

### 4.2.1 Источники рентгеновского излучения.

Источниками рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, некоторые радиоактивные изотопы (одни из них непосредственно испускают рентгеновские лучи, ядерные излучения других (электроны или  $\alpha$ -частицы) бомбардируют металлическую мишень, которая испускает рентгеновские лучи), Интенсивность рентгеновского излучения изотопных источников на несколько порядков меньше интенсивности излучения рентгеновской трубки, но габариты, вес и стоимость изотопных источников несравненно меньше, чем установки с рентгеновской трубкой. Источниками мягких рентгеновских лучей с  $l$  порядка единиц и десятков нм могут служить синхротроны и накопители электронов с энергиями в несколько Гэв, а также лазеры. По интенсивности рентгеновское излучение синхротронов превосходит в указанной области спектра излучение рентгеновской трубки на 2—3 порядка.

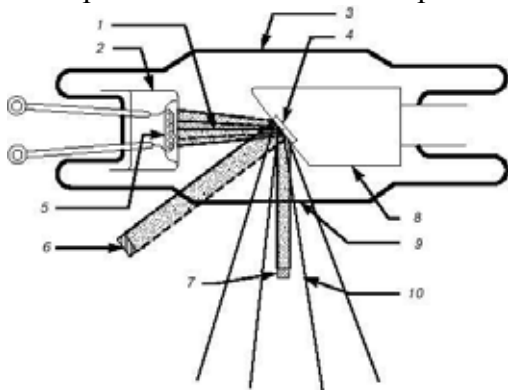
Естественные источники рентгеновских лучей – солнечная корона и другие космические объекты.

Приемниками рентгеновского излучения могут быть фотопленка, люминесцентные экраны, детекторы ядерных излучений.

**Электронная пушка** (электронный прожектор), устройство для создания направленного потока электронов; применяется в телевизионных трубках, рентгеновской аппаратуре, электронных микроскопах. В телевизионном приемнике электронная пушка используется для развертки изображения по экрану кинескопа.

**Рентгеновская трубка** - электровакуумный прибор для получения рентгеновских лучей. Простейшая рентгеновская трубка состоит из стеклянного баллона с впаянными электродами - катодом и анодом (антикатодом). Электроны, испускаемые катодом, ускоряются сильным электрическим полем в пространстве между электродами и бомбардируют анод. При ударе электронов об анод их кинетическая энергия частично преобразуется в энергию рентгеновского излучения.

Рентгеновские трубки различают: по способу получения потока электронов — с термоэмиссионным (подогревным) катодом, автоэмиссионным (острийным) катодом, катодом, подвергаемым бомбардировке положительными ионами и с радиоактивным ( $\beta$ ) источником электронов; по способу вакуумирования — отпаянные, разборные; по времени излучения — непрерывного действия, импульсные; по типу охлаждения анода — с водяным, масляным, воздушным, радиационным охлаждением; по размерам фокуса (области излучения на аноде) — макрофокусные, острофокусные и микрофокусные; по его форме — кольцевой, круглой, линейчатой формы; по способу фокусировки электронов на анод — с электростатической, магнитной, электромагнитной фокусировкой.



**Рис. 16.** Рентгеновская трубка Кулиджа. При бомбардировке электронами вольфрамовой антикатод испускает характеристическое рентгеновское излучение. Поперечное сечение рентгеновского пучка меньше реально облучаемой площади. 1 – электронный пучок; 2 – катод с фокусирующим электродом; 3 – стеклянная оболочка (трубка); 4 – вольфрамовая мишень (антикатод); 5 – нить накала катода; 6 – реально облучаемая площадь; 7 – эффективное фокальное пятно; 8 – медный анод; 9 – окно; 10 – рассеянное рентгеновское излучение.

В рентгеновской трубке, разработанной Кулиджем (**Рис.16**), источником электронов является вольфрамовый катод, нагреваемый до высокой температуры. Электроны ускоряются до больших скоростей высокой разностью потенциалов между анодом (или антикатодом) и катодом. Поскольку электроны должны достичь анода без столкновений с атомами, необходим очень высокий вакуум, для чего нужно хорошо откачать трубку. Этим также снижаются вероятность ионизации оставшихся атомов газа и обусловленные ею побочные токи.

Электроны фокусируются на аноде с помощью электрода особой формы, окружающего катод. Этот электрод называется фокусирующим и вместе с катодом образует «электронный прожектор» трубки. Подвергаемый электронной бомбардировке анод должен быть изготовлен из тугоплавкого материала, поскольку большая часть кинетической энергии бомбардирующих электронов превращается в тепло. Кроме того, желательно, чтобы анод был из материала с большим атомным номером, т.к. выход рентгеновского излучения растет с увеличением атомного номера. В качестве материала анода чаще всего выбирается вольфрам, атомный номер которого равен 74.

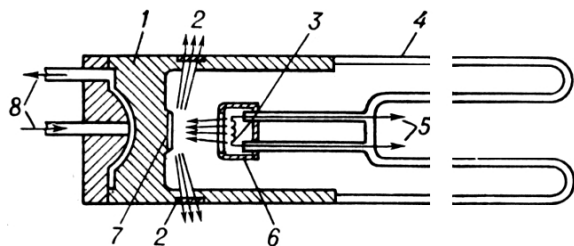


**Рис.17.** Рентгеновские трубки разных конструкций.

Конструкция рентгеновских трубок может быть разной в зависимости от условий применения и предъявляемых требований.

Рентгеновские трубки применяют в рентгеновском структурном анализе (**Рис.17,а**), рентгеновском спектральном анализе, дефектоскопии (**Рис.17,б**) рентгедиагностике (**Рис.17,в**), рентгенотерапии, рентгеновской микроскопии и микрорентгенографии. Наибольшее применение во всех областях находят отпаянные рентгеновские трубки с термоэмиссионным катодом, водоохлаждаемым анодом, электростатической системой фокусировки электронов (**Рис.18**). Термоэмиссионный катод рентгеновской трубки обычно представляет собой спираль или прямую нить из вольфрамовой проволоки, накаливаемую электрическим током. Рабочий участок анода — металлическая зеркальная поверхность — расположен перпендикулярно или под некоторым углом к потоку электронов. Для

получения сплошного спектра рентгеновского излучения высоких энергий и интенсивности используют аноды из  $\text{Au}$ ,  $\text{W}$ ; в структурном анализе пользуются рентгеновские трубки с анодами из  $\text{Ti}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Ag}$ . Основные характеристики рентгеновской трубки - предельно допустимое ускоряющее напряжение (1-500 кВ), электронный ток (0,01 мА — 1А), удельная мощность, рассеиваемая анодом ( $10 - 10^4$  Вт/мм<sup>2</sup>), общая потребляемая мощность (0,002 Вт — 60 кВт) и размеры фокуса (1 мкм — 10 мм). КПД рентгеновской трубки составляет 0,1—3%.



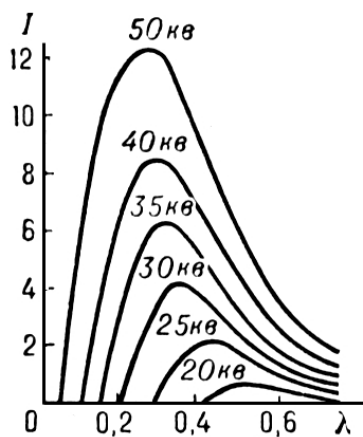
**Рис. 18.** Схема рентгеновской трубки для структурного анализа: 1 — металлический анодный стакан (обычно заземляется); 2 — окна из бериллия для выхода рентгеновского излучения; 3 — термоэмиссионный катод; 4 — стеклянная колба, изолирующая анодную часть трубки от катодной; 5 — выводы катода, к которым подводится напряжение накала, а также высокое (относительно анода) напряжение; 6 — электростатическая система фокусировки электронов; 7 — анод (антикатод); 8 — патрубки для ввода и вывода проточной

воды, охлаждающей анодный стакан.

При обычном способе получения рентгеновского излучения получают широкий диапазон длин волн, который называют рентгеновским спектром.

**Рентгеновские спектры** - спектры испускания и поглощения рентгеновских лучей, т. е. электромагнитного излучения в области длин волн от  $10^5$  до  $10^2$  нм.

В спектре присутствуют ярко выраженные компоненты (**Рис.4**) - спектр излучения рентгеновской трубки представляет собой наложение тормозного и характеристического рентгеновского спектра. Тормозной рентгеновский спектр возникает при торможении заряженных частиц, бомбардирующих мишень. Интенсивность тормозного спектра быстро растет с уменьшением массы бомбардирующих частиц и достигает значительной величины при возбуждении электронами. Тормозной рентгеновский спектр -

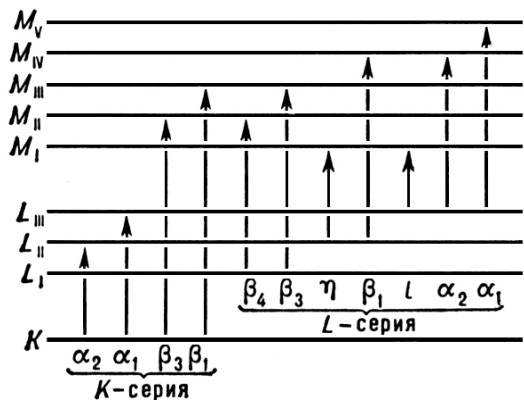


сплошной, так как частица может потерять при тормозном излучении любую часть своей энергии. Он непрерывно распределён по всем длинам волн  $l$ , вплоть до коротковолновой границы  $l_0 = hc/eV$  ( $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $e$  — заряд бомбардирующей частицы,  $V$  — пройденная ею разность потенциалов). С возрастанием энергии частиц интенсивность тормозного рентгеновского спектра растет, а  $l_0$  смещается в сторону коротких волн (**Рис.19**). С увеличением порядкового номера  $Z$  атомов мишени  $I$  также растет.

**Рис.19.** Распределение интенсивности  $I$  тормозного излучения  $W$  по длинам волн  $l$  при различных напряжениях  $V$  на рентгеновской трубке.

Широкий «континуум» называют непрерывным спектром или белым излучением. Налагающиеся на него острые пики называются характеристическими рентгеновскими линиями испускания. Хотя весь спектр есть результат столкновений электронов с веществом, механизмы возникновения его широкой части и линий разные. Вещество состоит из большого числа атомов, каждый из которых имеет ядро, окруженное электронными оболочками, причем каждый электрон в оболочке атома данного элемента занимает некоторый дискретный уровень

энергии. Обычно эти оболочки, или энергетические уровни, обозначают символами  $K, L, M$  и т.д., начиная от ближайшей к ядру оболочки. Когда налетающий электрон, обладающий достаточно большой энергией, соударяется с одним из связанных с атомом электронов, он выбивает этот электрон с его оболочки. Опустевшее место занимает другой электрон с оболочки, которой соответствует большая энергия. Этот последний отдает избыток энергии, испуская рентгеновский фотон. Поскольку электроны оболочек имеют дискретные значения энергии, возникающие рентгеновские фотоны тоже обладают дискретным спектром. Этому соответствуют острые пики для определенных длин волн, конкретные значения которых зависят от элемента-мишени. Так как энергии  $E_1$  начального и  $E_2$  конечного состояний атома квантованы, возникает линия рентгеновского спектра с частотой  $\nu = (E_1 - E_2)/h$ . Все



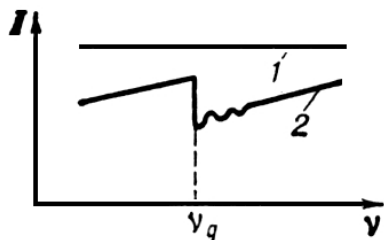
возможные излучательные квантовые переходы атома из начального  $K$ -состояния образуют наиболее жёсткую (коротковолновую)  $K$ -серию. Аналогично образуются  $L$ -,  $M$ -,  $N$ -серии (Рис.20).

**Рис.20.** Схема  $K$ -,  $L$ -,  $M$ -уровней атома и основные линии  $K$ - и  $L$ -серий.

Таким образом, характеристические линии образуют  $K$ -,  $L$ - и  $M$ -серии, в зависимости от того, с какой оболочки ( $K, L$  или  $M$ ) был удален электрон. Соотношение между длиной волны рентгеновского излучения и атомным номером называется законом Мозли (Рис.7).

Каждая серия характеристического рентгеновского спектра возбуждается при прохождении бомбардирующими частицами определённой разности потенциалов - потенциала возбуждения  $V_q$  ( $q$  — индекс возбуждаемой серии). При дальнейшем росте  $V$  интенсивность  $I$  линий этого спектра растёт пропорционально  $(V - V_q)^2$  затем рост интенсивности замедляется и при  $V \gg 11V_q$  начинает падать. Относительные интенсивности линий одной серии определяются вероятностями квантовых переходов и, следовательно, соответствующими правилами отбора. Кроме наиболее ярких линий дипольного электрического излучения, в характеристическом рентгеновском спектре могут быть обнаружены линии квадрупольного и октупольного электрических излучений и линии дипольного и квадрупольного магнитных излучений.

Если электрон наталкивается на относительно тяжелое ядро, то он тормозится, а его кинетическая энергия выделяется в виде рентгеновского фотона примерно той же энергии. Если же он пролетит мимо ядра, то потеряет лишь часть своей энергии, а остальную будет передавать попадающим на его пути другим атомам. Каждый акт потери энергии ведет к излучению фотона с какой-то энергией. Возникает непрерывный рентгеновский спектр, верхняя граница которого соответствует энергии самого быстрого электрона. Таков механизм образования непрерывного спектра, а максимальная энергия (или минимальная длина волны), фиксирующая границу непрерывного спектра, пропорциональна ускоряющему напряжению, которым определяется скорость налетающих электронов. Спектральные линии характеризуют материал бомбардируемой мишени, а непрерывный спектр определяется энергией электронного пучка и практически не зависит от материала мишени.



**Рис. 21.** Зависимость интенсивности  $I$  тормозного рентгеновского спектра от частоты  $\nu$  вблизи  $\nu_q$ : 1 — без поглотителя; 2 — после прохождения поглотителя.

Рентгеновское излучение можно получать не только электронной бомбардировкой, но и облучением мишени рентгеновским же излучением от другого источника. В этом случае, однако, большая часть энергии падающего пучка переходит в характеристический рентгеновский спектр и очень малая ее доля приходится на непрерывный. Очевидно, что пучок падающего рентгеновского излучения должен содержать фотоны, энергия которых достаточна для возбуждения характеристических линий бомбардируемого элемента. Высокий процент энергии, приходящейся на характеристический спектр, делает такой способ возбуждения рентгеновского излучения удобным для научных исследований.

Рентгеновский спектр поглощения получают, пропуская первичное рентгеновское излучение непрерывного спектра через тонкий поглотитель. При этом распределение интенсивности по спектру изменяется — наблюдаются скачки и флуктуации поглощения, которые и представляют собой рентгеновский спектр поглощения. Для каждого уровня рентгеновского спектра поглощения имеют резкую низкочастотную (длинноволновую) Границу  $\nu_q (h\nu_q = eV_q)$ , при которой наблюдается первый скачок поглощения (Рис. 21).