

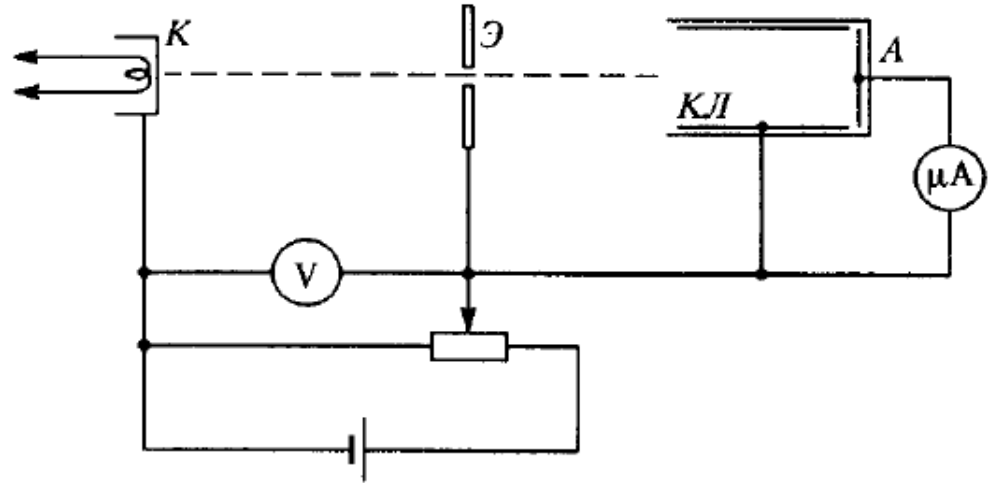
Работа 1.3
Эффект Рамзауэра
Селюгин Михаил, 876

1 Теория вопроса

Эффективное сечение реакции — это величина, характеризующая вероятность перехода системы двух сталкивающихся частиц в результате их рассеяния (упругого или неупругого) в определенное конечное состояние. Сечение σ 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.

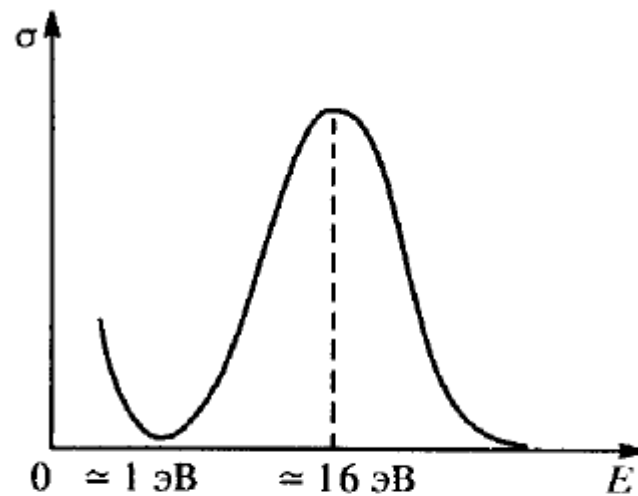
$$\sigma = \frac{N}{nv} \quad (1)$$

Для изучения зависимости сечения электронов от падающей энергии Рамзауэр провел серию опытов, где пучок электронов, вылетая с катода К, проходит ускоряющую разность потенциалов V , приложенную между катодом и электродом Э. Часть электронов рассеивается на атомах и собирается коллектором КЛ, оставшиеся же долетают до анода А и формируют анодный ток.



Р и с . 1 . Схема установки для измерения сечения рассеяния электронов в газах

Классическая теория предсказывала уменьшение сечения с ростом напряжения V , однако в ходе опытов была получена иная принципиальная зависимость, получившая название эффект Рамзауэра.



Р и с . 2 . Качественная картина результатов измерения упругого рассеяния электронов в аргоне

Эффект Рамзауэра нельзя объяснить с позиций классической теории. С квантовой же точки зрения картина рассеяния выглядит следующим образом. Внутри атома потенциальная энергия налетающе-

го 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 $k_2l = \pi$, 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 прохож-

дения 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, Δ_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:

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

2 Экспериментальная установка

В данной работе используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом.

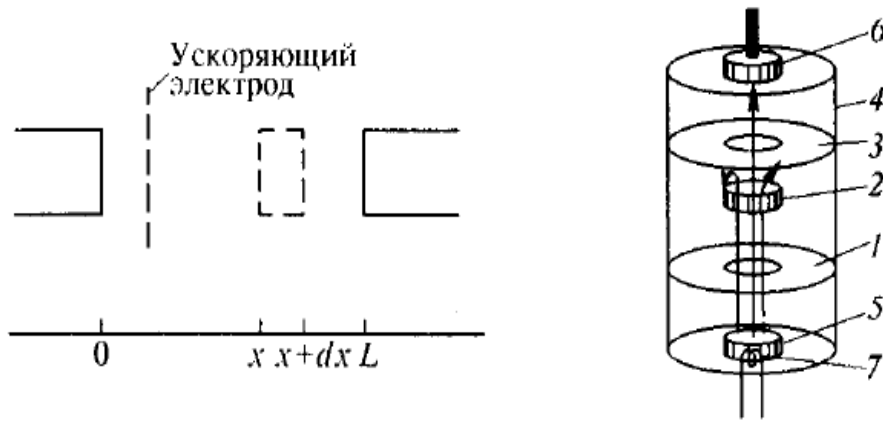


Рис. 3. Схематическое изображение тиратрона (слева) и его конструкция (справа): 1, 2, 3 — сетки, 4 — внешний металлический цилиндр, 5 — катод, 6 — анод, 7 — накаливаемая спираль

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, Δ_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:

$$\omega(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a}{I_0} \quad (12)$$

3 Результаты измерений и вычислений

3.1 Динамический режим

1. На экране осциллографа была получена ВАХ тиратрона для двух значений напряжения лампы накала:

$$V_1 = 2,81B \quad V_2 = 3,08B$$

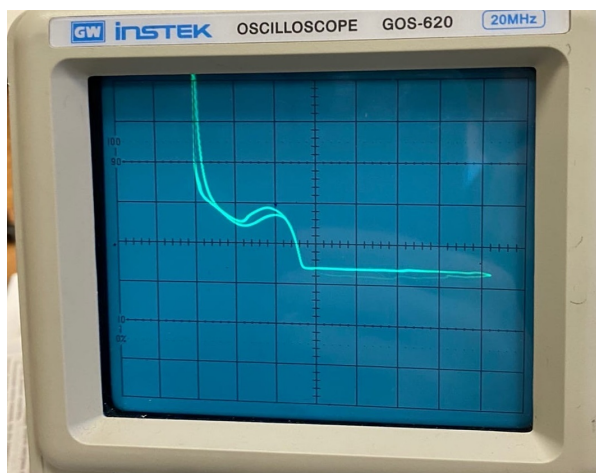


Рис. 4. ВАХ тиратрона на экране осциллографа (цена деления по горизонтали - 5В/дел)

2. По полученным кривым определим абсциссы первых максимума и минимума функции $I_a(V)$, а также значения напряжения пробоя $V_{\text{проб}}$

		$E_1, \text{эВ}$		$E_2, \text{эВ}$		$E_{\text{проб.}}, \text{эВ}$
$V_{\text{нак.}}, \text{В}$	$V_{1\text{max}}, \text{дел.}$	$V_{1\text{max}}, \text{В}$	$V_{1\text{min}}, \text{дел.}$	$V_{1\text{min}}, \text{В}$	$V_{\text{проб.}}, \text{дел.}$	$V_{\text{проб.}}, \text{В}$
2,81	0,8	4,0	1,4	7,0	2,4	12,0
3,08	1,0	5,0	1,8	9,0	2,6	13,0

Табл. 1. Значения напряжения на катоде, соответствующее первым максимуму и минимуму ВАХ, а также напряжения пробоя $V_{\text{проб}}$ для двух значений напряжения на лампе накала V_n

3. Воспользуемся формулами (9), (10) и вычислим размер атома l и глубину потенциальной ямы U_0 . $U = 2,81\text{В}$:

$$l \approx 0,34\text{А}, \quad U_0 \approx 1,6\text{эВ}$$

$U = 3,08\text{В}$:

$$l \approx 0,38\text{А}, \quad U_0 \approx 1,8\text{эВ}$$

4. Оценим погрешность

$$\sigma_E = 0,05 \text{ дел}, \text{ значит } \sigma_{U_0} = \sqrt{0,2^2 + 0,35^2} = 0,4\text{В}$$

$$\sigma_{E_2-E_1} = \sqrt{2 \cdot 0,05^2} \approx 0,07\text{дел.}$$

$$\varepsilon_{E_2-E_1} = \frac{0,07}{0,7} = 0,1 \Rightarrow \varepsilon_l = 0,5 \varepsilon_{E_2-E_1} = 0,05$$

Окончательно, имеем

$$l = 0,36 \pm 0,02\text{А} \quad (\varepsilon = 5\%)$$

$$U_0 = 1,7 \pm 0,4\text{эВ} \quad (\varepsilon = 24\%)$$

5. Из полученного значения напряжения пробоя $V_{\text{проб}} = 12 - 13B$ сделаем вывод, что тиратрон наполнен ксеноном (12, 1B).

3.2 Статический режим

1. В статическом режиме измеряем зависимость напряжения на аноде от напряжения на катоде. Учитывая $R_a = 100k\Omega$, рассчитаем ток анода и построим ВАХ тиратрона. Также с помощью (12) рассчитаем значение вероятности рассеяния электрона.

U = 2.81 B

$V_{\text{кат.-с.}}, B$	2,52	3,03	3,61	4,07	4,53	4,64	4,75	4,85	5,08	5,17	5,49	6,07	6,51	7,05
$V_{\text{ан.}}, MB$	6,90	37,40	54,20	58,70	60,05	62,40	62,10	62,30	59,40	61,60	57,40	53,30	50,10	45,70
$R_{\text{ан.}}, k\Omega$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$I_{\text{ан.}}, 10^{-8} A$	6,90	37,40	54,20	58,70	60,05	62,40	62,10	62,30	59,40	61,60	57,40	53,30	50,10	45,70
$C\omega$	1,93	3,62	3,99	4,07	4,10	4,13	4,13	4,13	4,08	4,12	4,05	3,98	3,91	3,82
$V_{\text{кат.-с.}}, B$	7,51	8,00	8,56	9,03	9,55	10,07	10,08	10,15	10,31	10,43	10,58	11,00	11,80	-
$V_{\text{ан.}}, MB$	41,90	38,05	34,10	31,60	29,70	28,80	29,80	29,80	29,50	29,60	28,80	29,50	31,05	-
$R_{\text{ан.}}, k\Omega$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
$I_{\text{ан.}}, 10^{-8} A$	41,90	38,05	34,10	31,60	29,70	28,80	29,80	29,80	29,50	29,60	28,80	29,50	31,05	-
$C\omega$	3,74	3,64	3,53	3,45	3,39	3,36	3,39	3,39	3,38	3,39	3,36	3,38	3,44	-

U = 3,08 B

$V_{\text{кат.-с.}}, B$	2,06	2,44	3,01	3,56	4,05	4,52	5,06	5,20	5,39	5,58	5,71	5,84	5,91	6,03	6,50
$V_{\text{ан.}}, MB$	0,10	8,60	51,70	66,00	72,30	76,70	79,20	79,90	80,10	79,90	80,10	79,90	80,20	79,60	78,50
$R_{\text{ан.}}, k\Omega$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$I_{\text{ан.}}, 10^{-8} A$	0,10	8,60	51,70	66,00	72,30	76,70	79,20	79,90	80,10	79,90	80,10	79,90	80,20	79,60	78,5
$C\omega$	-2,30	2,15	3,95	4,19	4,28	4,34	4,37	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,36
$V_{\text{кат.-с.}}, B$	7,05	7,52	8,02	8,50	9,01	9,52	9,68	9,88	10,00	10,05	10,15	10,37	10,53	10,93	-
$V_{\text{ан.}}, MB$	74,90	71,30	67,10	63,60	60,60	59,00	58,90	58,90	59,20	58,80	59,30	59,90	60,30	62,50	-
$R_{\text{ан.}}, k\Omega$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
$I_{\text{ан.}}, 10^{-8} A$	74,90	71,30	67,10	63,60	60,60	59,00	58,90	58,90	59,20	58,80	59,30	59,90	60,30	62,50	-
$C\omega$	4,32	4,27	4,21	4,15	4,10	4,08	4,08	4,08	4,08	4,07	4,08	4,09	4,10	4,14	-

Табл. 2. Данные для изучения ВАХ тиратрона: зависимость анодного тока I_a от напряжения на катоде $V_{\text{кат.-с.}}$, а также $C\omega$ - вероятность рассеяния электрона с точностью до константы. Измерения проводены при двух значениях напряжения лампы накала U

2. По данным табл. 2 построим график ВАХ тиратрона и график зависимости вероятности рассеяния от напряжения на катоде.

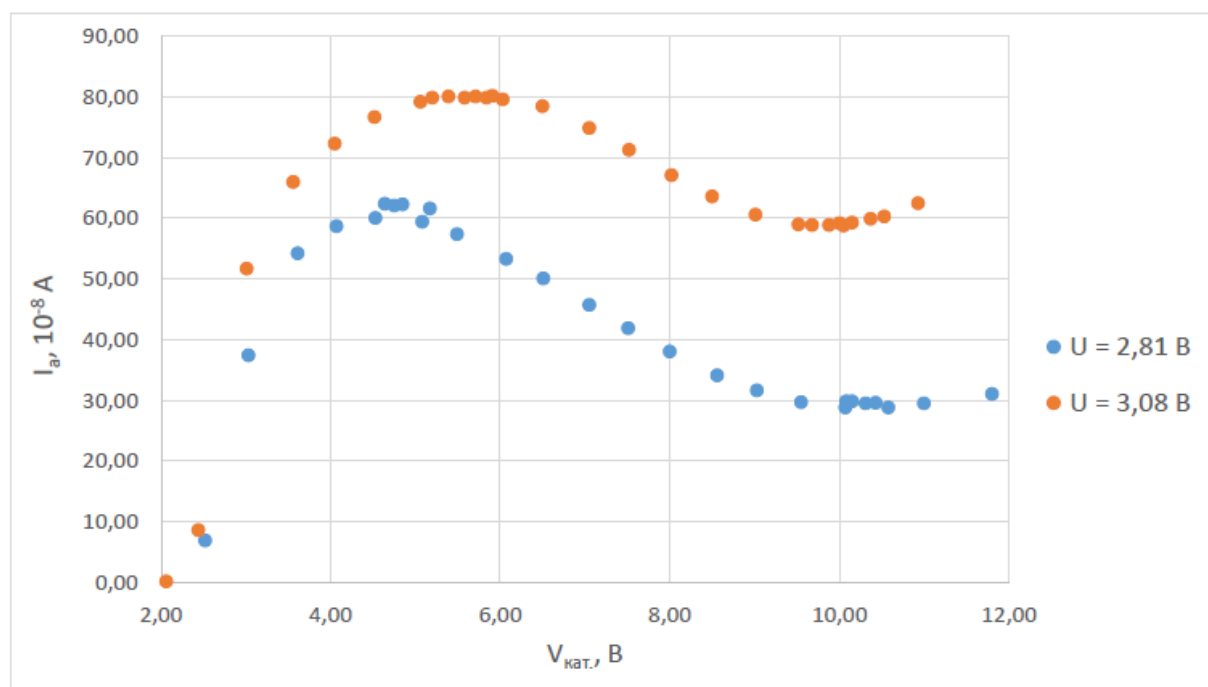


Рис. 5. График зависимости анодного тока I_a от напряжения на катоде $V_{кат.}$, Данные получены при двух значениях напряжения на лампе накала

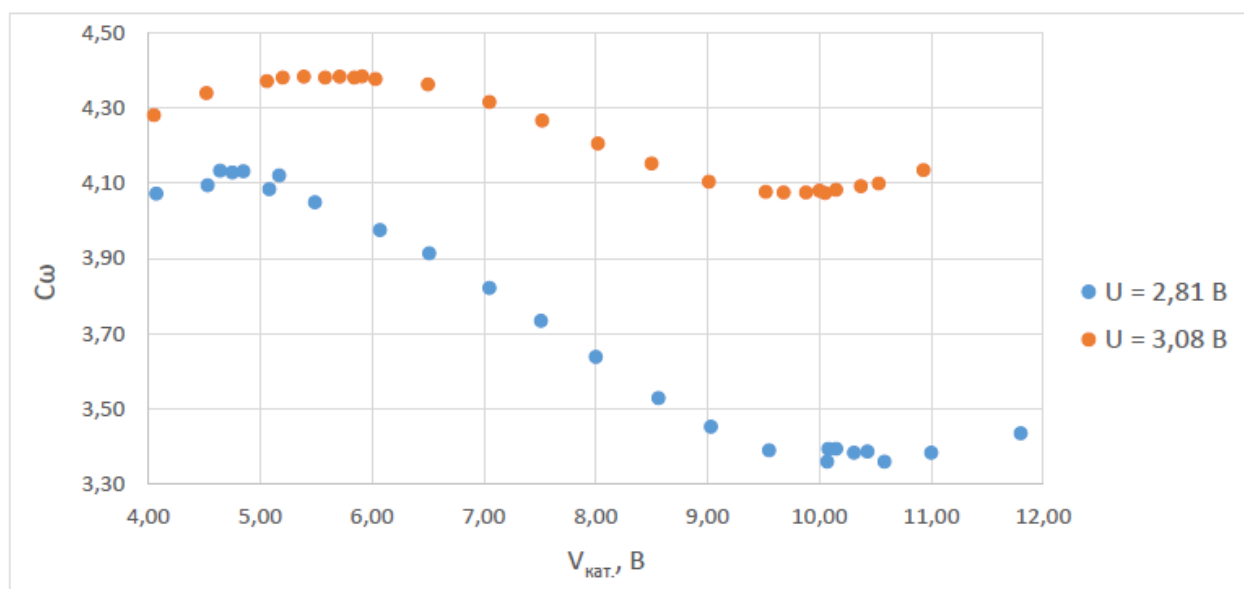


Рис. 6. График зависимости вероятности рассеяния электронов w (с точностью до константы C) от их энергии, выраженной через напряжение на катоде. Данные получены при двух значениях напряжения на лампе накала

3. Используя формулу (6), найдем значения E_n , которым соответствуют максимумам на графике ВАХ:

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

$$E_2 = 13,4 \pm 0,2 \text{ эВ}$$

$$E_3 = 32,8 \pm 0,2 \text{ эВ}$$

Однако данные максимумы пронаблюдать не удалось, так как при $U = 12B$ происходит пробой.

Но максимумы, определенные по графику 5, совпали с максимумами, рассчитанными на экране осциллографа динамическим методом. ($U_1 \approx 4B$, $U_2 \approx 5B$)

Если говорить о вероятности рассеяния, рассчитанной по формуле

$$C\omega(I_k) = \ln \frac{I_a(I_k)}{I_0},$$

то ее график близок к предсказанному теоретически.

4 Вывод

В данной работе был исследован эффект Рамзауэра – рассеяние медленных электронов на атомах.

Была получена ВАХ тиратрона в статическом и динамическом режимах работы. Было выявлено, что в опыте используется ксенон, а также получена оценка эффективного размера атома и глубины потенциальной ямы.

$$l = 0,36 \pm 0,02 \text{ А } (\varepsilon = 5\%)$$

$$U_0 = 1,7 \pm 0,4 \text{ эВ } (\varepsilon = 24\%)$$

Также была получена зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии и эта зависимость, качественно, оказалась близка к предсказанной теоретически.

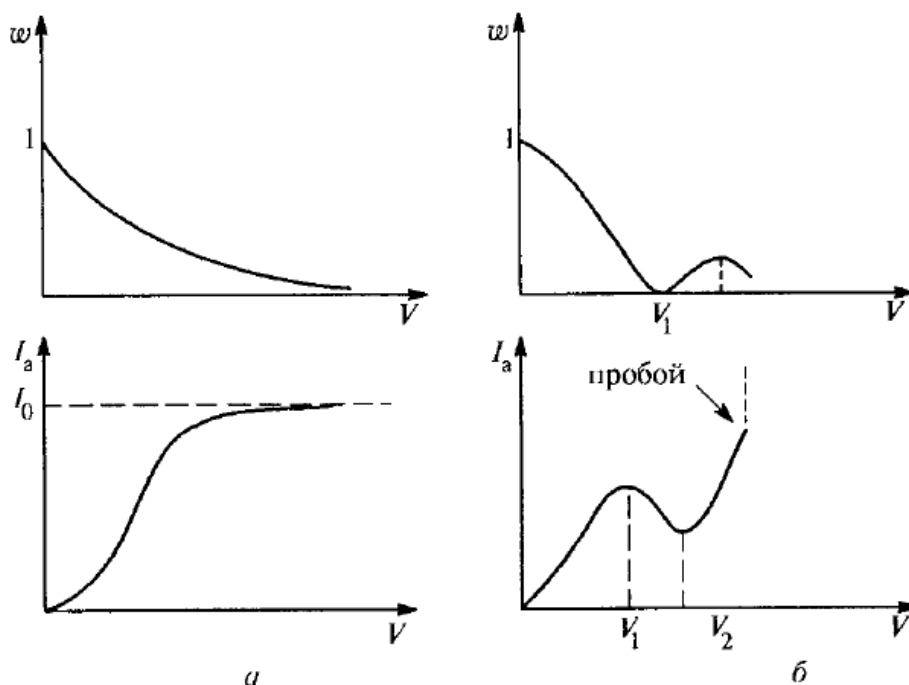


Рис. 7. Качественный вид вероятности рассеяния электрона атомом инертного газа и ВАХ тиратрона при классическом (а) и квантовом рассмотрении (б)