

# 1.3

## Эффект Рамзауэра

Нугманов Булат  
Подлесный Артём

7 декабря 2020 г.

### Краткая теория

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.

$$\sigma = \frac{N}{nv} \quad (1)$$

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:

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

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

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'} = \sqrt{1 - \frac{U}{E}} \quad (3)$$

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:

$$\psi'' + k^2\psi = 0 \quad k^2 = \begin{cases} k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} \\ k_2^2 = \frac{2m(E+U_0)}{\hbar^2} \end{cases} \quad (4)$$

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

$$D = \frac{16k_1^2k_2^2}{16k_1^2k_2^2 + 4(k_1^2 - k_2^2)^2 \sin^2(k_2l)} \quad (5)$$

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:

$$k_2 l = \sqrt{\frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}} l = \pi n \quad (6)$$

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

$$2l = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} \quad (7)$$

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

$$2l = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}} \quad (8)$$

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

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{2m(E_2 - E_1)}} \quad (9)$$

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

$$U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1 \quad (10)$$

Теперь рассмотрим ВАХ тиратрона. Она имеет вид:

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

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:

$$\omega(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a}{I_0} \quad (11)$$

## Установка

Лампа-тиратрон Т301/1.3Б, заполненная инертным газом, расположена непосредственно на корпусе блока источников питания. Напряжение к электродам лампы подаются от источников питания, находящихся в корпусе прибора. Регулировка напряжения и выбор режима работы установки производится при помощи ручек управления, выведенных на лицевую панель блока источников питания.

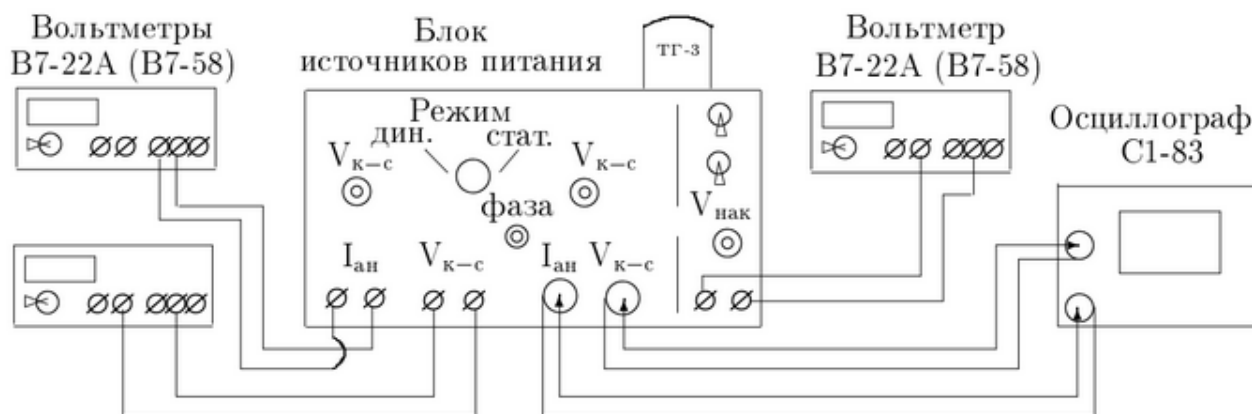


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

## Обработка экспериментальных данных

### Статический метод

По напряжению пробоя (максимальное напряжение, полученное на установке) определяем  $U \approx 11\text{В}$ , значит, что наш газ — ксенон.

По формулам рассчитаем характерный размер электронной оболочки атома ксенона и глубину потенциальной ямы.

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

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

Таблица 1

	$U_{\text{накала}}, \text{В}$	$l, \text{\AA}$	$\Delta l, \text{\AA}$	$U_0, \text{эВ}$	$\Delta U_0, \text{эВ}$
1	2.7	3.17	0.05	1.43	0.12
2	3.0	3.11	0.03	1.49	0.08

Найдём зависимость энергий, соответствующих максимум коэффициента прохождения электронов  $E_n = f(E_1, n)$ :

$$E_n = n^2 (E_1 + U_0) - U_0 \Rightarrow \begin{cases} E_2 = 13.79 \pm 0.22\text{eV} \\ E_3 = 32.9 \pm 0.6\text{eV} \end{cases}$$

Рис. 2

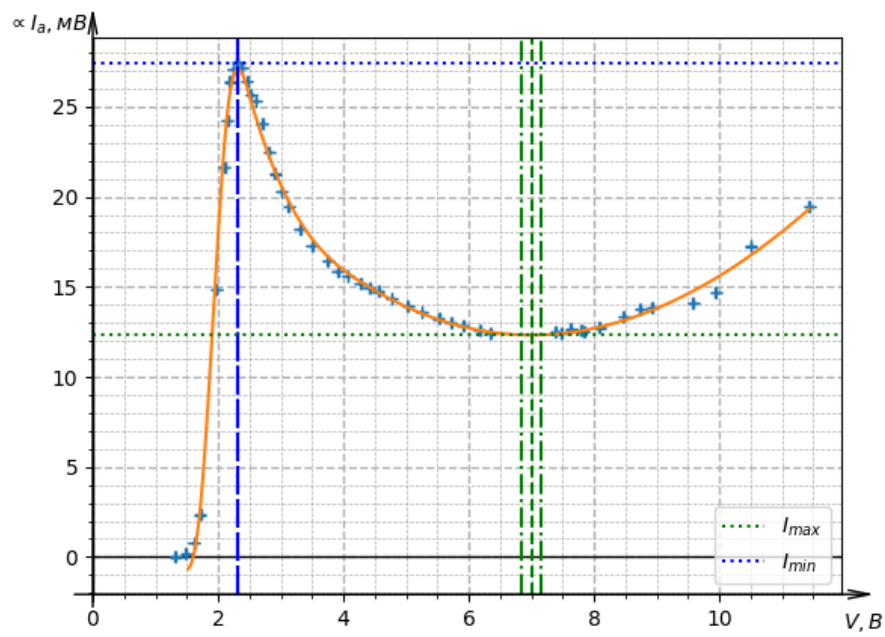
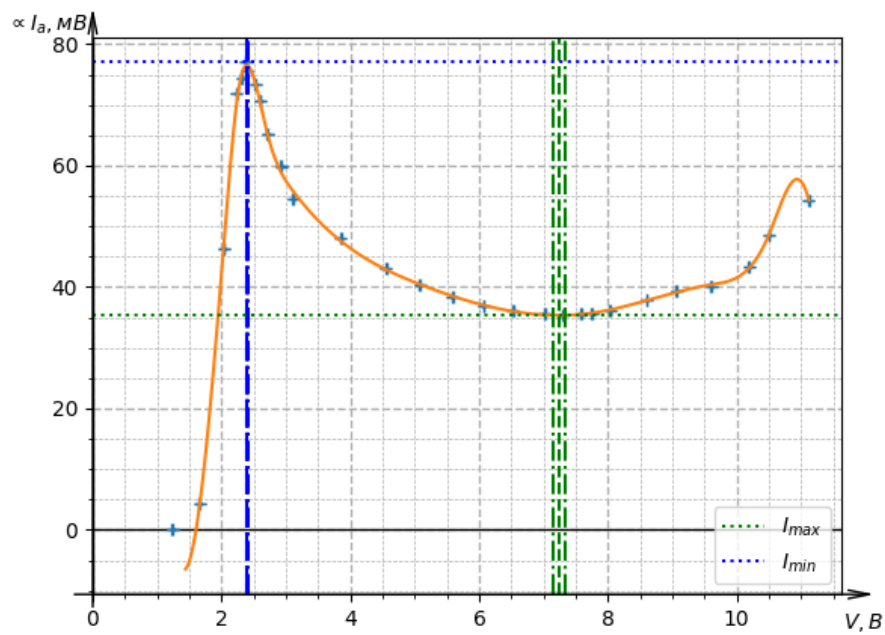


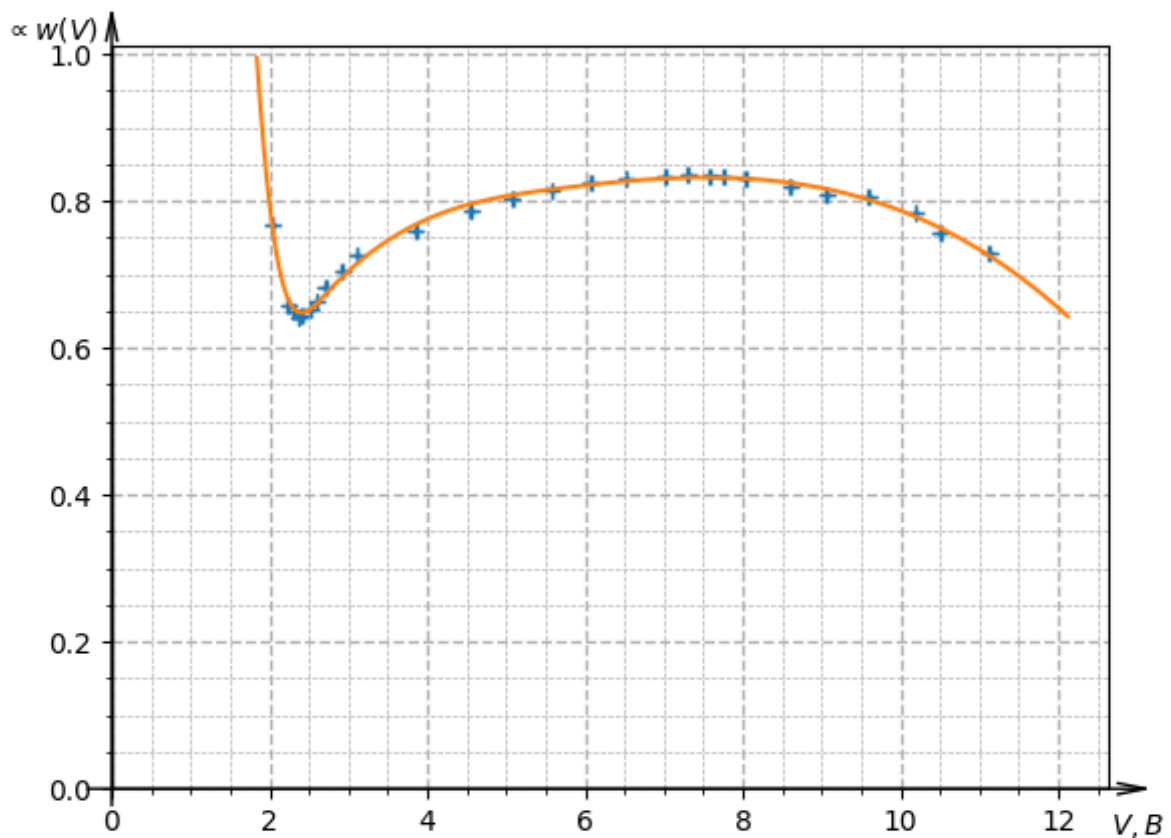
Рис. 3



Проведённые рыжие графики проведены не по какой-то формуле, а являются лишь сглаживающими.

Следующий график показывает лишь качественное поведение, потому что точного значения  $C$  и  $I_0$ .

Рис. 4 Качественный график вероятности прохождения

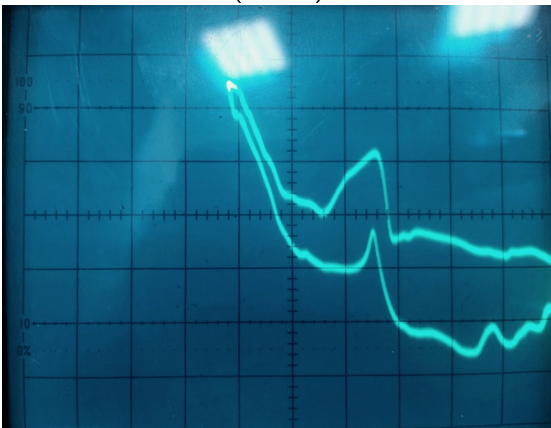


## Динамический метод

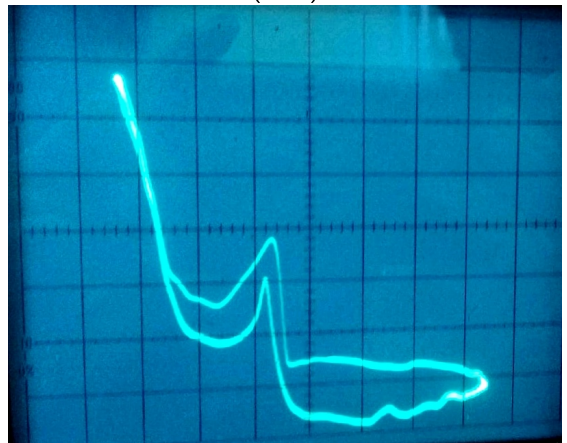
Измерение динамическим методом проводится с помощью осциллографа в пространственном режиме. Тогда на экране осциллографа будет показана ВАХ тиратрона. Измерения проводились при напряжении накала в 2.7 и 3 В. ВАХ показаны на рис.5.

Рис. 5 ВАХ тиратрона. Как видно, положения максимумов и минимумов не слишком отличаются для прямого и обратного смещения. Масштаб по X – 5В.

(2.7 В)



(3 В)



С помощью ВАХ и предыдущих формул (9), (10) получаем результаты в виде таблицы 2. Напряжение пробоя  $U \approx 11B$ , что соответствует результатам статического метода.

Таблица 2

$V_{\text{накала}}, \text{В}$	$I, \text{А}$	$\Delta I, \text{А}$	$U_0, \text{эВ}$	$\Delta U_0, \text{эВ}$
2.7	3.1	0.4	2	0.52
3	3.1	0.2	2.24	0.28

## Вывод

В проделанной работе было изучено явление рассеяния электронов на атомах ксенона. Экспериментальные данные подтверждают гипотезу о волновых свойствах электрона. Были оценены размеры электронной оболочки ксенона и глубина потенциальной ямы атома. Результаты статического и динамического методов равны в пределах погрешности, что свидетельствует о достоверности измерений. Имеющиеся отличия вызваны в основном большой погрешностью в определении положений максимума и минимума на ВАХ с помощью осциллографа. Это общий тренд всех таких работ этого семестра – динамический метод имеет значительно меньшую достоверность и точность.

$U_{\text{накала}}=2.7\text{В}$		$U_{\text{накала}}=3\text{В}$	
$I_a, \text{мВ}$	$V, \text{В}$	$I_a, \text{мВ}$	$V, \text{В}$
0	1.32	0	1.24
0.17	1.49	4.38	1.66
0.8	1.62	46.26	2.04
2.34	1.72	65.24	2.71
14.84	1.97	54.58	3.11
24.26	2.15	59.87	2.92
27.2	2.38	70.63	2.6
25.63	2.52	73.41	2.52
26.44	2.46	75.7	2.4
27.46	2.31	74.44	2.31
21.61	2.1	71.9	2.23
27.07	2.24	77.03	2.37
26.38	2.18	48	3.85
25.34	2.6	43.11	4.55
24.06	2.7	40.3	5.08
22.47	2.81	38.35	5.58
21.27	2.91	36.9	6.07
20.3	3.01	36.14	6.52
19.47	3.12	35.58	7.01
18.21	3.31	35.52	7.58
17.26	3.5	36.15	8.03
16.44	3.75	35.6	7.75
15.89	3.91	35.28	7.3
15.6	4.07	37.89	8.6
15.2	4.27	39.39	9.06
14.95	4.41	40.01	9.6
14.74	4.56	43.27	10.19
14.34	4.77	48.6	10.5
13.96	5.03	54.31	11.12
13.63	5.25		
13.23	5.52		
13.04	5.72		
12.84	5.91		
12.61	6.17		
12.46	6.35		
12.52	7.39		
12.53	7.83		
12.42	7.47		
12.73	8.09		
12.58	7.8		
12.64	7.63		
13.35	8.47		
13.87	8.93		
13.77	8.74		
14.08	9.58		
14.67	9.94		
17.25	10.5		
19.47	11.43		