

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

## **РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

*Учебное пособие для вузов*

Составители:  
В.Р. Гитлин, Ю.В. Иванков,  
Д.Е. Любашевский, Л.В. Титова

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2017

# 1. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

## 1.1 Положение на шкале электромагнитных волн

**Рентгеновское излучение (РИ)** — электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на шкале электромагнитных волн между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением (от  $\sim 10$  эВ до  $\sim 1$  МэВ), что соответствует длинам волн от  $\sim 10^3$  до  $\sim 10^{-2}$  Å (от  $\sim 10^{-7}$  до  $\sim 10^{-12}$  м).

РИ характеризуется:

### 1. Волновым вектором $k$

$$|k| = 2\pi / \lambda = \omega / c.$$

### 2. Амплитудой $A$ (а точнее, амплитудами $E$ и $H$ ).

### 3. Поляризацией

В комплексном виде:

$$\hat{a}(t) = A \exp[i(\omega t + \varphi)] = \hat{A} \exp(i\omega t).$$

В теории дифракции РИ часто считают  $|k| = 1 / \lambda$ .

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – невидимое излучение, способное проникать, хотя и в разной степени, во все вещества. Представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны порядка  $10^{-8}$  см. Как и видимый свет, рентгеновское излучение вызывает почернение фотопленки. Это его свойство имеет важное значение для медицины, промышленности и научных исследований. Проходя сквозь исследуемый объект и падая затем на фотопленку, рентгеновское излучение изображает на ней его внутреннюю структуру. Поскольку проникающая способность рентгеновского излучения различна для разных материалов, менее прозрачные для него части объекта дают более светлые участки на

кинетическую энергию. При этом большая ее часть переходит в тепло, а небольшая доля, обычно менее 1%, преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Эта энергия высвобождается в форме квантов - частиц, называемых фотонами, которые обладают энергией, но масса покоя которых равна нулю. Рентгеновские фотоны различаются своей энергией, обратно пропорциональной их длине волны. При обычном способе получения рентгеновского излучения получают широкий диапазон длин волн, который называют рентгеновским спектром. В спектре присутствуют ярко выраженные компоненты, как это показано на рис. 1. 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 К, L, М 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. Характеристические линии образуют К-, L- и М-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. 2).

$$\sqrt{\nu} = A(Z - B),$$

где  $Z$  - атомный номер элемента анода,  $A$  и  $B$  - константы для определённого значения главного квантового числа  $n$  электронной оболочки).

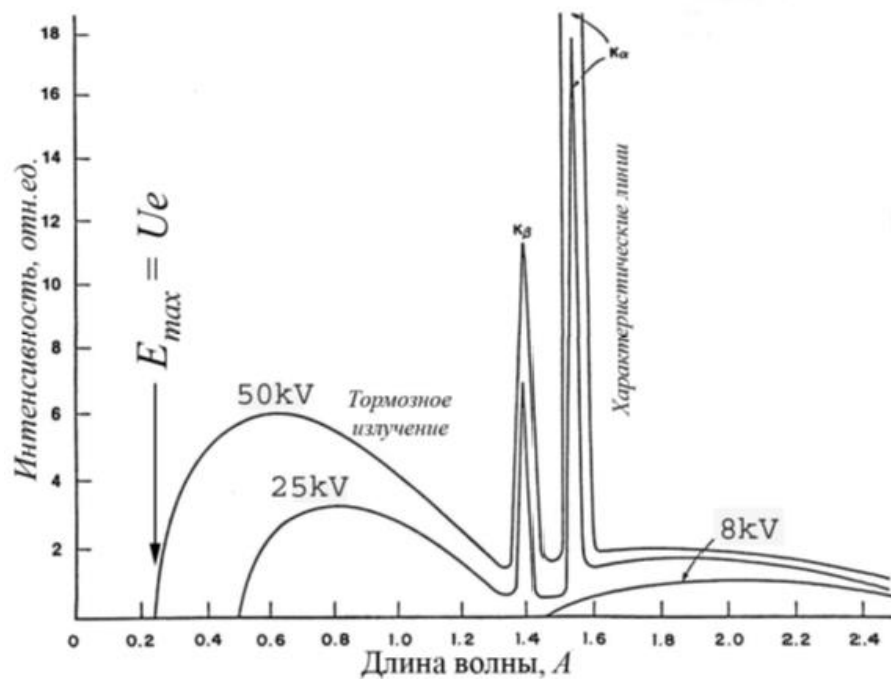


Рис. 1. Обычный рентгеновский спектр состоит из непрерывного спектра (континуума) и характеристических линий (острые пики). Линии  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  возникают вследствие взаимодействий ускоренных электронов с электронами внутренней K-оболочки.

## 2. 1. Источники РИ.

Рентгеновские лучи возникают при сильном ускорении заряженных частиц (в основном электронов) либо же при высокоэнергетичных переходах в электронных оболочках атомов или молекул. Оба эффекта используются в рентгеновских трубках, в которых электроны, испущенные

раскалённым катодом, ускоряются (при этом рентгеновские лучи не испускаются, т.к. ускорение слишком мало) и ударяются об анод, где они резко тормозятся (при этом испускаются рентгеновские лучи: т. н. тормозное излучение) и в то же время выбивают электроны из внутренних электронных оболочек атомов металла, из которого сделан анод.

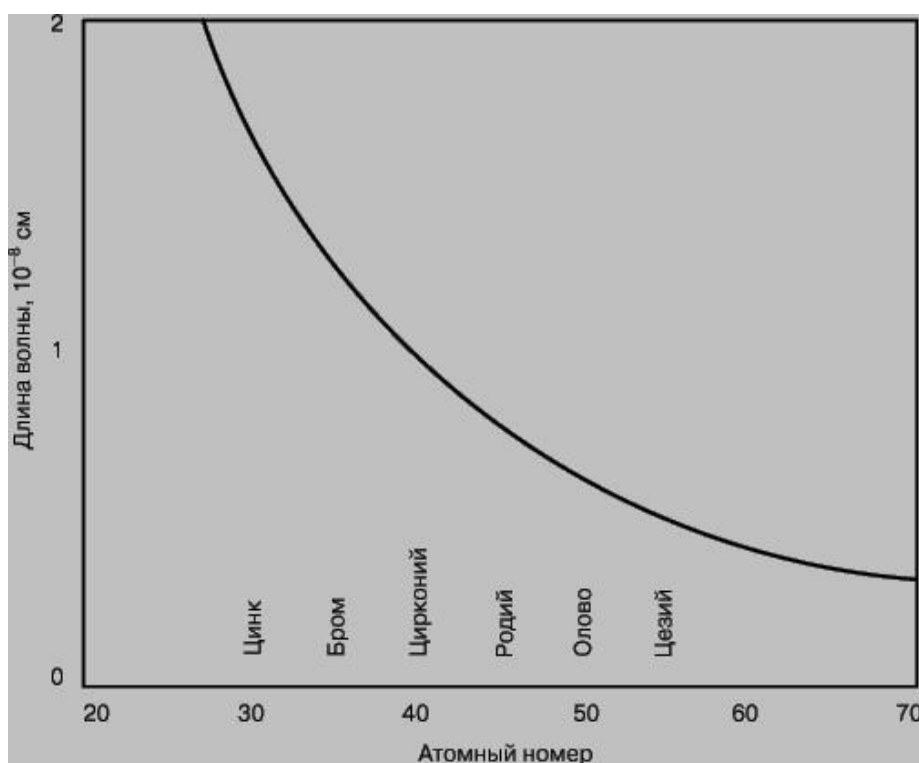


Рис. 2. Длина волны характеристического рентгеновского излучения, испускаемого химическими элементами, зависит от атомного номера элемента. Кривая соответствует закону Мозли: чем больше атомный номер элемента, тем меньше длина волны характеристической линии.

Для получения РИ используются также изотопные источники:

- Распад  $K$  – захватом:  $^{55}\text{Fe} + e^- \rightarrow ^{55}\text{Mn} + \nu_e$ , ( $T_{1/2}=2,6$  года)
- Практически чистая  $K$  – серия (без тормозного излучения).
- Таких изотопов сравнительно немного, например  $^{26}\text{Al}$  (Mg K),  $^{59}\text{Ni}$  (Co K) и т.п.

Рентгеновское излучение можно получать также и на ускорителях заряженных частиц. Т.н. синхротронное излучение возникает при

отклонении пучка частиц в магнитном поле, в результате чего они испытывают ускорение в направлении, перпендикулярном их движению. Синхротронное излучение имеет сплошной спектр с верхней границей. При соответствующим образом выбранных параметрах (величина магнитного поля и энергия частиц) в спектре синхротронного излучения можно получить и рентгеновские лучи, интенсивность которых – в  $10^6 - 10^{20}(!)$  раз выше, чем у рентгеновской трубки. Они имеют протяженный гладкий спектр, поляризованное излучение.

## 2.2. Лабораторные источники. Рентгеновская трубка.

Рентгеновские лучи возникают при сильном ускорении заряженных частиц (тормозное излучение), либо при высокоэнергетических переходах в электронных оболочках атомов или молекул. Оба эффекта используются в рентгеновских трубках. Основными конструктивными элементами таких трубок являются металлические катод и анод (ранее называвшийся также *антикатодом*). В рентгеновских трубках электроны, испущенные катодом, ускоряются под действием разности электрических потенциалов между анодом и катодом (при этом рентгеновские лучи не испускаются, так как ускорение слишком мало) и ударяются об анод, где происходит их резкое торможение. При этом за счёт тормозного излучения происходит генерация излучения рентгеновского диапазона, и одновременно выбиваются электроны из внутренних электронных оболочек атомов анода. Пустые места в оболочках занимают другими электронами атома. При этом испускается рентгеновское излучение с характерным для материала анода спектром энергий (характеристическое излучение, частоты определяются законом Мозли).

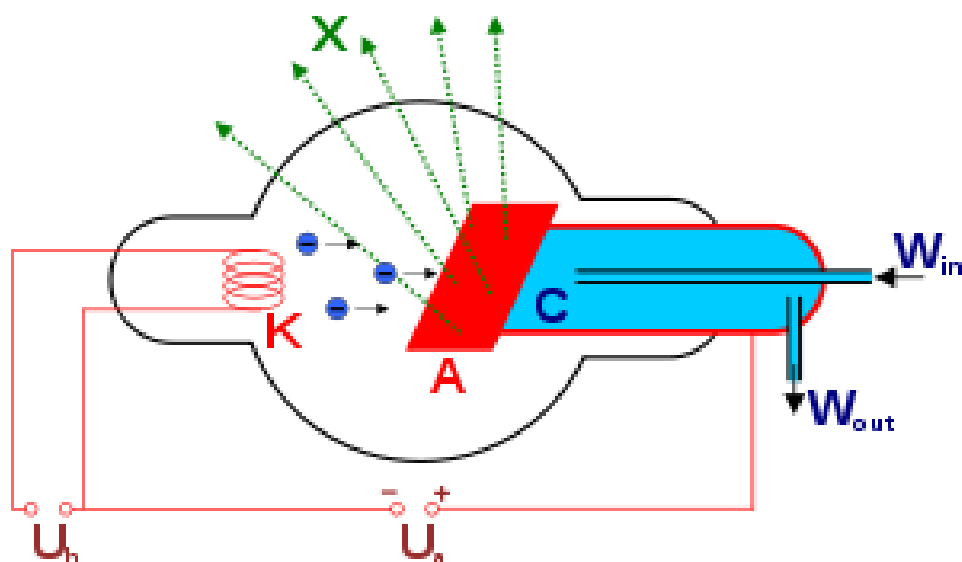


Рис.3. Схематическое изображение рентгеновской трубки. X – рентгеновские лучи, K – катод, A – анод (иногда называемый антикатодом), C – теплоотвод,  $U_h$  – напряжение накала катода,  $U_a$  – ускоряющее напряжение,  $W_{in}$  – впуск водяного охлаждения,  $W_{out}$  – выпуск водяного охлаждения,  $U_a \sim 40 \text{ КэВ}$ . Давление воздуха в трубке  $P < 10^{-9} \text{ мбар}$ .

В процессе ускорения-торможения лишь около 1% кинетической энергии электрона идёт на рентгеновское излучение, 99 % энергии превращается в тепло.

Таблица 1. Длины волн спектральных линий K-серий (нм) для ряда анодных материалов

	K $\alpha$	<u>K<math>\alpha_1</math></u>	K $\alpha_2$	K $\beta_1$	K $\beta_2$
<u>Fe</u>	0,193735	0,193604	0,193998	0,17566	0,17442
<u>Cu</u>	0,154184	0,154056	0,154439	0,139222	0,138109