

# **Лабораторная работа**

## **Эффект Рамзауэра - рассеяние медленных электронов на атомах**

Цель работы: получить ВАХ эффекта на экране ЭО, измерить расстояния между характерными точками в вольтах; снять ВАХ в статическом режиме; по результатам измерений рассчитать размер электронной оболочки атома, оценить глубину потенциальной ямы и потенциал ионизации газа, заполняющего лампу.

### **Теоретические сведения**

Эффективное сечение реакции --- это величина, характеризующая вероятность перехода системы двух сталкивающихся частиц в результате их рассеяния (упругого или неупругого) в определенное конечное состояние. Сечение  $\sigma$  это отношение числа таких переходов  $N$  в единицу времени к плотности потока  $nv$  рассеиваемых частиц, падающих на мишень, т.е. к числу частиц, попадающих в единицу времени на единичную площадку, перпендикулярную к их скорости.

$$\sigma = \frac{N}{nv}$$

Эффект Рамзауэра нельзя объяснить с позиций классической теории. С квантовой же точки зрения картина рассеяния выглядит следующим образом. Внутри атома потенциальная энергия налетающего электрона отлична от нуля, скорость электрона меняется, становясь равной  $v'$  в соответствии с законом сохранения энергии:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv'^2}{2} + U$$

а значит, изменяется и длина его волны де Броиля. Таким образом, по отношению к электронной волне атом ведет себя как преломляющая среда с относительным показателем преломления:

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'} = \sqrt{1 - \frac{U}{E}}$$

Решение задачи о рассеянии электрона на сферическом потенциале достаточно громоздко. Поэтому рассмотрим более простое одномерное приближение: электрон рассеивается на потенциальной яме конечной глубины. Уравнение Шрёдингера в этом случае имеет вид:

$$\psi'' + k^2\psi = 0 \quad k^2 = \begin{cases} k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} \\ k_2 = \frac{2m(E+U_0)}{\hbar^2} \end{cases}$$

Коэффициент прохождения равен отношению квадратов амплитуд прошедшей и падающей волн и определяется выражением:

$$D = \frac{16k_1^2 k_2^2}{16k_1^2 k_2^2 + 4(k_1^2 - k_2^2)^2 \sin^2(k_2 l)}$$

Видно, что коэффициент прохождения частицы над ямой, в зависимости от её энергии, имеет вид чередующихся максимумов и минимумов. В частности, если  $k_2 l = \pi$ , то коэффициент прохождения равен 1, т.е. отраженная волна отсутствует, и электрон беспрепятственно проходит через атом. Этот эффект является квантовым аналогом просветления оптики. Таким образом, коэффициент прохождения электронов максимален при условии:

$$k_2 l = \sqrt{\frac{2m(E+U_0)}{\hbar^2}} l = \pi n$$

Прошедшая волна 1 усилится волной 2, если геометрическая разность хода между ними  $\Delta = 2l = \lambda'$ , что соответствует условию первого интерференционного максимума, т.е.

$$2l = \frac{\hbar}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}}$$

С другой стороны, прошедшая волна ослабится, если  $2l = \frac{3}{2}\lambda'$ , т.е.

$$2l = \frac{3}{2} \frac{\hbar}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}}$$

Решая эти уравнения совместно можно исключить  $U_0$  и найти эффективный размер атома  $l$ :

$$l = \frac{\hbar\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}$$

Понятно, что энергии  $E_1$ ,  $E_2$  соответствуют энергиям электронов, прошедших разность потенциалов  $V_1$  и  $V_2$ . Кроме того, можно оценить эффективную глубину потенциальной ямы атома:

$$U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1$$

Теперь рассмотрим ВАХ тиратрона. Она имеет вид:

$$I_a = I_0 e^{-C\omega(V)}, C = L n_a \Delta_a$$

где  $I_0 = eN_0$  --- ток катода,  $I_a = eN_a$  --- анодный ток,  $\Delta_a$  --- площадь поперечного сечения атома,  $n_a$  --- концентрация атомов газа в лампе,  $L$  --- расстояние от катода до анода,  $\omega(V)$  --- вероятность рассеяния электрона на атоме как функция от ускоряющего напряжения. По измеренной ВАХ тиратрона можно определить зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии из соотношения:

$$\omega(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a}{I_0}$$

## Экспериментальная установка

В нашей работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом. Схематическое изображение тиратрона и его конструкция приведены на рис. 6.

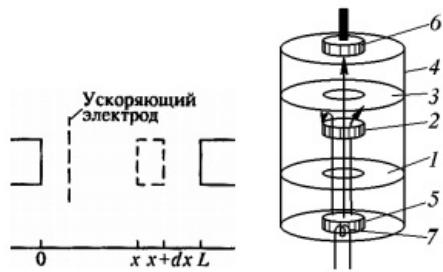


Рис. 6. Схема тиатрона (слева) и его конструкция (справа): 1, 2, 3 — сетки, 4 — внешний металлический цилиндр, 5 — катод, 6 — анод, 7 — накаливаемая спираль

Принципиальная схема установки для изучения эффекта Рамзауэра приведена на рис.8

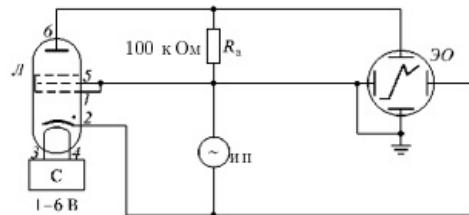


Рис. 8. Схема включения тиатрона

Блок схема экспериментальной установки изображена на рис. 9

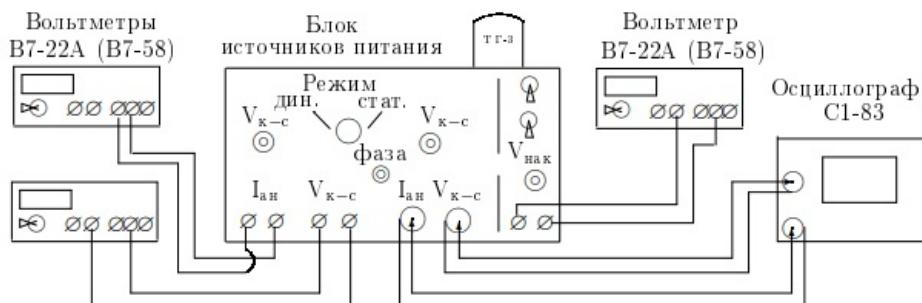
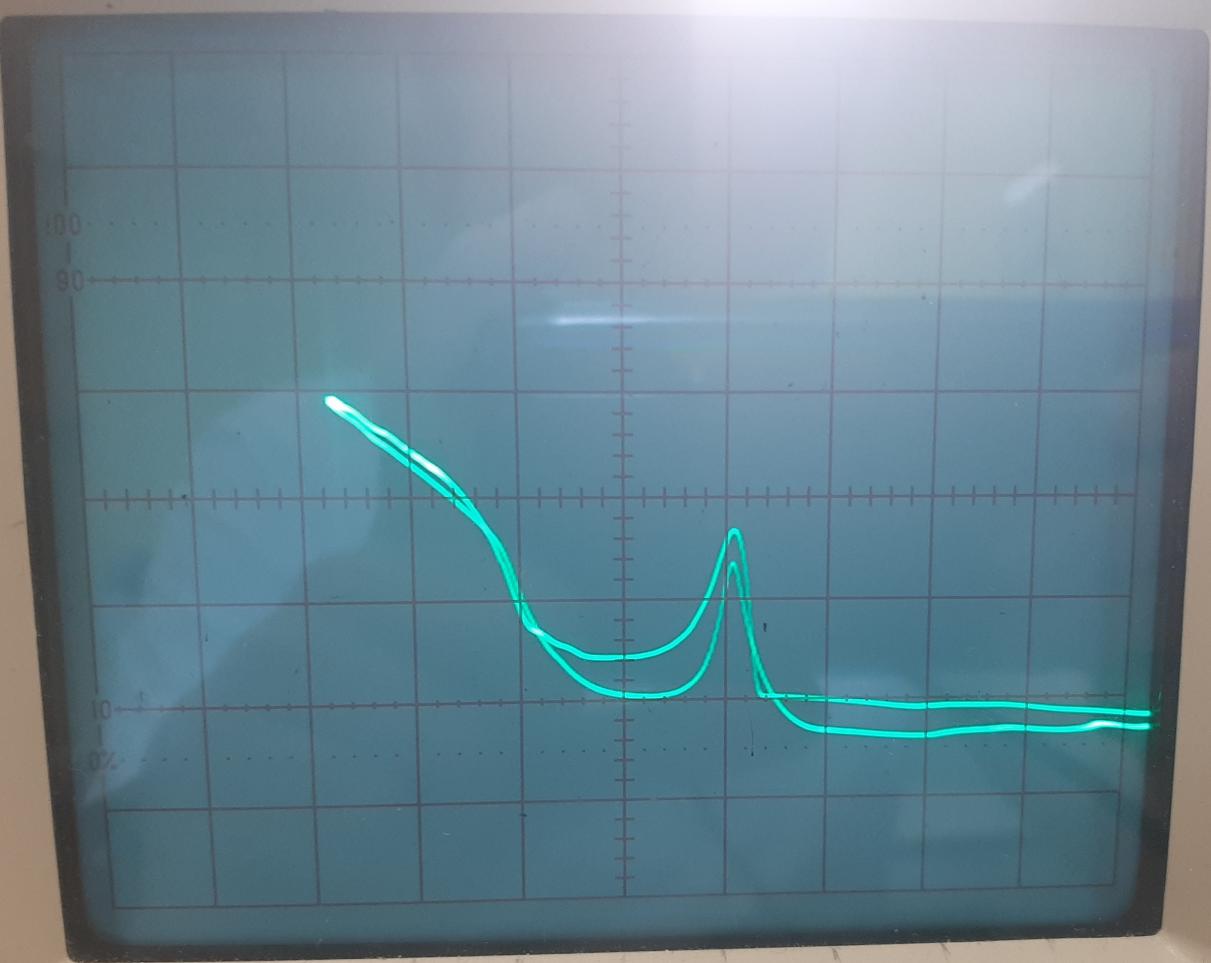


Рис. 9. Блок-схема экспериментальной установки

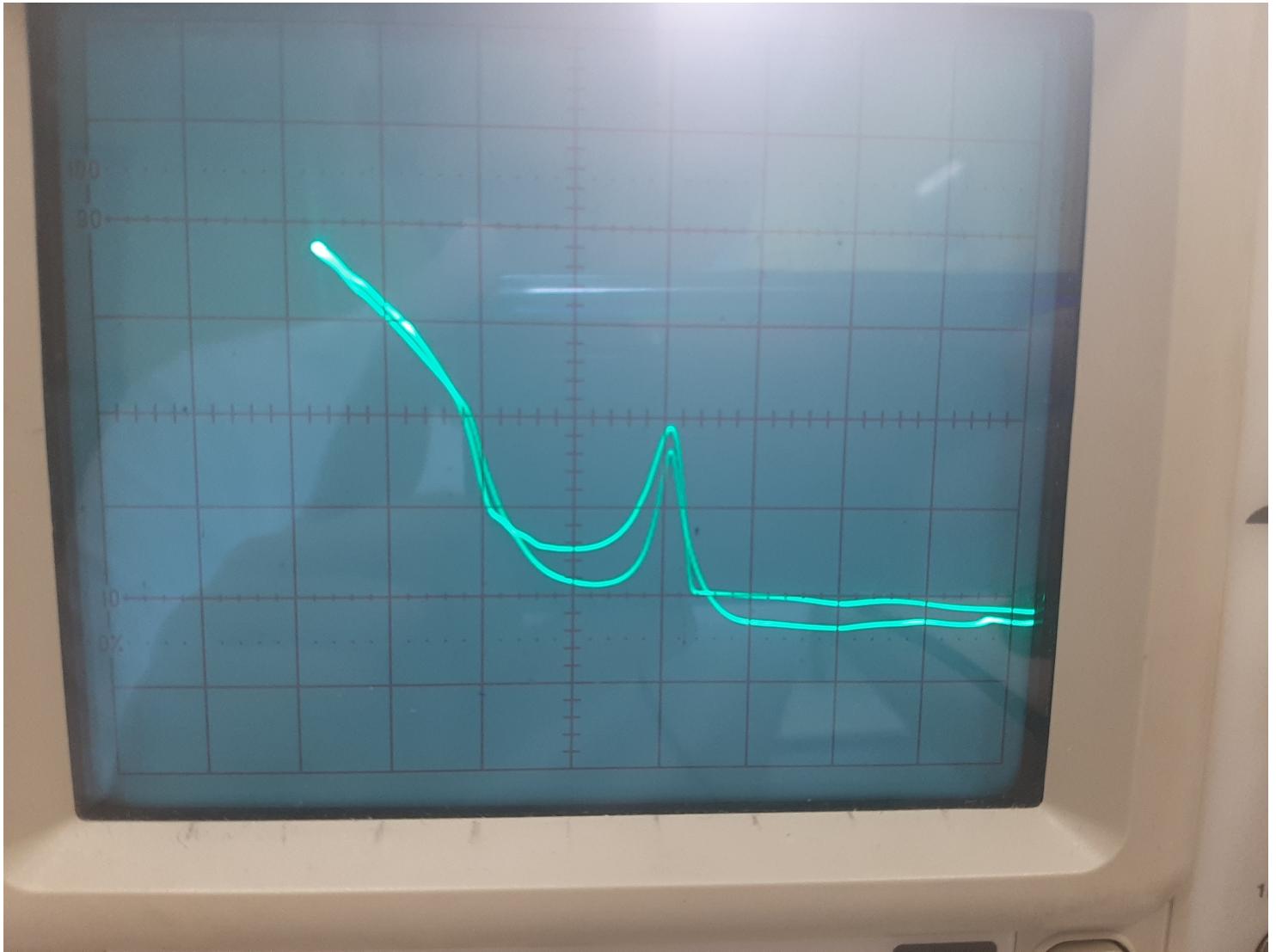
## Ход работы

1. Подготовили приборы к работе. Переключили установку в динамический режим. Установили напряжение накала в диапазоне 2,5 - 3 В, сняли ВАХ тиатрона при двух значениях напряжения накала (ускоряющее напряжение максимально)

ВАХ при напряжении накала 2,5 В; ось X - 5В/дел, ось Y - 50 мВ/дел



BAX при напряжении накала 2,66 В; ось X - 5В/дел, ось Y - 50 мВ/дел



При максимальном ускоряющем напряжении, измеряем напряжения между катодом и сеткой, соответствующие первому максимуму и минимуму на осциллограмме, оцениваем значение пробоя (для каждой ВАХ)

Для напряжения накала 2,5 В:  $V_{max} = 1.5$  В,  $V_{min} = 6$  В,  $V_b = 12$  В

Для напряжения накала 2,66 В:  $V_{max} = 1.5$  В,  $V_{min} = 7$  В,  $V_b = 12$  В

2. Переключили установку в статический режим. Проводим измерение ВАХ тиратрона для двух значений напряжения (2,5 В; 2,66 В), заносим данные в таблицу.

In [1]:

```
import numpy as np
import pandas as pd
from matplotlib import pyplot as plt
```

In [2]:

```
table = pd.read_csv(''C:\\\\Users\\\\Nikeyson-PC\\\\Desktop\\\\Laba1-3\\\\Lab_1_3.csv''', sep=';')
```

In [3]:

```
table
```

Out[3]:

	U250	I250	U266	I266
0	0	0,11	0	0,11
1	0,474	0,11	0,337	0,11
2	0,611	0,19	0,469	0,14
3	0,67	0,3	0,541	0,2
4	0,718	0,49	0,72	1,07
5	0,813	1,38	0,866	5,12
6	1,008	9,92	1,076	27,05
7	1,118	31,62	1,281	68,52
8	1,239	41,55	1,384	92,81
9	1,318	56,1	1,5	118,91
10	1,527	95,8	1,627	143,52
11	1,731	120,08	1,791	163,69
12	1,819	123,65	1,956	169,54
13	1,86	125,2	2,073	166,67
14	1,939	125,29	2,163	162,01
15	2,08	116,85	2,278	154,42
16	2,258	102,34	2,4	145,61
17	2,517	82,85	2,639	130,13
18	2,766	65,23	2,818	119,47
19	2,919	57,3	3,019	109,11
20	3,015	53,12	3,296	96,59
21	3,208	46,91	3,479	89,95
22	3,431	43,8	3,728	80,8
23	4,066	32,23	4,11	70,34
24	4,284	29,84	4,428	64,01
25	4,566	27,3	4,872	57,11
26	5,075	24,41	5,291	52,53
27	5,54	22,43	5,758	49,21
28	6,1	21,6	6,343	46,8
29	7,22	21,51	6,683	45,9
30	8,263	23,6	7,014	45,79
31	9,336	27,62	7,411	46,9
32	6,333	22,34	7,653	47,9
33	6,64	22,12	8,091	50,19
34	7,2	21,5	8,344	51,72
35	7,47	21,6	8,8	54,3
36	7,79	22	9,164	58,36
37	10,3	36,83	9,61	63,62
38	11,03	40,9	10,097	77,54
39	7,5	33,7	NaN	NaN
40	7,9	31	NaN	NaN
41	8,2	30,5	NaN	NaN
42	8,8	32,5	NaN	NaN
43	9,663	37,6	NaN	NaN
44	10,123	45,73	NaN	NaN
45	11,22	54,52	NaN	NaN

3. Расчитываем размер электронной оболочки атома инертного газа, заполняющего лампу.

In [15]:

```
h = 6.626 * (10**-34)
l1 = (h*(5**0.5)/((32*9.1*(10**-31)*1.6*(10**-19)*(6.63-1.79))**0.5))*(10**10)
print("l1 = ", l1, "A")
l2 = ((h/((2*9.1*(10**-31)*1.6*(10**-19)*(1.79+2.5))**0.5))/2)*(10**10)
print("l2 = ", l2, "A")

l1 = 3.12002501663159 A
l2 = 2.964129027932821 A
```

4. Оцениваем глубину потенциальной ямы

In [5]:

```
u0 = (4/5)*6 - (9/5)*1.5
print("U0 = ", u0, "eV")
```

U0 = 2.1000000000000005 eV

5. Оцениваем потенциал ионизации инертного газа по напряжению пробоя, из того что оно равно 12В, газ в тиаратроне - ксенон

6. Строим график  $I_a = f(V_c)$  для статического режима

In [6]:

```
x1 = np.array(table.iloc[:, 0].str.replace(',', '.').astype(float))
y1 = np.array(table.iloc[:, 1].str.replace(',', '.').astype(float))
```

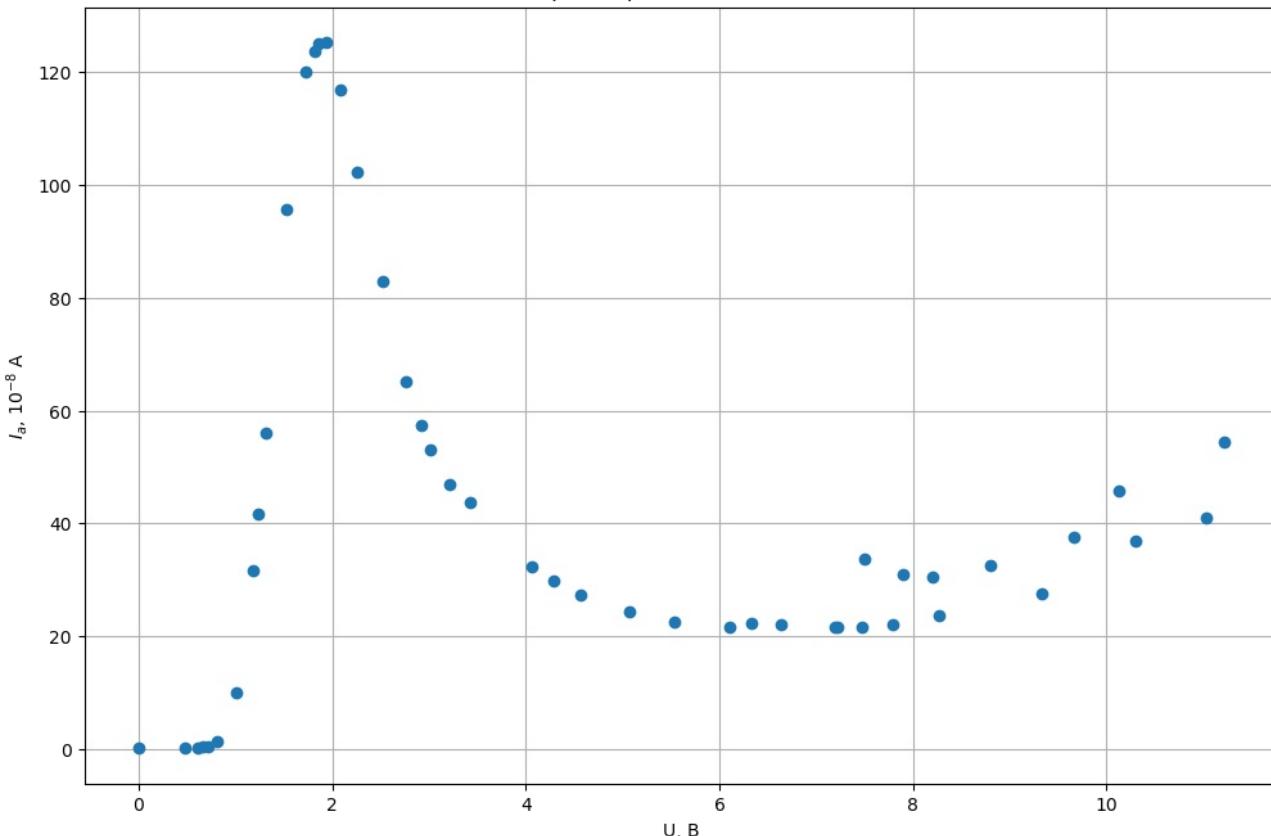
In [7]:

```
x2 = np.array(table.iloc[:39, 2].str.replace(',', '.').astype(float))
y2 = np.array(table.iloc[:39, 3].str.replace(',', '.').astype(float))
```

In [8]:

```
fig = plt.figure(figsize= (12, 8), dpi= 100)
ax1 = fig.add_subplot()
ax1.plot(x1, y1, 'o', label= "Всё")
ax1.grid(True)
plt.xlabel("U, В")
plt.ylabel("$I_a$, $10^{-8}$ A")
plt.title("BAX при напряжении накала 2,5 В")
plt.show()
```

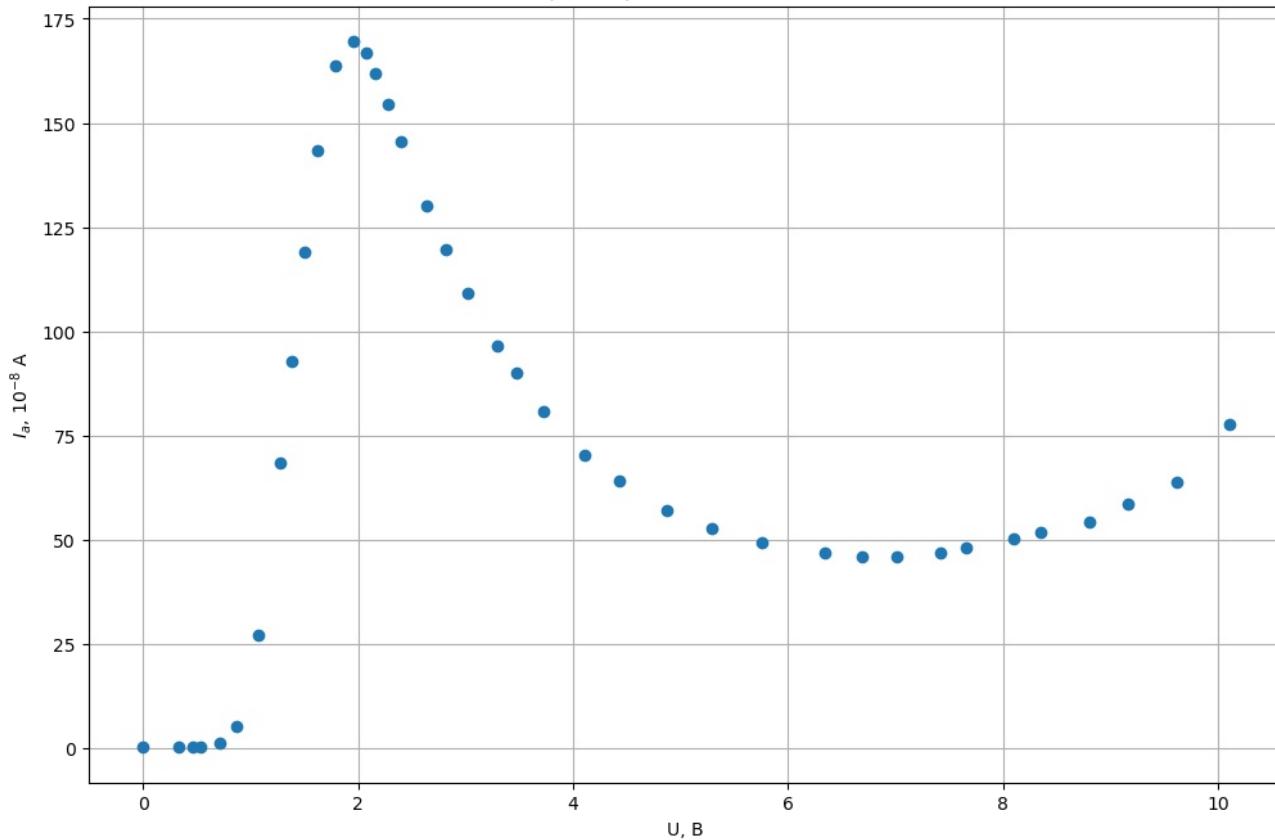
BAX при напряжении накала 2,5 В



In [9]:

```
fig = plt.figure(figsize= (12, 8), dpi= 100)
ax1 = fig.add_subplot()
ax1.plot(x2, y2, 'o' ,label= "Всё")
ax1.grid(True)
plt.xlabel("U, В")
plt.ylabel("$I_a$, $10^{-8}$ А")
plt.title("BAX при напряжении накала 2,66 В")
plt.show()
```

BAX при напряжении накала 2,66 В



Проводим аналогичные расчеты для статического режима

Размер электронной оболочки атома:

In [10]:

```
h = 6.626 * (10**-34)
l11 = (h*(5**0.5)/((32*9.1*(10**-31)*1.6*(10**-19)*(7.22-1.939))**0.5))*(10**10)
l21 = (h*(5**0.5)/((32*9.1*(10**-31)*1.6*(10**-19)*(7.014-1.956))**0.5))*(10**10)
l12 = ((h/((2*9.1*(10**-31)*1.6*(10**-19)*(1.939+2.5))**0.5))/2)*(10**10)
l22 = ((h/((2*9.1*(10**-31)*1.6*(10**-19)*(1.956+2.5))**0.5))/2)*(10**10)
print("l1_1 = ", l11, "A")
print("l1_2 = ", l12, "A")
print("l2_1 = ", l21, "A")
print("l2_2 = ", l22, "A")
```

```
l1_1 = 2.9869136895171904 A
l1_2 = 2.9139572634396087 A
l2_1 = 3.0520478946749527 A
l2_2 = 2.9083934605900854 A
```

Глубина потенциальной ямы:

In [11]:

```
u01 = (4/5)*7.22 - (9/5)*1.939
u02 = (4/5)*7.014 - (9/5)*1.956
print("U0_1 = ", u01, "eВ")
print("U0_2 = ", u02, "eВ")
```

```
U0_1 = 2.2857999999999996 eВ
U0_2 = 2.0904000000000003 eВ
```

7. Оценим, при каких напряжениях должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов для n=2,3

$$E_n = n^2 (E_1 + U_0) - U_0$$

In [12]:

```
E2_1 = 4*(1.939 + u01) - u01
E2_2 = 4*(1.956 + u02) - u02
E3_1 = 9*(1.939 + u01) - u01
E3_2 = 9*(1.956 + u02) - u02
print("E2_1 = ", E2_1, "eB")
print("E2_2 = ", E2_2, "eB")
print("E3_1 = ", E3_1, "eB")
print("E3_2 = ", E3_2, "eB")
```

```
E2_1 = 14.6134 eB
E2_2 = 14.0952 eB
E3_1 = 35.7374 eB
E3_2 = 34.3272 eB
```

8. Находим зависимость вероятности рассеяния электронов от энергии (напряжения) с точностью до константы, строим график зависимости

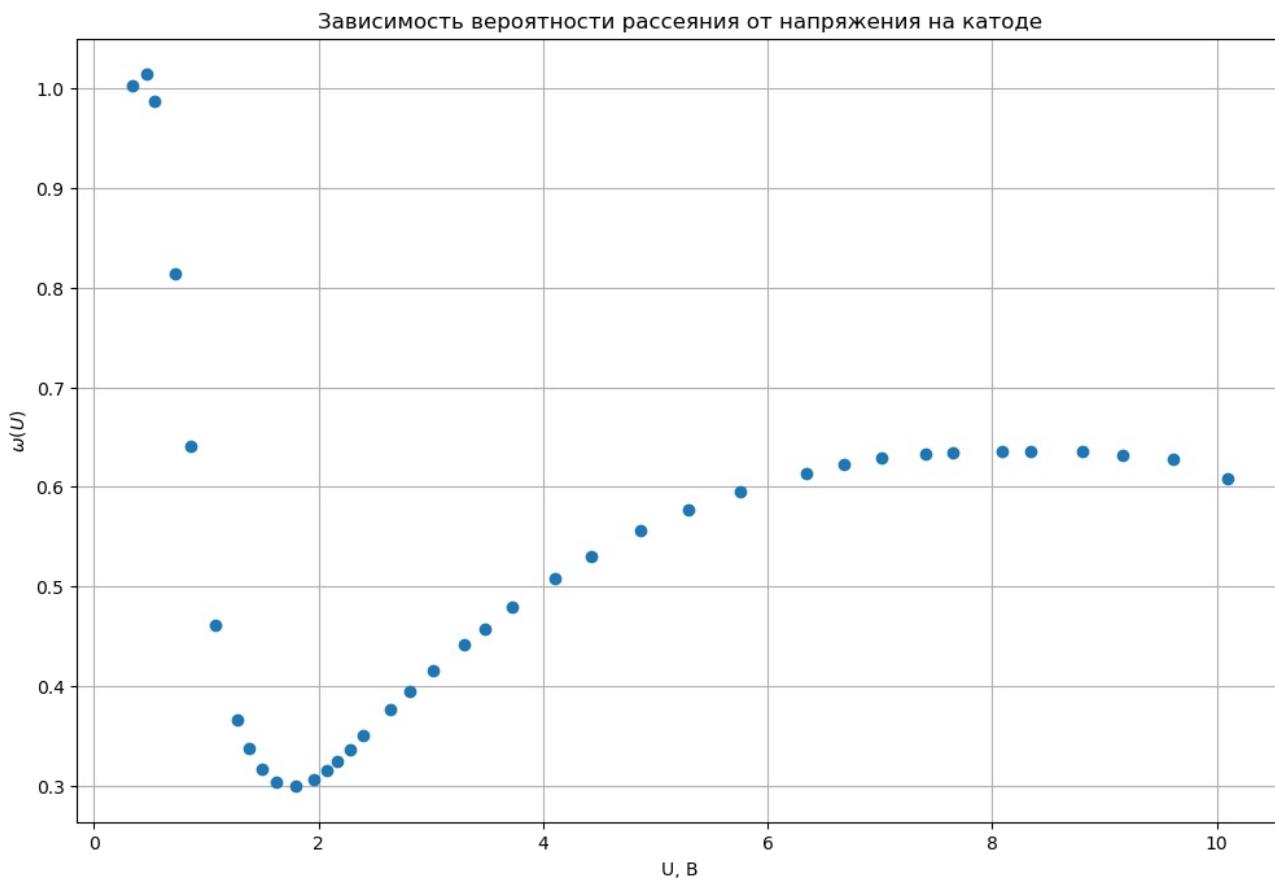
$$\omega(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a}{I_0}$$

In [13]:

```
c = 8
z = [np.log((y2[i]*0.001)/x2[i])*(-1)/c for i in range(1,len(x2))]
x2 = x2[1:]
```

In [14]:

```
fig = plt.figure(figsize= (12, 8), dpi= 100)
ax1 = fig.add_subplot()
ax1.plot(x2, z, 'o' ,label= "Всё")
ax1.grid(True)
plt.xlabel("U, В")
plt.ylabel("$\omega(U)$")
plt.title("Зависимость вероятности рассеяния от напряжения на катоде")
plt.show()
```



## Вывод

Расчитали размер электронной оболочки атома ксенона, оценили глубину потенциальной ямы. Изучили вероятность рассеяния электронов на атоме ксенона.

In [ ]: