

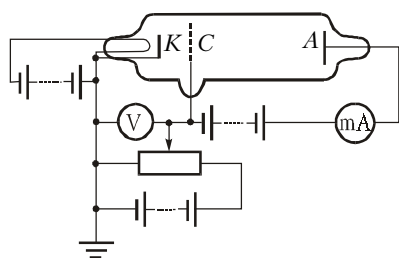
## ОЛИМПИАДЫ

# VII Международный турнир «Компьютерная физика»

## Заочный тур. Опыт Франка и Герца

В начале XX века стала понятна недостаточность традиционных классических представлений для описания физических явлений в микромире. Получили развитие новые, квантовые представления о строении вещества. Первая квантовая модель атома водорода была создана Н.Бором в 1913 году. Согласно этой модели, электрон в атоме может иметь только строго определенные значения энергии (энергетические уровни), т.е. атом имеет дискретную структуру.

В 1913 году Дж.Франком и Г.Герцем был проведен эксперимент, доказавший наличие в атоме дискретных энергетических уровней (в 1925 году эта работа была удостоена Нобелевской премии по физике). Опыт состоял в следующем. К разрядной трубке, содержащей катод  $K$ , анод  $A$  и сетку  $C$ , подавалось напряжение, как показано на рисунке. Трубка заполнялась насыщенными парами ртути. Электроны



ны эмитировались с поверхности катода, ускорялись в пространстве между  $K$  и  $C$ , а затем попадали в тормозящее поле между  $C$  и  $A$ . В процессе движения от катода к аноду электроны испытывали упругие и неупругие соударения с атомами

ртути. При упругом соударении атом ртути оставался в основном состоянии, при неупругом переходил в возбужденное состояние. В эксперименте измерялся анодный ток (количество электронов, пришедших на анод) в зависимости

от величины напряжения между  $K$  и  $C$ . Анализ вольт-амперных характеристик привел к доказательству того, что при возбуждении атом теряет строго определенное значение энергии, т.е. атом имеет дискретную энергетическую структуру.

## Двумерная компьютерная модель опыта Франка и Герца

Для простоты будем считать, что движение электронов происходит всего в двух пространственных измерениях  $(x, z)$ , причем ось  $z$  направлена вдоль оси системы.

Предполагается моделировать движение электронов между  $K$  и  $A$  методом Монте-Карло (методом статистических испытаний). В рамках этого метода прослеживается судьба конкретного электрона, эмитируемого с катода и совершающего случайное движение в газе в результате упругих и неупругих столкновений с атомами ртути. Движение между столкновениями происходит под действием внешнего постоянного однородного электрического поля. Каждое столкновение происходит в случайный момент времени, и направление вектора скорости после рассеяния на атоме ртути является также случайным. Общее представление о физическом процессе – величине анодного тока, его зависимости от ускоряющего и тормозящего напряжений, энергетическом распределении электронов в определенной точке пространства и т.п. – получается в результате усреднения результатов анализа движения большого количества отдельно взятых электронов.

Пусть средняя частота упругих соударений  $\nu_0$  постоянна (т.е. не зависит от энергии). Потеря энергии в неупругих соударениях составляет  $\epsilon^* = 4,9$  эВ (энергия возбуждения),

*Об условиях и порядке проведения этого турнира рассказано в предыдущем номере журнала «Квант», а также на сайте <http://www.informika.ru/text/goscom/gluon>.*

*(Окончание см. на с.40)*

## VII Международный турнир «Компьютерная физика»

(Начало см. на с. 25)

и эти столкновения возможны для электронов с энергией  $\epsilon$ , большей  $\epsilon^*$ . Предположим, что если  $\epsilon > \epsilon^*$ , то частота неупругих соударений равна  $\nu^*$ . (Обычно выполняется условие  $\nu^* \ll \nu_0$ .) Общая частота столкновений равна  $\nu = \nu^* + \nu_0$ , а среднее время между двумя столкновениями (произвольной природы) есть  $\tau = 1/\nu$ .

Будем считать, что электрон вылетает с катода с нулевой скоростью. Пусть электрон испытал столкновение в момент времени  $t_0$ . Тогда вероятность того, что следующее столкновение произойдет в интервале времени от  $t^*$  до  $t^* + dt$ , определяется выражением

$$dP = \exp(-\nu(t^* - t_0)) \cdot \nu dt.$$

В частности, если  $t^* - t_0 \ll \tau$ , т.е. если рассматриваемый интервал времени много меньше среднего времени между столкновениями, это выражение принимает вид

$$dP = \nu dt.$$

Если столкновение произошло, то вероятность того, что оно было упругим, есть

$$\omega_0 = \frac{\nu_0}{\nu_0 + \nu^*},$$

а вероятность того, что оно было неупругим, определяется

как

$$\omega^* = \frac{\nu^*}{\nu_0 + \nu^*}.$$

Мы будем предполагать, что упругие и неупругие столкновения изотропны, т.е. рассеяние электрона на любой угол равновероятно. Расстояние между катодом и анодом  $L = 1$  см, расстояние между катодом и сеткой  $l = 0,2$  см. В поперечном направлении размер системы считать неограниченным. Связь частоты упругих и неупругих столкновений с давлением паров ртути задается соотношениями

$$\nu_0 = A \cdot p \text{ (торр)}, \quad \nu^* = B \cdot p \text{ (торр)},$$

где  $A = 3,5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{торр}^{-1}$ ,  $B = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1} \cdot \text{торр}^{-1}$  (здесь 1 торр – внесистемная единица давления, равная 1/760 атмосферы).

### Задание

1. Исследуйте зависимость анодного тока от величины ускоряющего напряжения между катодом и сеткой в диапазоне значений  $U_{KC} = 0,1 - 15$  В. Считать, что  $U_{CA}$  изменяется от  $-0,2$  В до  $-0,5$  В, а давление паров ртути составляет  $p = 1$  торр.

2. Исследуйте зависимость анодного тока от давления паров ртути в диапазоне значений  $p = 0,1 - 10$  торр. Считать, что  $U_{KC} = 10$  В.

3. Получите распределение электронов по энергиям в различных областях пространства между катодом и анодом.