Теоретическое введение

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 £0,£,,£2,...,£я, образующими дискретный ряд. При движении электронов по соответствующим этим состояниям ста­ционарным орбитам никакого излучения или поглощения энер­гии не происходит. Всякое изменение энергии атома может про­исходить только скачком в результате перехода между указан­ными выше энергетическими состояниями.
2. При переходе из одного энергетического состояния Ет в другое Еп поглощается или излучается строго определенная пор­ция (квант) электромагнитной энергии. Энергия кванта связана с частотой излучения v следующим отношением:

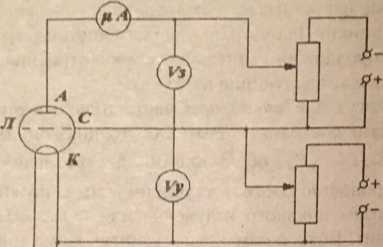
hv = Em-En>

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 <ру ~(рс -<р^, ускоряющая

электроны (потенциал сетки по отношению к катоду <ру называ­ют ускоряющим потенциалом). Разность потенциалов между

анодом и сеткой имеет, как правило, противоположный знак и носит название потенциала задержки <р3 \* <ра -<рс < 0.



Р Р

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

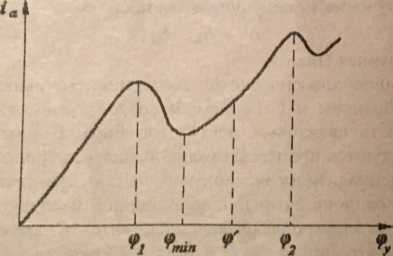


Рис. 2. Анодно-сеточная характеристика газонаполненной лампы.

В ходе выполнения эксперимента снимается анодно­сеточная характеристика газонаполненной лампы, т. е. зависи­мость анодного тока ia от ускоряющего потенциала щ при по­стоянном потенциале задержки Типичный вид этой характе­ристики приведен на рис 2.

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

д w ~we—«we, е *м е*

где т и А/ - 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 $>, имеют энергию, примерно равную е<р (здесь не учтена начальная скорость вылета электронов с ка­тода).

При q>y > q>3 электроны пролетают через сетку, имея

энергию, достаточную для преодоления задерживающего потен­циала, и достигают анода. Как и в обычных электронных лампах, с ростом потенциала сетки (ру анодный ток возрастает. Этот про­цесс продолжается до тех пор, пока фу не достигнет величины

так называемого первого критического потенциала (его назы­вают также резонансным потенциалом), при котором электроны приобретают энергию, достаточную для возбуждения атома. Столкновения электронов, имеющих энергию е<рх, с атомами мо­гут происходить неупруго. При этом электрон в процессе столк­новения всю свою энергию передает атому. Величина критиче-

ского потенциала <рх связана с разностью энергии возбужденного Ех и невозбужденного Е0 атомов законом сохранения энергии:

е<Р\ = Ех *-Е0.*

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

При дальнейшем увеличении q>y поверхность с потен­циалом <рх (а, следовательно, и область неупругих соударений) смещается от сетки к катоду. При <ру > <р^ + \ср3\ электроны, ис-

' пытавшие неупругие соударения на пути к сетке, вновь могут на­брать энергию, превышающую е<р3, и анодный ток опять возрас­тает с ростом <ру. Начиная со значения <ру > 2<рх, 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 {

Я>п = п(Р\ •

Таким образом, опыт Франка-Герца убедительно под­тверждает справедливость первого постулата Бора: атом действи­тельно поглощает энергию только определенными дискретными порциями.

Франк и Герц, выполнив свои эксперименты с парами ртути, показали, что минимальная энергия, которую способен поглотить атом ртути, составляет 4,9 эВ, т. е. величина резонанс­ного потенциала равна 4,9 В. Они установили также, что возбуж­денные до резонансного уровня атомы ртути, переходя в невоз­бужденное состояние, являются источником ультрафиолетового излучения с длиной волны 2537 А. Этот результат находится в полном соответствии со вторым постулатом Бора.

6



Экспериментальная часть

В экспериментальной установке используется переделан­ная манометрическая лампа типа ЛМ-2: ее V-образный катод за­менен прямой нитью накала, в результате вся система электродов приобрела цилиндрическую симметрию. Силовые линии элек­трического поля внутри лампы имеют весьма сложную форму. Это обусловлено несколькими причинами: во-первых, конструк­тивными особенностями сетки (шаг ее витков соизмерим с рас­стояниями от сетки до катода и анода); во-вторых, наличием от­рицательного пространственного заряда у катода (как в обычной электронной лампе) и, наконец, неэквипотенциальностью самой поверхности катода, к концам которого приложено накальное напряжение. В таких условиях, даже экспериментально подобрав оптимальное давление заполняющего лампу газа, на анодно­сеточной характеристике удается получить лишь два хорошо вы­раженных максимума тока. Но для определения резонансного потенциала этого вполне достаточно.

Рассмотрим качественно процессы, происходящие в лам­пе. Подлетая к эквипотенциальной поверхности 5, с критиче­ским потенциалом <рх, электроны имеют энергию, достаточную для возбуждения атома. Однако неупругие столкновения проис­ходят вблизи Sx случайно в пределах длины свободного пробега электронов Я, т. е. существует область неупругих столкновений Q - слой, примыкающий к поверхности 5, (в сторону нарастания потенциала) толщиной порядка Я. Очевидно, что с ростом вели­чины (ру этот слой вначале появляется у витков сетки.

Энергии электронов, испытывающих соударения в раз­личных точках слоя, могут различаться на величину порядка

= еЯ —,

Л

d<p

где — - производная потенциала по нормали к Sx. dn 1

Разброс по энергиям на А Ид расширяет максимум анодно­сеточной характеристики и уменьшает крутизну падающего уча­стка.

Проще всего это понять на "плоской модели" со сплош­ной сеткой, проницаемой для электронов. В такой модели элек­трические поля между катодом и сеткой, сеткой и анодом одно­родны, а эквипотенциальные поверхности, показанные на рис.З штриховыми линиями, представляют собой плоскости, парал­лельные электродам.

А

C:\Users\User\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image4.jpegС

7

v

*/*

*C:\Users\User\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image5.jpeg*

Рис. 3. Силовые линии электрического поля и эквипотенциальные по­верхности между электородами лампы в плоской модели.

C:\Users\User\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image6.jpegАнодный ток будет тем меньше, чем больше неупругих соударений происходит в объеме Q. В этой модели минимум анодного тока будет наблюдаться тогда, когда поверхность Sx с потенциалом д>х сместится от сетки к катоду на длину Я, т. е. при ускоряющем потенциале на сетке

Уменьшение величины Л-2-, очевидно, сужает макси мум анодно-сеточной характеристики (см. рис. 2). Одновременно увеличивается крутизна ее падающего участка.

C:\Users\User\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpegАналогичная картина будет иметь и в реальной лампе. Таким образом, экспериментальная погрешность определения критического потенциала оценивается как:

Заметим далее, что если на длине свободного пробега электрон может набрать энергию, большую разности энергий двух уровней Еп - Ех, то возможно возбуждение всех уровней с энергией, меньшей £„, и даже ионизация атома, если £„ - £, больше энергии ионизации. Поэтому уменьшение длины свобод­ного пробега Я (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 Я нецелесообразно, т. к. при этом электроны до прихода в об­ласть неупругих соударений Q испытывают много упругих столкновений, что увеличивает их разброс по энергиям, и, следо­вательно, уменьшает точность определения резонансного потен­циала.

Для того чтобы качественно объяснить ход анодно­сеточной характеристики, необходимо рассмотреть, как изменя­ется поверхность Sx (а с ней и область Q) с ростом <ру. На рис. 4

изображены сечения эквипотенциальных поверхностей плоско­стью, проходящей через ось симметрии лампы, для последова-

C:\Users\User\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image8.jpegтельно увеличивающихся значений отношения

(справа

на этих рисунках показано примерное распределение потенциа­лов в лампе). Сплошной линией на этих рисунках показана экви­потенциальная поверхность Sa, имеющая потенциал (ра (отно­сительно катода).

Потенциальный рельеф, изображающий энергию элек­трона в различных точках рассматриваемого сечения, можно об­разно представить в виде полотна, натянутого наклонно со спус­ком к аноду; у проволоки сетки полотно оттянуто вниз. На пути от катода к аноду, проходящему посредине между витками сетки, рельеф или непрерывно понижается (рис. 4а и 46), или же на этом пути имеется впадина (рис. 4в).

Будем увеличивать <ру при постоянном <р3, как это необходимо для снятия анодно-сеточной характеристики. Когда Фу достигнет значения фх, у витков сетки появится область неупругих соударений Q, которая при дальнейшем увеличении <РУ удаляется от витков сетки вслед за Sx. На рис. 4 показано

приближенное расположение областей П для трех значений фу,

отмеченных на рис.2, как ф,, <р min и ф' (области, отмеченные соответственно буквами а, б, в на каждом из рис. 4). Хотя поверх­ность Sa смещается при изменении фу, на рисунках это не отра­жено, так как полагается, что фх, ^mjn и ф' мало отличаются друг от друга.

С ростом фу от фх до фт[п область Q растет вначале за счет увеличения толщины слоя (пока расстояние or Sx до сетки меньше Я ), а затем за счет увеличения площади поверхности Sx. Пропорционально растет число неупругих соударений и падает анодный ток. При фу -фх +1^31« фт{п поверхности Sx и Sa сов­падут. Дальнейшее увеличение потенциала фу сопровождается выходом области Q за поверхность Sa в ту часть поля, где энер­гия электронов выше, чем на аноде (области "в" на рис. 4). Элек­троны, столкнувшиеся здесь неупруго, как правило, попадают на анод, и анодный ток с ростом фу вновь начинает возрастать. (На сетку в этом случае летят лишь те электроны, которые потеряли

энергию, находясь вблизи от дна воронки потенциального релье­фа. При <р1 / <ру «1 воронки неглубокие и таких электронов ма­ло.)

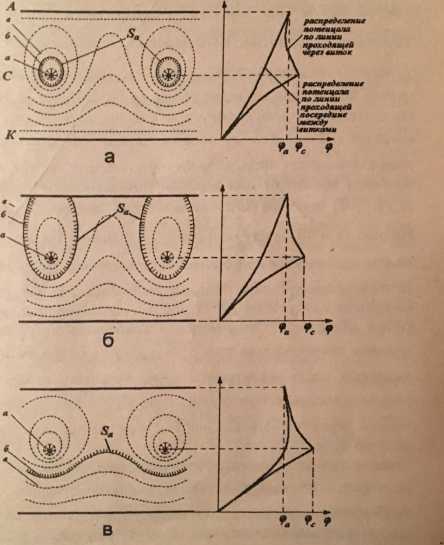


Рис. 4. Распределение потенциала и эквипотенциальные поверхности в реальной лампе для различных значений сеточного напряжения.

С ростом <р от ^ до <ртт Ьбласть П растет вначалеугаснет увс- янчения толщины слоя (пока расстояние от о, jap сетки меньше Я X а затем за счет увеличения площади поверхности Я,. Про- порционально растет число неупругих соударений и падает анод­ный ток. При = р, <ртт поверхности 5, и Sa совпадут.

C:\Users\User\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image10.jpegДальнейшее увеличение потенциала сопровождается выходом

У у

области Q за поверхность Sa в ту часть, поля, где энергия элек­тронов выше, чем на аноде (области "в" на рис. 4). Электроны,

столкнувшиеся здесь неупруго, как правило, попадают на анод, и

\ \*

анодный ток с ростом tpY вновь начинает возрастать. (На сетку в

этом случае летят лишь те электроны, которые потеряли энергию, находясь вблизи от дна воронки потенциального рельефа. При :<РУ « 1 воронки неглубокие и таких электронов мало.)

На рис. 4а и 46 между частями Sa, огибающими соседние витки видны промежутки тем большие, чем меньше отношение g>31 <ру.

В этих промежутках потенциальный рельеф монотонно спадает J на пути от катода к аноду, т.е. часть электронов попадает на анод, минуя область Q. Этим потоком электронов определяется мини­мальное значение тока при <ру = $>mm . Для больших потенциалов задержки, когда реализуются структуры поля, изображенные на рис. 4в, электроны при (pv = $>, +могут попасть на анод

только через область Q, поэтому ток в минимуме может дохо­дить до нуля.

Совершенно аналогично объясняется наличие второго спадающе­го участка на анодно-сеточной характеристике при ру £ 2<рх.

Разберитесь самостоятельно, почему глубина второго провала на характеристике меньше, чем первого. Для этого, очевидно, сле­дует представить себе вид эквипотенциалей при <ру ~ 2q>x и по-

нять, как поведет себя поверхность Sa при изменении <ру от (рх до 2 <рх.

/

/

*г*

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 (<р31 <ру ~ 1), измерить также и потенциал ионизации.

Для этого можно использовать то обстоятельство, что при \р3\ > (ру, электроны, эмитированные катодом, не достигают ано­да, и анодный ток может быть вызван только положительными носителями заряда. В случае \<р31 > <ру > (ри наличие анодного тока связано с процессами ионизации электронным ударом в ок­рестностях сетки. Когда <ру достигнет значения <ри, 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 «пе- реполюсовку» амперметра (заметим, что название ’’анод" в этом случае оказывается чисто условным).

Ранее утверждалось, что для точного определения резо­нансного потенциала необходимо избежать перекрытия различ­ных ступеней возбуждения; а в этом случае электроны на длине свободного пробега должны набирать энергию, не превышаю­щую разности уровней Е2 - Е{. Для ионизации же необходимо, чтобы энергия, полученная электроном на длине свободного про­бега, была бы не меньше Еи - Е] ( Еи - 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 — во вто-

dn

ром случае будет существенно выше, следовательно, и электрон в этом случае может набрать на длине свободного пробега сущест­во

венно большую энергию ДИ'д = еЯ —.

dn

Задание

1. Определение резонансного уровня.

Выберите ток накала (не превышая максимально допустимого) и небольшой потенциал задержки, при которых хорошо обна­руживаются два максимума на анодно-сеточной характеристи­ке. Снимите анодно-сеточную характеристику при выбранном режиме. Постройте график анодно-сепгочной характеристики.. Определите резонансный потенциал и разность уровней Е|-£0.

1. Определение ионизационного потенциала.

При <р> (ру найдите скачок ионного тока. Снимите анодно­сеточные характеристики при 2-3 значениях ф3, превышающих Фу на 1-S вольт. Определите потенциал ионизации. Оцените изменение энергии ДЖЯ на длине свободного пробега в области ионизации. Сравните Д0д с величиной е{фы-9?,).



Вопросы

1. Для наполнения ламп в опыте Франка-Герца обычно исполь­зуют инертные газы и пары металлов, т. к. они не образуют отри­цательных ионов, т. е. не захватывают электронов.

Как изменится вид анодно-сеточной характеристики в условиях опыта, если рабочий газ с заметной вероятностью захватывает электроны? Можно ли в этом случае определить разности энерге­тических уровней атомов и их ионизационные потенциалы?

1. Будет ли в условиях опыта соблюдаться равенство <рх = <р2 - <рх (см. рис.1)?

Потенциал <рх или разность хрг - <рх следует считать резонансным потенциалом и почему?

1. Известно, что в результате термоэлектронной эмиссии элек­троны вылетают из катода, имея различные скорости. Повлияет ли это обстоятельство на точность определения резонансного по­тенциала?
2. Как изменятся анодно-сеточные характеристики с увеличением густоты сетки лампы?
3. Почему выполнение условия |^3| > <ру необходимо для наблю­дения скачка анодного тока при ионизации?
4. С чем связано изменение знака анодного тока при наблюдении ионизации?

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 5. Атомная и ядерная физика. Ч. 1. - М.: Наука, 1986.
2. Матвеев АЛ. Атомная физика. - М.: Высшая школа, 1989.