

### 5.1.3. Эффект Рамзауэра.

Дорогинин Д.В.

Группа Б02-825

**В работе:** исследуется энергетическая зависимость вероятности рассеяния электронов атомами инертного газа, определяются энергии электронов при которых наблюдается «просветление» инертного газа и оценивается размер его внешней электронной оболочки.

#### Теория

Рассеяние электрона на атоме можно приближённого рассматривать как рассеяние частицы энергии  $E$  на потенциальной яме длины  $\ell$  и глубины  $U_0$ . Уравнение Шрёдингера имеет вид

$$\Psi'' + k^2\Psi = 0,$$

где вне ямы

$$k^2 = k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2},$$

а внутри

$$k^2 = k_2^2 = \frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}.$$

Коэффициент прохождения в таком случае равен

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

Заметим, что коэффициент прохождения имеет ряд максимумов и минимумов. Он максимальным при

$$\sqrt{\frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}}\ell = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Качественно эффект Рамзауэра можно объяснить, рассмотрев интерференцию прошедшей и дважды отразившейся от оболочки волн де Бройля. Длины волн вне и внутри атома:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}, \quad \lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m(E + U_0)}}.$$

Соответственно условия на первые интерференционные максимум и минимум

$$2\ell = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}}, \quad 2\ell = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}}. \quad (2)$$

Исключая из этих соотношений глубину ямы, получим

$$\ell = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}. \quad (3)$$

Глубина ямы при этом равна

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

## Описание установки

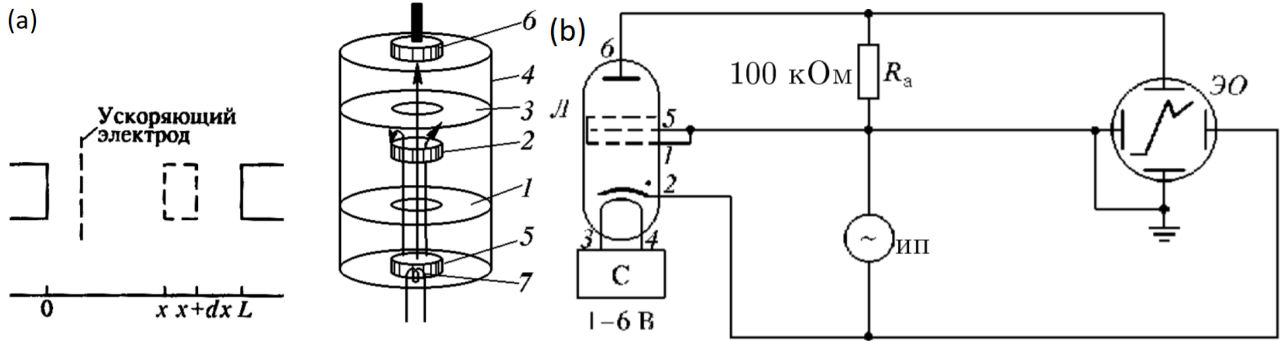


Рис. 1: (а) Схема тиратрона (слева) и его конструкция (справа): 1,2,3 – сетки, 4 – внешний металлический цилиндр, 5 – катод, 6 – анод, 7 – накаливаемая спираль. (б) Схема включения тиратрона.

Для изучения эффекта используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом (Рис. 1а). Электроны эмитируются катодом, ускоряются напряжением  $V$  и рассеиваются на атомах газа. Сетки соединены между собой и имеют один потенциал, примерно равный потенциалу анода. Рассеянные электроны отклоняются и уходят на сетку, а оставшиеся достигают анода, создавая ток  $I_a$ . Таким образом, поток электронов на расстоянии  $x$  от ускоряющей сетки уменьшается с ростом  $x$ . ВАХ анода должна быть

$$I_a = I_0 \exp(-Cw(V)), \quad (5)$$

где  $I_0 = eN_0$  – ток катода,  $I_a = eN_a$  – ток анода,  $C = Ln_a\Delta_a$  ( $L$  – расстояние между катодом и анодом,  $\Delta_a$  – площадь поперечного сечения атома,  $n_a$  – концентрация газа в лампе),  $w(V)$  – вероятность рассеяния на атоме. Формулу (5) можно переписать в виде

$$w(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a(V)}{I_0}. \quad (5a)$$

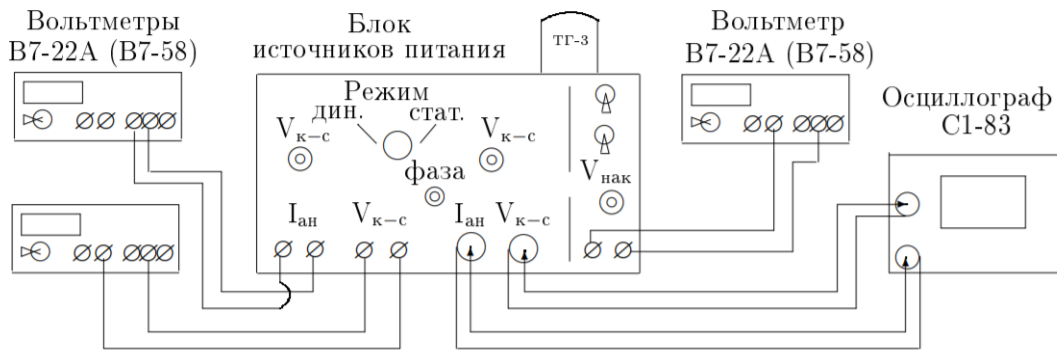


Рис. 2: Схема установки.

Схема экспериментальной установки, изображенная на Рис. 1б, в нашей работе конструктивно осуществлена следующим образом (Рис. 2): лампа-тиратрон расположена непосредственно на корпусе блока источников питания (БИП), напряжение к электродам лампы

подаётся от источников питания, находящихся в корпусе прибора. Регулировка напряжения и выбор режима работы установки производится при помощи ручек управления, выведенных на лицевую панель БИП.

## Ход работы и обработка данных

С помощью осциллографа снимаем ВАХ в динамическом режиме при двух различных напряжениях накала, погрешность их измерения берём  $\sigma_U = 0.01$  В, так как регистрируемое вольтметром значение не было постоянным, а колебалось в последнем знаке. По ВАХ определим  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  и  $V_{\text{пробой}}$  (Таблица 1). Погрешности всех измерений с осциллографе –  $\sigma_V = 0.3$  В – цена деления, умноженная на  $\sqrt{2}$ , так как точки на двух кривых неточно совпадали по своему положению.

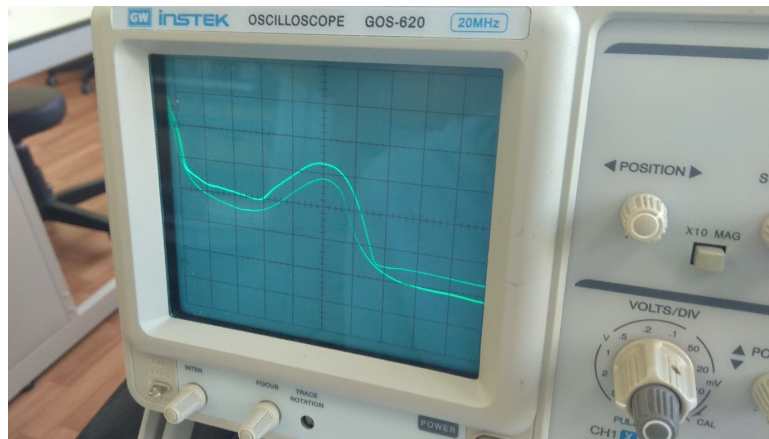


Рис. 3: ВАХ, наблюдаемая на осциллографе ( $V = 2.67$  В).

	$U$ , В	$\sigma_U$ , В	$V_{\max}$ , В	$V_{\min}$ , В	$V_{\text{пробой}}$ , В	$\sigma_V$ , В
1	2.67	0.01	3.0	7.4	11.4	0.3
2	2.96	0.01	2.0	7.4	11.2	0.3

Таблица 1: Измерения по ВАХ.

Расчёт  $\ell$  по формулам (2) неточен, так как яма меньше предполагаемых  $U_0 = 2.5$  эВ. Поэтому найдём  $\ell$  и глубину ямы по формулам (3) и (4) (результат – среднее по двум опытам):

$$\ell = 4.4 \pm 0.4 \text{ \AA},$$

$$U_0 = 0.7 \pm 0.2 \text{ эВ}.$$

Все погрешности посчитаны по стандартным формулам погрешности сложной величины, то есть корень суммы произведений квадратов частных производных по величине на квадрат её погрешности. Оценим ионизационный потенциал как

$$U = U_0 + V_{\text{пробой}} = 12.0 \pm 0.4 \text{ эВ}.$$

Сравнивая с потенциалами ионизации, приведёнными в [1] (описание работы 1.3), видим, что полученный потенциал в пределах погрешности совпадает с ионизационным потенциалом ксенона  $U = 12.1$  эВ.

Теперь снимем ВАХ титратрона в статическом режиме при тех же значениях напряжения накала, данные представлены в Таблице 3 (погрешности – последний знак, показываемый вольтметром, максимумы и минимумы выделены, их погрешности – минимум расстояния до соседней точки), а графики – на Рис. 4. Проведя аналогичные расчёты, получим:

$$\ell = 2.62 \pm 0.02 \text{ \AA},$$

$$U_0 = 1.35 \pm 0.03 \text{ эВ}.$$

Из формулы (1) оценим значения напряжений максимумов порядка  $n > 2$ :

$$E_2 = 20.41 \text{ эВ}, E_2 = 47.61 \text{ эВ}, E_4 = 85.69 \text{ эВ}.$$

Полученные энергии выше потенциала ионизации, поэтому эти максимумы уже не будут наблюдаться.

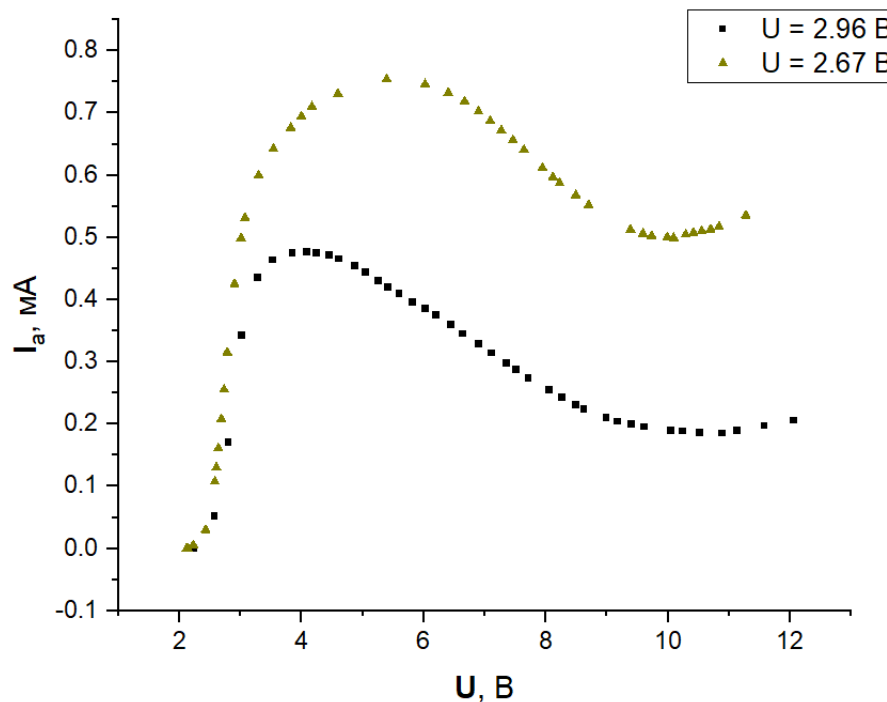


Рис. 4: ВАХ титратрона при разных напряжениях накала.

Наконец, в соответствии с (5а), можно получить зависимость вероятности рассеяния от напряжения на титротроне. Качественный график приведён на Рис. 5.

## Заключение

В ходе работы была статическим и динамическим методом исследована ВАХ титратрона, в обоих случаях соответствующая теоретической, получено значение размера внешней оболочки атома инертного газа и потенциал его ионизации, по которому было определено, что это ксенон.

## Список литературы

- [1] Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М. *Лабораторный практикум по общей физике: Учеб. пособие для вузов. Т. 3 Квантовая физика*. М.: Физматкнига, 2005.

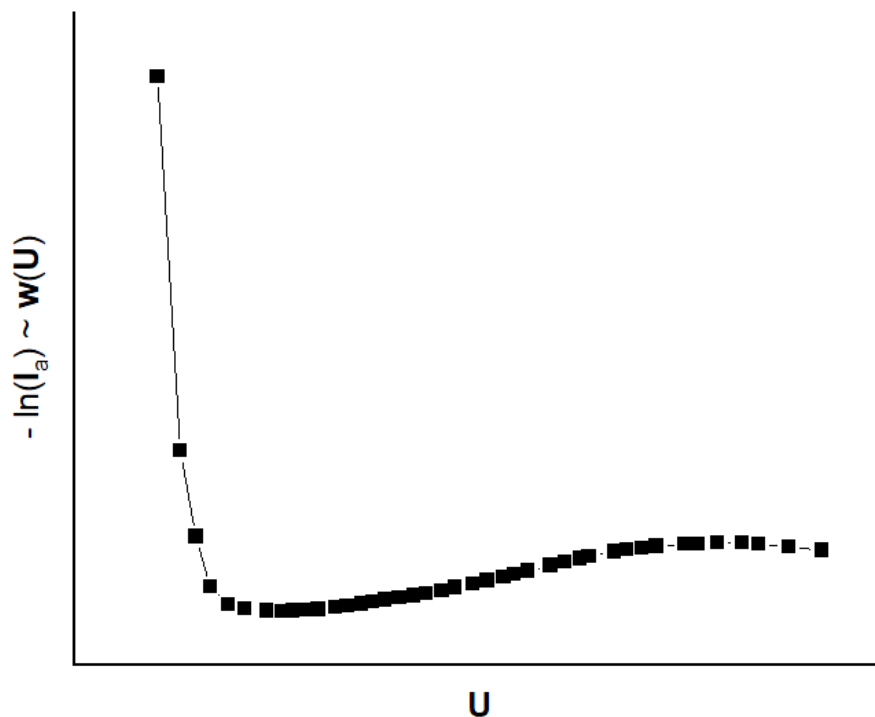


Рис. 5: Качественный вид зависимости  $w = w(V)$ .

	$U_{\text{на кал.}} = 2.67 \text{ В}$										
$U, \text{ В}$	2.12	2.14	2.23	2.43	2.58	2.61	2.64	2.69	2.73	2.78	2.90
$I_a, \text{ мА}$	0.000	0.000	0.006	0.030	0.108	0.130	0.161	0.208	0.256	0.315	0.426
$U, \text{ В}$	3.01	3.08	3.30	3.54	3.82	4.00	4.17	4.59	<b>5.39</b>	6.02	6.40
$I_a, \text{ мА}$	0.499	0.532	0.600	0.642	0.676	0.695	0.710	0.731	<b>0.755</b>	0.746	0.732
$U, \text{ В}$	6.67	6.90	7.09	7.27	7.46	7.64	7.94	8.12	8.23	8.49	8.70
$I_a, \text{ мА}$	0.719	0.702	0.687	0.672	0.656	0.641	0.612	0.597	0.587	0.568	0.552
$U, \text{ В}$	9.39	9.59	9.73	9.99	<b>10.09</b>	10.29	10.42	10.55	10.70	10.84	11.27
$I_a, \text{ мА}$	0.513	0.506	0.503	0.500	<b>0.499</b>	0.505	0.508	0.511	0.513	0.517	0.536
	$U_{\text{на кал.}} = 2.96 \text{ В}$										
$U, \text{ В}$	2.24	2.58	2.81	3.02	3.29	3.53	3.85	<b>4.09</b>	4.25	4.46	4.61
$I_a, \text{ мА}$	0.000	0.052	0.171	0.342	0.435	0.464	0.475	<b>0.476</b>	0.476	0.471	0.466
$U, \text{ В}$	4.87	5.04	5.26	5.42	5.60	5.82	6.03	6.21	6.45	6.64	6.91
$I_a, \text{ мА}$	0.454	0.444	0.431	0.420	0.409	0.396	0.385	0.375	0.359	0.345	0.328
$U, \text{ В}$	7.12	7.36	7.51	7.72	8.05	8.26	8.49	8.62	8.99	9.18	9.40
$I_a, \text{ мА}$	0.314	0.298	0.288	0.274	0.255	0.243	0.231	0.224	0.210	0.204	0.200
$U, \text{ В}$	9.62	10.04	10.24	10.52	<b>10.89</b>	11.13	11.58	12.06			
$I_a, \text{ мА}$	0.195	0.189	0.189	0.186	<b>0.185</b>	0.189	0.198	0.206			

Таблица 2: Измерения для ВАХ титратрона.