

волна де Бройля, длина которой определяется соотношением  $\lambda = h/mv$ . Если кинетическая энергия электрона невелика, то  $E = mv^2/2$  и  $\lambda = h/\sqrt{2mE}$ . При движении электрона через атом длина волны де Бройля становится меньше и равна  $\lambda' = h/\sqrt{2m(E + U_0)}$ , где  $U_0$  — глубина атомного потенциала. При этом, как показано на рис. 4, волна де Бройля отражается от границ атомного потенциала, т. е. от поверхности атома, и происходит интерференция прошедшей через атом волны 1 и волны 2, отраженной от передней и задней границы атома (эти волны когерентны).

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

$$2l = \sqrt{2m(E + U_0)} \quad (8)$$

Здесь  $E$  — энергия электрона, соответствующая этому условию, которое естественно, совпадает с условием (7), следующим из решения уравнения Шредингера.

С другой стороны, прошедшая волна ослабится, если  $\Delta l = 2l = (3/2)\lambda'$  (условие первого интерференционного минимума), т. е. при условии

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

Решая совместно эти два уравнения (8, 9), можно исключить  $U_0$  и найти эффективный размер атома  $l$

$$\frac{h\sqrt{b}}{\sqrt{32m(E - E_i)}} \quad (10)$$

Понятно, что энергии  $E_i$  и  $E_2$  соответствуют энергиям электронов, прошедших разность потенциалов  $V_1$  и  $V_2$ , т. е.  $E_1 = eV_1$  и  $E_2 = eV_2$ .

Из формул (8) и (9) можно также по измеренным величинам  $E_1$  и  $E_2$  рассчитать эффективную глубину потенциальной ямы атома:

$$U_0 = -E_2 - \frac{h^2}{8m\lambda_0^2} \quad (11)$$

### Экспериментальная установка

В данной работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом. Схематическое изображение тиратрона и его конструкция приведены на рис. 5.

Электроны, эмитируемые катодом тиратрона, ускоряются напряжением  $V$ , приложенным между катодом и ближайшей к нему сеткой. Затем электроны рассеиваются на атомах инертного газа (ксенона). Все

сетки 1, 2, 3 соединены между собой и имеют одинаковый потенциал, примерно равный потенциалу анода 6. Поэтому между первой сеткой 1 и анодом практически нет поля. Рассеянные электроны отклоняются в сторону и уходят на сетку, а оставшаяся часть электронов достигает анода и создает анодный ток  $I_a$ . Таким образом, поток электронов  $N(x)$  на расстоянии  $x$  от ускоряющей сетки (т. е. число электронов, проходящих через поперечное сечение лампы в точке  $x$  в единицу времени) уменьшается с ростом  $x$  от начального значения  $N_0$  у катода (в точке  $x = 0$ ) до некоторого значения  $N_a$  у анода (в точке  $x = L$ ).

Рассмотрим теперь, какая должна быть реальная вольт-амперная характеристика (ВАХ) тиратрона. Выделим в газе на расстоянии  $x$  от катода тонкий слой с площадью поперечного сечения  $S$  и толщиной  $dx$  (см. рис. 5). Этот слой содержит  $dN = n_a S dx$  атомов газа ( $n_a$  — концентрация атомов газа в лампе). Суммарная рассеивающая поверхность этих атомов (суммарное эффективное сечение рассеяния)  $D = n_a S \sigma_a$ , где  $\sigma_a$  — площадь поперечного сечения атома. Обозначим через  $dN$  убыль потока электронов в результате прохождения слоя  $dx$ , тогда  $dN/N(x)$  есть доля рассеянных электронов, или вероятность рассеяния в слое. Для рассеяния электрона в слое необходимо выполнение двух независимых событий — электрон должен «наткнуться» в слое на атом, и, кроме того, должен на этом атоме рассеяться. Следовательно, вероятность  $dN/N(x)$  рассеяния электрона в слое равна произведению двух вероятностей — вероятности для электрона в слое  $dx$  встретить атом газа (она равна  $D/S$  — доли площади поперечного сечения слоя, перекрываемого атомами) и вероятности рассеяния на атоме  $w(V)$ :

$$-\frac{dN}{N(x)} = n_a S \sigma_a w(V) dx. \quad (12)$$

Интегрируя это соотношение от 0 до  $L$  и заменяя поток электронов на ток  $I = Ne$ , получаем уравнение ВАХ:

$$I_a = I_0 e^{-C \int_0^L w(V) dx} = I_0 e^{-C L n_a \sigma_a w(V)}. \quad (13)$$

где  $I_0 = e N_0$  — ток катода,  $I_a = e N_a$  — анодный ток.

Согласно классическим представлениям сечение рассеяния электрона на атоме должно падать монотонно с ростом  $V$  (обратно пропорцио-

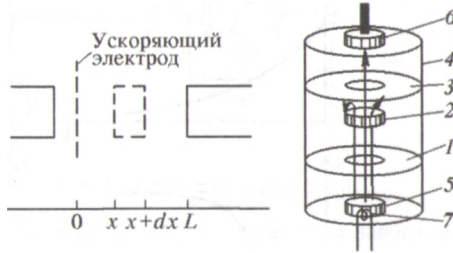


Рис.5. Схематическое изображение тиратрона (слева) и его конструкция (справа): 1, 2, 3 — сетки; 4 — внешний металлический цилиндр; 5 — катод; 6 — анод; 7 — накаливаемая спираль

нально скорости электрона, т. е. обратно пропорционально квадратному корню из его энергии), а значит, ВАХ будет монотонно возрастающей функцией, как это показано на рис. 6а. По квантовым соображениям вероятность рассеяния электронов и соответствующая ВАХ должны иметь вид, показанный на рис. 6б.

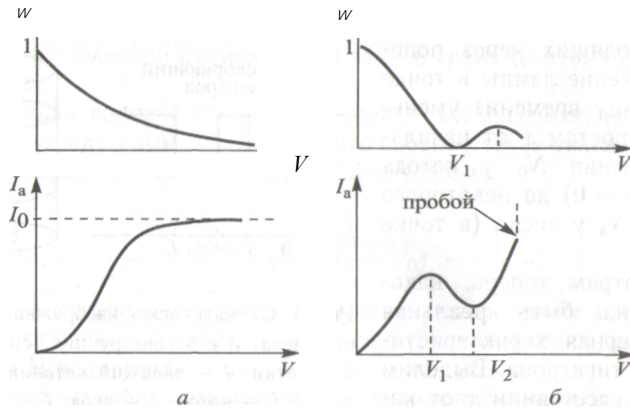


Рис. 6. Качественный вид вероятности рассеяния электрона атомом инертного газа и ВАХ тиратрона при классическом (а) и квантовом (б) рассмотрении

Согласно формуле (13) по измеренной ВАХ тиратрона можно определить зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии из соотношения

$$w(V) = -\frac{1}{p} \ln \left( \frac{I_a}{I_0} \right) \quad (14)$$

### З а д а н и е

Схема установки для изучения эффекта Рамзауэра приведена на рис. 7.

Реально удастся надежно наблюдать лишь один (первый, при  $n = 1$ ) минимум в сечении рассеяния электронов и следующий за ним максимум. Дело в том, что уже при  $n = 2$  напряженность поля становится столь велика, что с большой вероятностью происходит ионизация атомов и возникает пробой тиратрона. Поэтому измерения проводятся при пониженных величинах накала тиратрона. Кроме того, как показывает расчет, с ростом  $n$  глубина минимума резко уменьшается, что приводит к не столь ярко выраженному эффекту «просветления» газа.

1. Подключите схему к сети переменного тока 220 В (частота 50 Гц).

2. Вначале напряжение накала поставьте на уровне 2-2,5 В, осциллограф должен работать в режиме внешней развертки.

3. Плавно увеличивая подаваемое от генератора на тиратрон напряжение, наблюдайте визуально вольт-амперную характеристику тиратро-