

Отчет по лабораторной работе №5
Опыт Франка-Герца

Выполнили студенты 430 группы
Понур К.А., Сарафанов Ф.Г., Сидоров Д.А.

Нижний Новгород, 2018

1. Теоретическая часть

Целью данной работы ставилось экспериментально пронаблюдать дискретный характер поглощения энергии атомами, провести измерения потенциалов резонанса и ионизации для атома гелия.

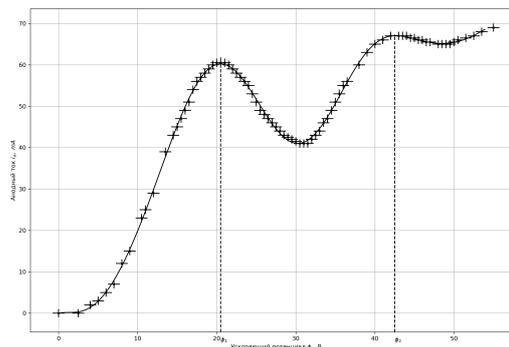
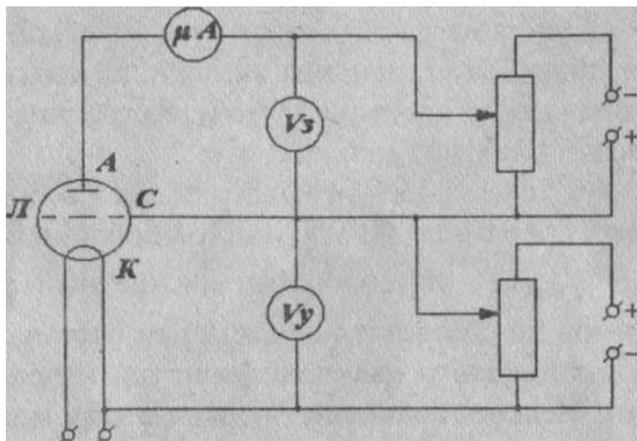
На основании проведенных экспериментов Резерфордом в 1911 г. была построена планетарная модель атома. Но устойчивость такого атома и характер его спектров невозможно было объяснить с точки зрения известных тогда классической механики и электродинамики. Для устранения указанного противоречия Н. Бор в 1913 г. предложил квантовую теорию строения атома, в основе которой лежат следующие постулаты.

1. Атомы могут длительно пребывать только в определенных энергетических состояниях. В этих состояниях они обладают энергиями $E_0, E_1, E_2 \dots, E_n$, образующими дискретный ряд. При движении электронов по соответствующим этим состояниям стационарным орбитам никакого излучения или поглощения энергии не происходит.
2. При переходе из одного энергетического состояния E_m , в другое E_n поглощается или излучается строго определенная порция (квант) электромагнитной энергии. Энергия кванта связана с частотой излучения ν следующим отношением:

$$h\nu = E_m - E_n,$$

где h - постоянная Планка.

Ставшие классическими эксперименты, выполненные в 1913 г. Д.Франком и Г. Герцем, непосредственно подтвердили справедливость квантовых постулатов Бора. В опыте Франка-Герца исследуются процессы столкновения электронов с атомами газа. Упрощенная схема экспериментальной установки приведена на рис.1. В баллоне лампы Д заполненной исследуемым газом, находятся три электрода: раскаленный катод К, являющийся источником электронов, сетка С и анод А. Между сеткой и катодом прикладывается разность потенциалов $\varphi_y = \varphi_c - \varphi_k$, ускоряющая электроны (потенциал сетки по отношению к катоду φ_y называют ускоряющим потенциалом). Разность потенциалов между анодом и сеткой имеет, как правило, противоположный знак и носит название потенциала задержки $\varphi_z = \varphi_a - \varphi_c < 0$.



В ходе выполнения эксперимента снимается анодно-сеточная характеристика газонаполненной лампы, т. е. зависимость анодного тока i_a от ускоряющего потенциала ϕ_y при постоянном потенциале задержки ϕ_z . Типичный вид этой характеристики приведен на рис.2.

На начальном участке характеристики по мере увеличения ϕ_y наблюдается монотонный рост анодного тока. В этом режиме вылетающие из катода электроны при движении к сетке приобретают сравнительно малую энергию W_e и сталкиваются с атомами газа упруго. При таких столкновениях кинетическая энергия атома изменяется слабо - на величину порядка

$$\Delta W \sim W_e \frac{m}{M} \ll W_e,$$

где m и M - массы электрона и атома соответственно, а внутреннее состояние атома не меняется. Поскольку при столкновениях атомы отбирают у электронов лишь незначительную часть энергии, последние, проходя через некоторую эквипотенциальную поверхность с потенциалом ϕ , имеют энергию, примерно равную $e\phi$ (здесь не учтена начальная скорость вылета электронов с катода).

При $\phi_y > \phi$ электроны пролетают через сетку, имея энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала, и достигают анода. Как и в обычных электронных лампах, с ростом потенциала сетки ϕ_y анодный ток возрастает. Этот процесс продолжается до тех пор, пока ϕ_y не достигнет величины так называемого первого критического потенциала ϕ_1 (его называют также резонансным потенциалом), при котором электроны приобретают энергию, достаточную для возбуждения атома. Столкновения электронов, имеющих энергию $e\phi_1$, с атомами могут происходить неупруго. При этом электрон в процессе столкновения всю свою энергию передает атому. Величина критического потенциала ϕ_1 связана с разностью энергии возбужденного E_1 , и невозбужденного E_0 атомов законом сохранения энергии:

$$e\phi_1 = E_1 - E_0$$

Электронны, потерявшие энергию при неупругих столкновениях, не могут преодолеть задерживающего поля между анодом и сеткой и "вылавливаются" последней, поэтому анодный ток с дальнейшим ростом φ_y уменьшается. Так возникает падающий участок на анодно-сеточной характеристике.

При дальнейшем увеличении φ_y поверхность с потенциалом φ_1 (а, следовательно, и область неупругих соударений) смещается от сетки к катоду. При $\varphi_y \geq \varphi_1 + |\varphi_3|$ электроны, испытавшие неупругие соударения на пути к сетке, вновь могут набрать энергию, превышающую $e\varphi$, и анодный ток опять возрастает с ростом φ_y . Начиная со значения $\varphi_y \geq 2\varphi_1$, электроны на своем пути могут дважды неупруго столкнуться с атомами и, потеряв энергию после второго столкновения, не преодолеть задерживающий потенциал. Это приведет к появлению второго провала на анодно-сеточной характеристике. Аналогичным образом происходит падение тока и при более высоких потенциалах $\varphi_n = n\varphi_1$.

Заметим далее, что если на длине свободного пробега электрон может набрать энергию, большую разности энергий двух уровней $E_n - E_1$, то возможно возбуждение всех уровней с энергией, меньшей E_n , и даже ионизация атома, если $E_n - E_1$ больше энергии ионизации. Поэтому уменьшение длины свободного пробега λ (за счет увеличения давления газа внутри лампы) позволяет не только увеличить точность определения резонансного потенциала, но и избежать перекрытия различных ступеней возбуждения. С другой стороны, слишком сильное уменьшение λ нецелесообразно, т. к. при этом электроны до прихода в область неупругих соударений Ω испытывают много упругих столкновений, что увеличивает их разброс по энергиям, и, следовательно, уменьшает точность определения резонансного потенциала.

Для некоторых газов, у которых величина резонансного потенциала не сильно отличается от потенциала ионизации, можно, используя эту же лампу, только при относительно больших потенциалах задержки ($\varphi_3/\varphi_y \sim 1$), измерить также и потенциал ионизации.

Для этого можно использовать то обстоятельство, что при $|\varphi_3| > \varphi_y$, электроны, эмитированные катодом, не достигают анода, и анодный ток может быть вызван только положительными носителями заряда. В случае $|\varphi_3| > \varphi_y \geq \varphi_u$ наличие анодного тока связано с процессами ионизации электронным ударом в окрестностях сетки. Когда φ_y достигнет значения φ_u , у витков сетки появится область неупругих соударений, в которой энергия электронов будет достаточна для ионизации атомов газа, и возникнет ионный ток между сеткой и анодом лампы. В анодной цепи ток в этом случае будет иметь направление, противоположное обычному и для его измерения необходимо произвести «переполусовку» амперметра (заметим, что название «анод» в этом случае оказывается чисто условным).

Ранее утверждалось, что для точного определения резонансного потенциала необходи-

мо избежать перекрытия различных ступеней возбуждения; а в этом случае электроны на длине свободного пробега должны набирать энергию, не превышающую разности уровней $E_2 - E_1$. Для ионизации же необходимо, чтобы энергия, полученная электроном на длине свободного пробега, была бы не меньше $E_u - E_1$ (E_u - энергия, соответствующая ионизированному атому). Казалось бы, одновременное выполнение этих двух условий невозможно. Но нельзя забывать, что картины электрических полей внутри лампы при определении резонансного потенциала и потенциала ионизации будут совершенно различными. Нетрудно убедиться, что производная $\frac{d\varphi}{dn}$ во втором случае будет существенно выше, следовательно, и электрон в этом случае может набрать на длине свободного пробега существенно большую энергию

$$\Delta W_\lambda = e\lambda \frac{d\varphi}{dn}.$$

2. Экспериментальная часть

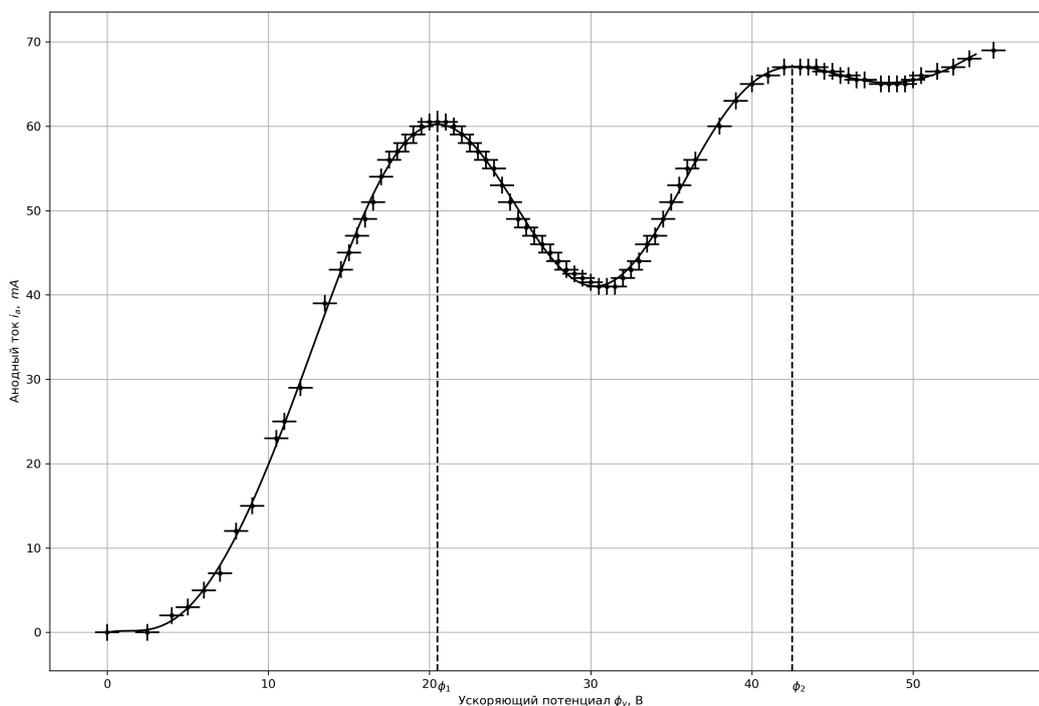
В Данной работе в качестве рабочего газа использовался гелий, при этом давление в лампе $p=1.2$ мм рт.ст.

2.1. Определение резонансного уровня

Напряжение накала $V_H = 3$ В

Напряжение задержки $V_3 = 7.5$ В

График зависимости анодного тока от ускоряющего потенциала:



Резонансный потенциал $\varphi_1 = 20.5 \pm 0.75$ ЭВ

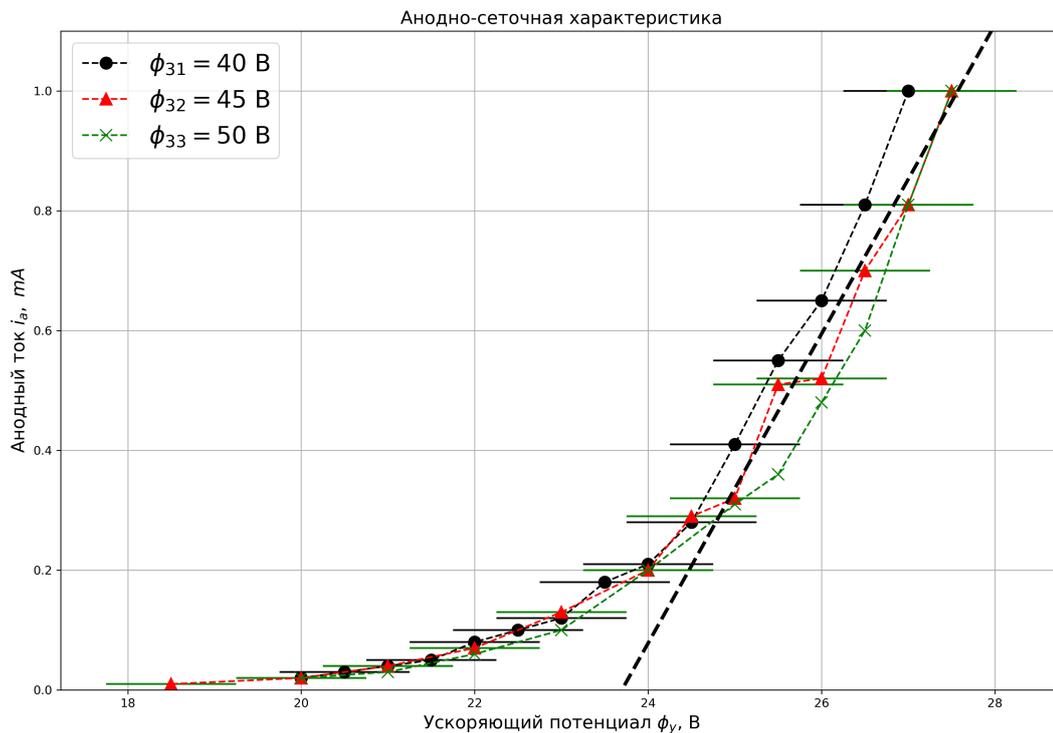
Потенциал $\varphi_2 = 42.5 \pm 0.75$ ЭВ

Разность энергетических уровней $E_1 - E_0 = e\varphi_1 = 20.5 \pm 0.75$ ЭВ

Табличное значение $E_1 - E_0 = 21.2$ ЭВ

2.2. Определение ионизационного потенциала

При разных значениях запирающего потенциала, превышающего потенциал ускорения, была снята зависимость анодного тока от ускоряющего потенциала.



Потенциал ионизации φ_u определялся как значительное увеличение анодного тока при повышении ускоряющего потенциала. При значениях, близких, но меньше φ_u анодный ток может появляться ввиду разброса электронов по скоростям при эмитировании с катода. Электроны, обладающие большей начальной скоростью могут ионизировать атом, при том что большая часть атомов останется не ионизированными. Определенный φ_u составил $\varphi_u = 23.7$ ЭВ

Для ионизации атомов газа необходимо, чтобы энергия, которую приобретает электрон на длине свободного пробега $\Delta W_\lambda = e\lambda \frac{d\varphi}{dn}$ была бы не меньше энергии $E_u - E_1 = e(\varphi_u - \varphi_1) = 3.2$ ЭВ.

3. Вывод

В проведенной работе был экспериментально подтвержден вид сеточной характеристики и ионного тока. Были получены значения φ_1 , φ_2 и φ_u , напрямую связанные со свойствами исследуемого газа.