минимумов. Именно этот скачок приводит к сильному возрастанию ошибки.

Определим среднее значение энергии первого возбужденного состояния атома гелия $E = (18 \pm 4)$ эВ.

Обсуждение результатов и выводы

В эксперименте можно наблюдать большую погрешность из-за существенно разных расстояний между соседними минимумами и максимумами.

В работе была определена энергия первого возбужденного состояния атома гелия статическим методом $E = (18 \pm 4)$ эВ.



Была определена энергия первого возбужденного состояния атома гелия динамическим методом $E = 16 \pm 2$ эВ.

Согласно табличным данным энергия, необходимая для перехода атома гелия из основного состояния в первое возбужденное, равна (19.8 ± 0.1) эВ.