

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Опыт Франка-Герца

выполнили студенты Б01-108а

Калинин Даниил и Мельникова Юлия

Долгопрудный, 2023 г.

1 Цель работы

Методом электронного возбуждения измерить энергию первого уровня атома гелия в динамическом и статическом режимах

2 В работе используются:

- трёхэлектродная лампа ЛМ-2
- батарея 4,5 В
- микроамперметр
- понижающий трансформатор
- осциллограф
- блок источников питания
- вольтметр В7-22А

3 Теоретические положения

Опыт Франка-Герца подтверждает существование дискретных уровней энергии атомов. Разреженный одноатомный газ заполняет трёхэлектродную 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.

- энергия электрона недостаточна, чтобы возбудить/ионизировать атом -> *упругое столкновение*, электрон не теряет энергию
- при большой разности потенциалов энергия электрона достаточна для возбуждения атомов -> *неупругое столкновение*, кинетическая энергия передаётся одному из атомных электронов, в результате чего происходит:
 - **возбуждение** - переход одного из атомных электронов на свободный энергетический уровень
 - **ионизация** - отрыв электрона от атома

Объясним вид зависимости тока коллектора (измеряется микроамперметром) от напряжения на аноде. При увеличении потенциала анода ток в лампе сначала растёт (зависимость, подобная ВАХ вакуумного диода). Когда энергия электронов становится достаточной для возбуждения атомов, ток коллектора резко уменьшается. Это происходит потому, что при неупругих соударениях с атомами электроны теряют свою энергию и не могут преодолеть задерживающее напряжение (около 1 В) между анодом и коллектором. При дальнейшем увеличении потенциала ток коллектора вновь возрастает: электроны, испытавшие неупругие соударения, при дальнейшем движении к аноду успевают набрать энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала. 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, равные энергии первого возбуждённого состояния.

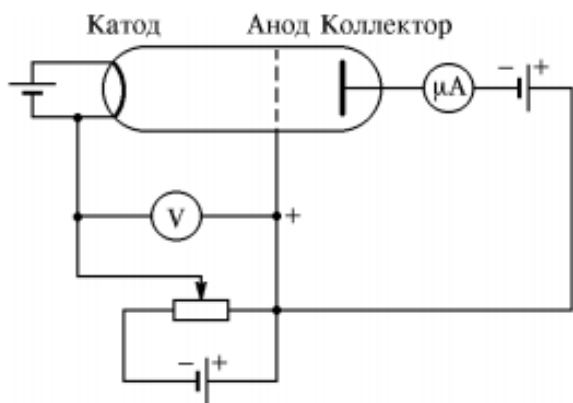


Рис. 1. Схема опыта Франка и Герца

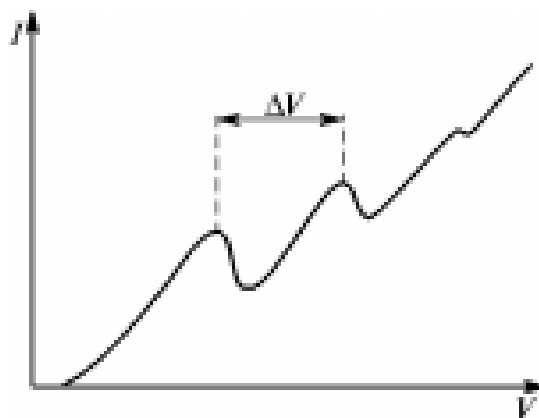


Рис. 2. Схематический вид зависимости тока коллектора от напряжения на аноде

4 Экспериментальная установка

На рис.3 обозначены:

- А - амперметр
- Б7-4 - стабилизированный источник питания (подаёт напряжение накала)
- K_1 - тумблер для включения в цепь источника Б7-4
- Б5-10 - выпрямитель (подаёт на анод ускоряющее напряжение)
- Pi_3 - потенциометр, регулирующий величину ускоряющего напряжения
- V_1 - вольтметр, измеряющий величину ускоряющего напряжения
- 4,5 В - батарея КБСЛ - источник задерживающего потенциала
- Pi_2 - потенциометр, регулирующий величину задерживающего потенциала
- V_2 - вольтметр, измеряющий величину задерживающего потенциала
- μA - микроамперметр - регистрирует ток в цепи коллектора
- K_3 - ключ, переключающий схему из статического режима в динамический
- Т - понижающий трансформатор - подаёт ускоряющий потенциал при динамическом режиме
- - нагрузочный резистор

5 Выполнение работы

5.1 Получение вольт-амперной характеристики $I_k = f(V_a)$ на экране осциллографа С1-38 (динамический метод)

1. Подготовим приборы к работе, поставим переключатель режима в положение "Динамич."

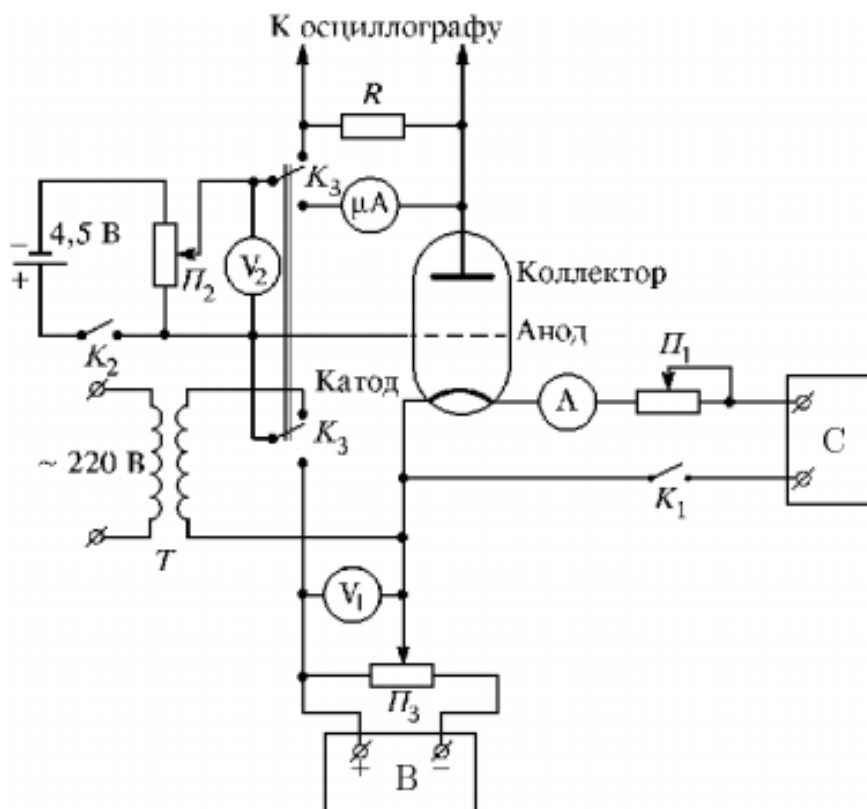


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

2. Добьёмся с помощью регуляторов на осциллографе чёткой картины на экране
3. При максимальном ускоряющем напряжении измерим на экране расстояние между максимумами и между минимумами осциллограммы. Измерения проведём при трёх значениях задерживающего напряжения: 4, 6 и 8 В. Результаты измерений занесём в таблицу 1. Фотографии полученных осциллограмм приведём на рисунках 4-6.

Таблица 1. Максимумы и минимумы напряжения на осциллограммах

Задерж. напряже- ние	V_{max1}	V_{max2}	V_{min1}	V_{min2}	Погрешность	ΔV_{max}	ΔV_{min}
4 В	0 В	13 В	2 В	19 В	1 В	13 В	17 В
6 В	-4 В	10 В	0 В	17,5 В	1 В	14 В	17,5 В
8 В	-4 В	10 В	0 В	18 В	2 В	14 В	18 В

4. Определим значение энергии первого возбуждённого состояния атома гелия.

$$\overline{V_{max}} = 13.7 \pm 2.5 \text{ В} \quad \overline{V_{min}} = 17.5 \pm 2.5 \text{ В}$$

Погрешности определения средних значений определим, используя формулу

$$\sigma_{V_1^2} = \sigma_{V_4^2} + \sigma_{V_6^2} + \sigma_{V_8^2} - \text{погрешность прибора}$$

$$\sigma_{V_2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (V_i - \bar{V})^2} - \text{погрешность среднего значения}$$

$$\sigma_{V_1} = 2.5 \text{ В} \quad \sigma_{V_{max2}} = 0.5 \text{ В} \quad \sigma_{V_{min2}} = 0.4 \text{ В}$$

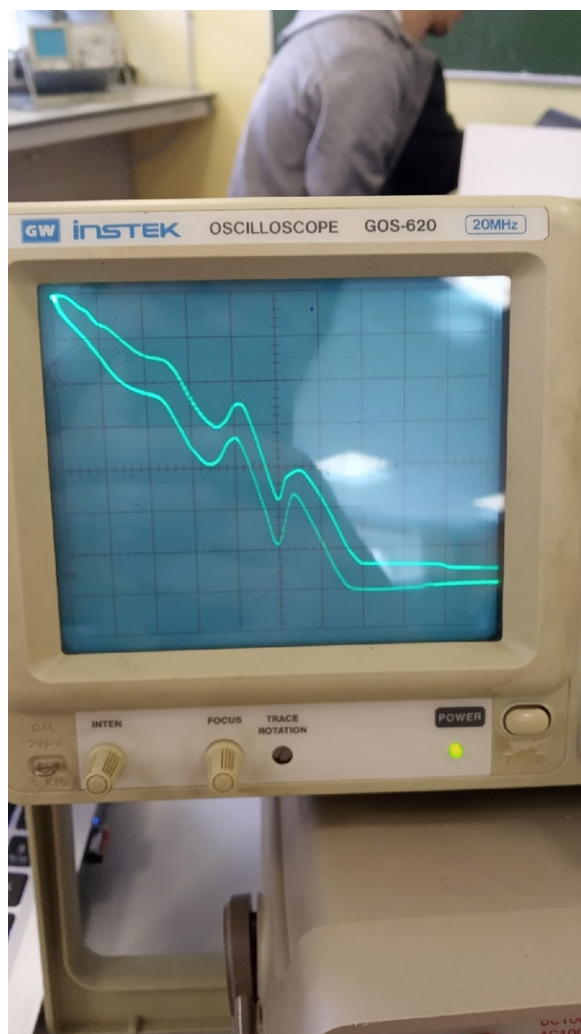


Рис. 4. Осциллограмма при задерживающем напряжении 4 В

Среднее значение первого возбуждённого состояния атома гелия по результатам эксперимента:

$$V_{exp} = 15.6 \pm 3.4 \text{ эВ (относительная погрешность составляет 24\%)}$$

При этом табличное значение данной величины составляет

$$V_{th} = 21.6 \text{ эВ}$$

С учётом погрешности, экспериментальные данные близки к теоретическим.

5.2 Получение вольт-амперной характеристики $I_k = f(V_a)$ в статическом режиме измерений

1. Переведём переключатель режима в положение «Статич.», установим максимальный ток накала
2. Снимем зависимость коллекторного тока от анодного напряжения $I_k = f(V_a)$ для значений задерживающего напряжения 4, 6 и 8 В. Результаты измерений занесём в таблицы 2-4

Таблица 2. Значения коллекторного тока и анодного напряжения, задерживающее напряжение 4 В

I, мА	0.0018	0.0625	0.0933	0.1043	0.1103	0.1077	0.720	0.0652	0.0682	0.0948	0.1191
U, В	0.04	10.00	15.04	17.00	18.85	20.02	22.79	23.69	24.44	27.08	29.41
I, мА	0.1842	0.1760	0.1595	0.1607	0.2380	0.2861					
U, В	37.65	40.03	43.65	45.57	60.64	80.11					

Таблица 3. Значения коллекторного тока и анодного напряжения, задерживающее напряжение 6 В

I, мА	-0.008	0.0530	0.0849	0.1043	0.1000	0.0578	0.0368	0.0515	0.1414	0.1520	0.1386
U, В	0.04	10.03	15.02	19.34	21.00	22.98	25.15	27.01	35.13	38.63	41.02
I, мА	0.1170	0.1245	0.1766	0.1798	0.1793	0.1791	0.2010				
U, В	46.93	50.03	60.02	64.26	66.04	68.69	80.34				

- Представим графики вольт-амперных характеристик трёхэлектродной лампы при разных задерживающих напряжениях на рис. 7
- Определим по результатам измерений энергию первого возбуждения атома гелия. Воспользуемся принципом, описанным в 5.1. и занесём максимальные и минимальные значения напряжения в таблицу 5.
- Определим значение потенциала возбуждения атома гелия, оно соответствует расстоянию между экстремумами одного типа

$$\overline{V_{max}} = 14.93 \pm 1.92 \text{ В} \quad \overline{V_{min}} = 24.07 \pm 1.80 \text{ В}$$

Погрешности определения средних значений определим, используя формулу

$$\begin{aligned} \sigma_{V_1^2} &= \sigma_{V_4^2} + \sigma_{V_6^2} + \sigma_{V_8^2} - \text{погрешность прибора} \\ \sigma_{V_2} &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum (V_i - \bar{V})^2} - \text{погрешность среднего значения} \\ \sigma_{V_1} &= 1.73 \text{ В} \quad \sigma_{V_{max_2}} = 0.83 \text{ В} \quad \sigma_{V_{min_2}} = 0.48 \text{ В} \end{aligned}$$

Среднее значение первого возбуждённого состояния атома гелия по результатам эксперимента:

$$V_{exp} = 19.5 \pm 3.4 \text{ эВ (относительная погрешность составляет 18\%)}$$

При этом табличное значение данной величины составляет

$$V_{th} = 19.8 \text{ эВ}$$

С учётом погрешности, экспериментальные данные близки к теоретическим.

Таблица 4. Значения коллекторного тока и анодного напряжения, задерживающее напряжение 8 В

I, мА	-0.008	0.0400	0.0719	0.0965	0.0897	0.0180	0.0152	0.0495	0.1184	0.1209	0.1077
U, В	0.04	10.00	14.73	19.67	22.15	24.98	25.93	29.98	36.68	39.21	41.35
I, мА	0.0791	0.0780	0.0878	0.1253	0.1222	0.1184	0.1263				
U, В	47.62	49.08	52.87	63.49	67.52	71.84	80.33				

Таблица 5. Максимумы и минимумы напряжения на осциллограммах

Задерж. напряже- ние	V_{max_1}	V_{max_2}	V_{min_1}	V_{min_2}	Погрешность	ΔV_{max}	ΔV_{min}
4 В	23.76 В	39.26 В	25.41 В	49.34 В	1 В	15.5 В	23.93 В
6 В	23.82 В	36.68 В	24.78 В	48.29 В	1 В	12.86 В	23.51 В
8 В	25.33 В	38.75 В	25.62 В	50.40 В	1 В	13.42 В	24.78 В

6 Вывод

В ходе работы был воспроизведён опыт Франка-Герца, подтверждающий наличие дискретных уровней возбуждения атомов. Вольт-амперная характеристика трёхэлектродной вакуумной лампы была измерена двумя способами - динамическим и статическим. По этим ВАХ были экспериментально определены потенциалы возбуждения атомов гелия (одноатомный газ, заполняющий лампу).

$$\begin{aligned}
 V_{exp_d} &= 15.6 \pm 3.4 \text{ эВ} \\
 V_{exp_s} &= 19.5 \pm 3.4 \text{ эВ} \\
 V_{th} &= 19.8 \text{ эВ}
 \end{aligned}$$

Видим, что результаты совпадают по порядку величины, также значение потенциала возбуждения атома гелия в пределах погрешности совпадает с табличным значением. Статический метод оказался более точным, чем динамический.

Стоит отметить, что при наличии более совершенной установки можно выполнить более точные измерения ВАХ, тем самым определив потенциалы возбуждения других дискретных уровней, а также потенциалы ионизации.

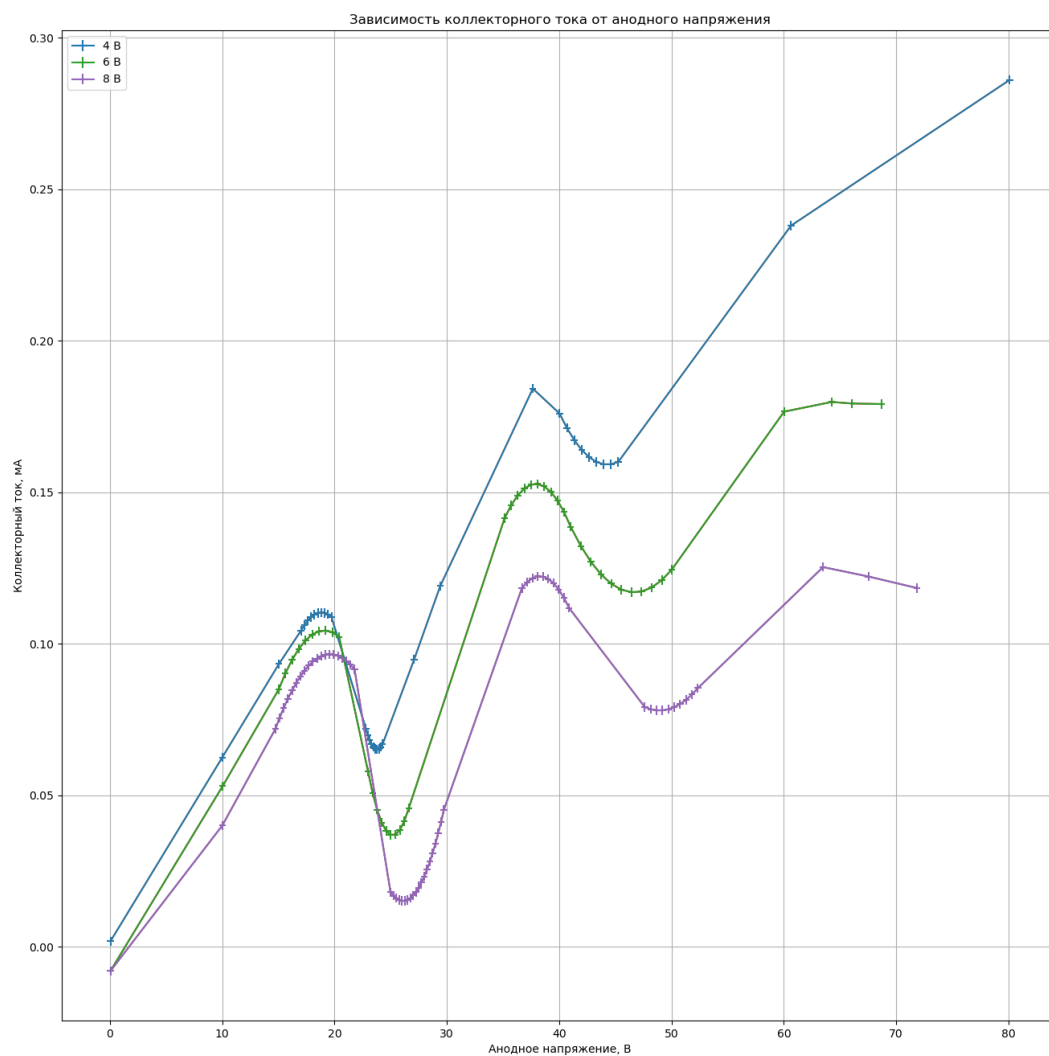


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики трёхэлектродной вакуумной лампы при разных значениях запирающего напряжения