

1.3

ЭФФЕКТ РАМЗАУЭРА

Егор Берсенеv

1 Теоретическое введение

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.

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

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 $k_2l = \pi$, 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 прохождения электронов максимален при условии:

$$k_2l = \sqrt{\frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}}l = \pi n \quad (6)$$

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 часть

Проведем измерения в динамическом режиме:

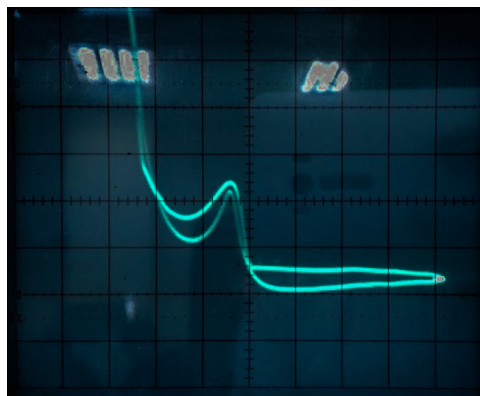


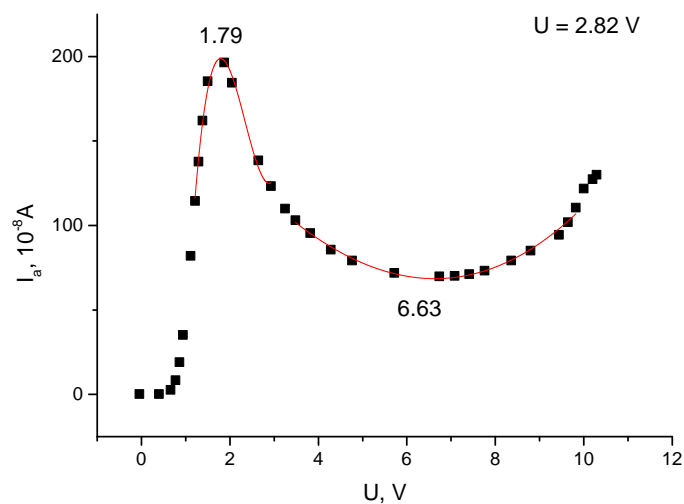
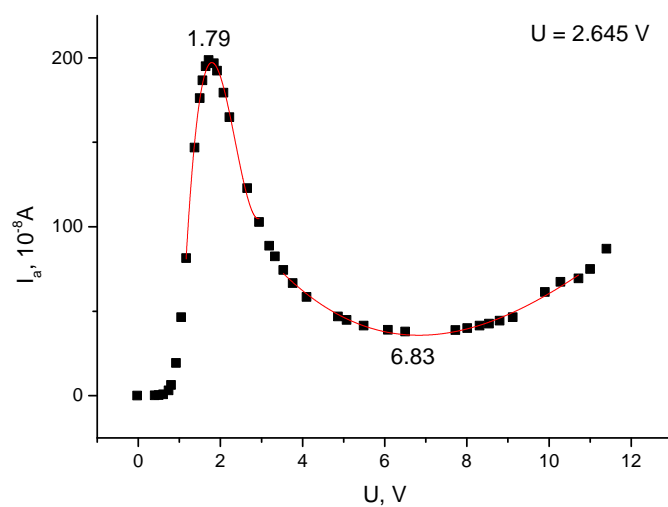
Рис. 1: Вид ВАХ в динамическом режиме

$$V_g = 2.645 \pm 0.1V$$

	V_{max}	V_{min}
верхняя кривая	2	6
нижняя кривая	2	5.5

По ВАХ оценим напряжение пробоя. Оно равно примерно $V \simeq 10V$. Следовательно, наш газ — ксенон.

Теперь перейдем к измерениям в статическом режиме. Снимем ВАХ для двух значений напряжения накала.



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

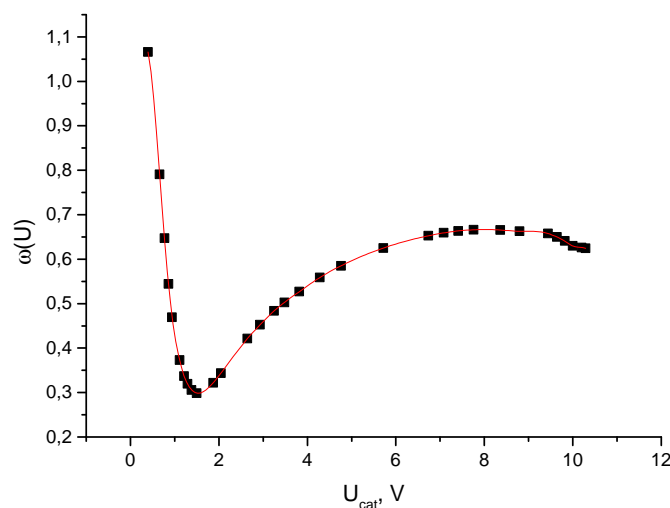
Найдем зависимость энергий, соответствующих максимум коэффициента про-

	1	2
U_g, V	2.645	2.82
$l, \text{\AA}$	3.1 ± 0.1	3.1 ± 0.1
U_0, eV	2.242 ± 0.2	2.082 ± 0.2

хождения электронов $E_n = f(E_1, n)$:

$$E_n = n^2 (E_1 + U_0) - U_0 \implies \begin{cases} E_2 = 13.4 \pm 0.2 eV \\ E_3 = 32.8 \pm 0.2 eV \end{cases}$$

На основе формулы для вероятности рассеяния электрона построим график этой вероятности в зависимости от анодного напряжения. Константу C выберем из соображений красивого качественного графика.



3 Обсуждение результатов и выводы

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. Кроме того, было исследовано влияние магнитного поля на ВАХ тиратрона. В ходе этого исследования был выявлен интересный эффект, последовательного увеличения горба, а затем уменьшения. Объяснить данный эффект не удалось.