

УДК 53(09):539.1]:620.179.152.1

С.С. Пивоваров

Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка

ВІДКРИТТЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Відомо, що існує багато рентгенівських методів дослідження. Ще в ХХ ст. було розроблено ряд таких методів. Різні вчені пропонували свої підходи до вирішення тієї чи іншої проблеми. Деякі рентгенівські методи дослідження в чомусь давали позитивний результат, а щось в даному методі не можна було дослідити. Тому саме зараз немає необхідності пропагувати рентгенівські методи дослідження, а навпаки, доречніше перевірити їх функціональність, при впливі рентгенівського випромінювання на речовину і вказати недоліки, щоб надалі розробляти методи, які врахують це. Незважаючи на досягнуті успіхи в розробці джерел і засобів детектування рентгенівського випромінювання, прогрес науки і технологій постійно вимагає їх вдосконалення для вирішення все нових завдань. Поліпшення якого-небудь з критичних параметрів, наприклад яскравості джерела або просторового або тимчасового дозволу детекторів, негайно генерує сучасні високі наукові та медичні технології.

Мета роботи: детально розглянути історію відкриття рентгенівського випромінювання, його види та властивості. А також джерела виникнення, зокрема рентгенівські трубки. Взаємодію рентгенівського випромінювання з твердими тілами, а також його застосування.

Рентгенівське випромінювання – електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль від $10\text{-}4\text{\AA}$ до 102\AA . Фотони рентгенівського випромінювання мають енергію від 100 eV до 250 keV , що відповідає випромінюванню з частотою від $3\cdot 10^{16}\text{ Гц}$ до $6\cdot 10^{19}\text{ Гц}$ і довжиною хвилі $0,005 - 10\text{ нм}$. М'який рентген характеризується найменшою енергією фотона і частотою випромінювання, а жорсткий рентген володіє найбільшою енергією фотона і частотою випромінювання. 8 листопада 1895 році професор університету баварського міста Вюрцбурга на півдні Німеччини Вільгельм Конрад Рентген (1845-1923 рр.) вперше спостерігав, невідомі раніше промені, проникаючі через непрозорі перешкоди. Потім на зборах Вюрцбурзького фізико-медичного товариства 28 грудня 1895 ректор Вюрцбурзького університету 50-річний Вольфганг К. Рентген вперше повідомив про новий вид променів, відкритих ним, а також про перші результати дослідження їх властивостей.

Він встановив, що вакуумна трубка, загорнута в чорний папір, при включенні високої напруги випускала невідомі раніше промені, які засвічували фотоматеріали також загорнуті в чорний папір і примушували світитися люмінесцентні речовини. Промені проходили не тільки через папір, але й через книгу, дерев'яний ящик і листовий алюміній. Вони давали тіньові зображення різних предметів в дерев'яній і паперовій упаковці і, що справило найсильніше враження - Рентген побачив зображення скелета своєї руки, вміщеній між упакованої в чорний папір трубкою і люмінесцентним екраном. Мабуть ні до, ні після Рентгена жодне фізичне відкриття не

викликало такого потужного резонансу не тільки в Німеччині, але й у всьому світі. Інтерес порушили вже перші фотографії, які зробив Рентген ще до своєї першої доповіді. Це були зображення бусолі, дерев'яного ящика, в якому були видні важки які знаходилися всередині, і, нарешті, сама знаменита - фотографія лівої руки пані Рентген, зроблена 22 грудня 1895 р. У трьох невеликих статтях, опублікованих протягом одного року після першого повідомлення, дано настільки вичерпний опис властивостей рентгенівських променів, що сотні робіт, що послідували потім протягом 12 років, не змогли ні додати, ні змінити чогось істотного. І це незважаючи на те, що серед авторів було не мало видатних фізиків. Рентген першим усвідомив практичну важливість свого відкриття. Фотознімок руки визначив блискучу долю рентгенівських променів в медицині. У першій опублікованій статті він також звернув увагу на застосування променів для контролю якості виробів і матеріалів. У третій статті на підтвердження цього наведено знімок двостволки зарядженої патроном при цьому більш чітко були видні внутрішні дефекти зброї. Незабаром рентгенівські промені почали застосовуватися в криміналістиці, мистецтвознавстві та інших областях.[6, 133]

Було виявлено, що рентгенівське випромінювання, невидиме для людини, поглинається в непрозорих об'єктах тим сильніше, чим більше атомний номер (щільність) перешкоди, тому рентгенівські промені легко проходять через м'які тканини людського тіла, але затримуються кістками скелета. Були сконструйовані джерела потужних рентгенівських променів, що дозволяють просвічувати металеві деталі і знаходити в них внутрішні дефекти.

Задовго до перших досліджень Рентгена χ -промені спостерігав український фізик світового рівня, родом з Тернопільщини Іван Пулюй (1845-1918 р.).

Важко переоцінити роль І.Пулюя у дослідженні χ -променів. Ще на початку 1895 року І.Пулюй спостерігав дію невидимих променів, проте не поспішав повідомляти про них науковий світ. Після попереднього повідомлення про відкриття нового виду променів, яке Рентген зробив 28 грудня 1895 року, І.Пулюй 13 лютого і 5 березня 1896 року опублікував дві статті про виникнення та фотографічну дію χ -променів, і лише 9 березня 1896 року та у травні 1897 року з'являються статті Рентгена, присвячені результатам досліджень властивостей χ -променів. Крім того І.Пулюю належить першість у відкритті іонізаційної здатності χ -променів, у дослідженні їх просторового розподілу та поясненні механізму виникнення.[11]

Німецький фізик Лауе передбачив, що рентгенівські промені є таким же електромагнітним випромінюванням, як промені видимого світла, але з меншою довжиною хвилі і до них застосовні всі закони оптики, у тому числі можлива дифракція. Лауе передбачив, що рентгенівські промені мають довжину хвилі, близьку до відстані між окремими атомами в кристалах, тобто атоми в кристалі створюють дифракційні ґрати для рентгенівських променів. Рентгенівські промені, направлені на поверхню кристала, відбилися на фотопластину, як передбачалося теорією. Будь-які зміни в положенні атомів впливають на дифракційну картину, і, вивчаючи дифракцію рентгенівських променів, можна упізнати розташування атомів в кристалі і зміну цього розташування при будь-яких фізичних, хімічних і механічних діях на кристал. У 1907 р. В. Він (1864-1928), вимірюючи енергію фотоелектронів, які звільнялися під дією

рентгенівського випромінювання, визначив довжину його хвилі. Було встановлено, що довжина хвилі $\lambda = 7 \cdot 10^{-5}$ мкм. Таким чином було доведено, що рентгенівське випромінювання має ту саму природу, що й світло, і відрізняється від нього лише досить малими довжинами хвиль.[6, 256]

Відомі такі способи одержання рентгенівських променів:

1. Рентгенівські трубки з гарячим катодом;
2. Рентгенівські трубки з холодним катодом;
3. Синхротронне випромінювання (зокрема, ондуляторне);
4. Газорозрядні трубки.

Рентгенівські трубки з гарячим катодом в даний час найбільш часто зустрічаються в рентгенівській апаратурі. Спрощено, така трубка являє собою вакуумний діод з прозорим (в рентгенівському діапазоні) вікном для виведення випромінювання. На (рис.1) наведена схема рентгенівської трубки.

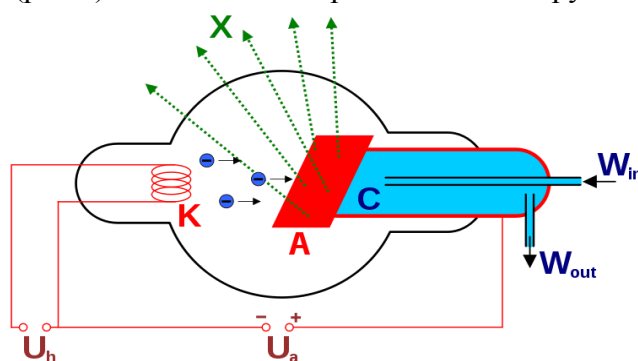


Рис. 1. Схема рентгенівської трубки

У скляну трубку введено електроди: K (катод) і A (анод). Катод розжарення є джерелом електронів. Між катодом і анодом підтримується різниця потенціалів U в десятки і сотні кіловольтів. Електрони, які набули високих енергій у прискорювальному електричному полі, бомбардують анод A , площина якого утворює з напрямом руху електронів кут 45° . Внаслідок цього рентгенівське випромінювання, що виникає при гальмуванні електронів анодом, виходить із трубки через отвір захисного свинцевого екрану. Щоб змінити інтенсивність рентгенівського випромінювання, змінюють струм розжарення катода. За принципом одержання електронних пучків рентгенівські трубки поділяють на три типи: іонні, електронні та індукційні.[2]

Дослідження показали, що за порівняно низьких напруг рентгенівське випромінювання утворює суцільний спектр. Електрони, що вилітають з катода, під дією зовнішнього електричного поля набувають високих енергій і при досягненні анода гальмуються, внаслідок чого виникає рентгенівське випромінювання. Суцільний спектр рентгенівського випромінювання пояснюється гальмуванням електронів у момент досягнення ними анода. Таке випромінювання називають гальмівним. Майже вся енергія електронів виділяється на аноді у вигляді тепла. Тому в потужних трубках антикатод доводиться інтенсивно охолоджувати.

Характерною особливістю суцільних рентгенівських спектрів є наявність чіткої короткохвильової межі λ_{\min} та незалежність від речовини анода. Із підвищенням

напруги інтенсивність випромінювання збільшується, а короткохвильова межа зміщується в бік коротких хвиль.[8, 56]

У 1897 р. було відмічено, що під впливом рентгенівських променів, падаючих на речовину – неважливо, на тверде тіло, рідину або газ, – виникає вторинне випромінювання. В цьому випромінюванні, яке стали називати характеристичним випромінюванням, проникаюча сила збільшувалася згідно з положенням, займаному випромінюючим елементом в періодичній таблиці. Г.Дж. Мозлі пізніше скористався цим результатом, щоб встановити сенс атомного номера елемента (число одиниць заряду у ядра), що стало важливим кроком до розуміння будови атомного ядра.

Характеристичне рентгенівське випромінювання виникає при вибиванні електрона з внутрішньої електронної оболонки атома. На наступному етапі один з електронів зовнішніх оболонок переходить на внутрішню з випромінюванням кванта світла. Частота цього кванта лежить в рентгенівському діапазоні електромагнітного спектру.

Особливості характеристичних спектрів.

1. На відміну від оптичних лінійчатих спектрів з їх складністю і різноманітністю, рентгенівські характеристичні спектри різних елементів відрізняються простотою і одноманітністю. З ростом атомного номера Z елемента вони монотонно зміщуються в короткохвильову сторону.

2. Характеристичні спектри різних елементів мають подібний характер (однотипні) і не змінюються, якщо елемент, що нас цікавить, знаходиться у сполученні з іншими.

3. Характеристичні спектри складаються з декількох серій. Їх позначають буквами K, L, M, N, O і так далі відповідно до позначень електронних шарів. Кожна серія має невелику кількість ліній, які позначають у порядку зменшення довжини хвилі індексами α, β, γ і т.д. Із усіх серій рентгенівських спектрів найпростішою за своєю структурою є K -серія. Вона складається з трьох ліній: $K_\alpha, K_\beta, K_\gamma$. Найбільшу інтенсивність і найбільшу довжину хвилі має K_α -лінія.

Лінійчасті рентгенівські спектри різних речовин подібні між собою. Це зумовлено подібністю забудови нижніх (найближчих до ядра) підшарів електронами в атомах. [4, 76]

Механізм виникнення лінійчастих рентгенівських спектрів такий. Якщо під впливом падаючих електронів високих енергій на атоми анода вибивається один із двох електронів $1s$ -стану K -шару, то звільнене місце може зайняти електрон з якого-небудь зовнішнього шару (K, L, M, N, O). При цьому виникає K -серія. Аналогічно виникають й інші серії. Характерним є те, що K -серія завжди супроводжується появою інших серій.

Досліджуючи рентгенівські спектри хімічних елементів, Мозлі відкрив у 1913-1914 р. закон, що зв'язує частоту спектральних ліній характеристичного рентгенівського випромінювання з порядковим номером випромінюючого елемента в таблиці Менделєєва (закон Мозлі).

Генрі Мозлі в 1913 р. експериментально простежив, як змінюється довжина хвилі і відповідно частота рентгенівських променів ліній характеристичного спектра у різних елементів. Він встановив закон, який виражає зв'язок між хвильовим числом

спектральної лінії $\nu_0 = 1/\lambda$ і атомним номером Z елемента, що випромінює ці лінії. Так, для K_α -лінії ця залежність має вигляд

$$\nu_{OK_\alpha} = R(Z-1)^2 \left(1 - \frac{1}{2^2} \right) \quad (1.4.1)$$

для ліній інших серій залежність (1.4.1) виражається подібними формулами. Так, для ліній L_α закон Мозлі має вигляд

$$\nu_{OL} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \quad (1.4.2)$$

де R – стала Рідберга; σ – деяка стала величина в межах однієї серії. Величину σ називають сталою екранування. Для K -серії $\sigma=1$, для L -серії $\sigma=7,5$. [7, 128]

Рентгенівські промені, що падають на кристал, розсіюються електронами атома. Кожен електрон атома стає джерелом сферичної електромагнітної хвилі.

Рентгенівські промені мають довжини хвиль $0.01 \div 10 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$), у той час як відстані між атомами кристалічної решітки мають порядок одного ангстрема. Оскільки, на відміну від видимого світла, ці відстані можуть виявитися приблизно одного порядку, для рентгенівських променів з $\lambda \sim 1 \div 10 \text{ \AA}$ кристал може служити тривимірною дифракційною решіткою. Видиме ж світло не помічає періодичні просторові неоднорідності в його структурі, оскільки вони за масштабами значно менше його довжини хвилі. [5, 34]

Дифракційна картина, що виникає на фотопластинці, поставленої на шляху рентгенівських пучків, розсіяних монокристалом в дослідах типу Лауе, називається лауеграмами. [10]

Рентгенівська дифракційна техніка використовується фахівцями по матеріалам, мінералогами, керамістами і біологами. Вона допомогла вирішити ряд проблем, починаючи з діагностики внутрішніх напружень у металевих деталях машин і закінчуючи визначенням будови біологічних молекул, таких, як дезоксирибонуклеїнова кислота (ДНК). [9, 233]

При проходженні рентгенівських променів через яку-небудь тверду, рідку або газоподібну речовину вони взаємодіють з електронами. Промені втрачають частину своєї енергії внаслідок:

- 1) істинного поглинання, тобто перетворення їх енергії на інші види енергії;
- 2) розсіяння, тобто зміни напряму поширення променів без зміни довжини і із зміною довжини хвилі.

Первинними елементарними процесами істинного поглинання рентгенівського випромінювання, тобто перетворення їх енергії в кінетичну енергію електронів являються:

- а) фотоелектричний ефект – виривання електронів з атомів поглинаючої речовини і повідомлення ним кінетичній енергії (фотоелектричне поглинання);
- б) комптон-ефект – когерентне і некогерентне розсіяння, тобто із зміною довжини хвилі і передачею частини енергії розсіюючому електрону;
- в) утворення елементарних пар зарядів – електрона і позитрона – і передачі їм кінетичної енергії.

Таким чином, у всіх процесах взаємодії первинного фотона з речовиною частина енергії перетвориться в кінетичні енергії електронів і позитронів, а частина – в енергію вторинного фотонного випромінювання. [1, 17]

Рентгенівський структурний аналіз (рентгеноструктурний аналіз) – методи дослідження атомної будови речовини за розподілом в просторі і інтенсивностями розсіяного на аналізованому об'єкті рентгенівського випромінювання. Рентгеноструктурний аналіз кристалічних матеріалів дозволяє встановлювати координати атомів з точністю до 0,1-0,01 нм, визначати характеристики теплових коливань цих атомів, включаючи анізотропію і відхилення від гармонійного закону, отримувати за експериментальними дифракційними даними розподілу в просторі щільності валентних електронів на хімічних зв'язках в кристалах і молекулах. Цими методами досліджуються метали і сплави, мінерали, неорганічні і органічні сполуки, білки, нуклеїнові кислоти, віруси. Спеціальні методи рентгеноструктурного аналізу дозволяють вивчати полімери, аморфні матеріали, рідини, газу. [7, 148]

Рентгеноспектральний аналіз це розділ аналітичної хімії, що використовує рентгенівські спектри елементів для хімічного аналізу речовин. Дозволяє судити про хімічний склад досліджуваної речовини. Елементи періодичної системи мають характерні спектри при рентгенівському опроміненні. Існують два методи рентгеноспектрального аналізу. У першому речовина, що вивчається, поміщається на місце катода в рентгенівській трубці, а рентгенівські промені, що випускаються їм, досліджуються. У другому – зразок опромінюється рентгенівськими променями, а досліджуються ті, що пройшли крізь нього або відбиті хвилі. [3, 159]

Рентгенівська мікроскопія сукупність методів дослідження мікроскопічної будови об'єктів за допомогою рентгенівського випромінювання. У рентгенівській мікроскопії використовують спеціальні прилади – рентгенівські мікроскопи. Їх межа дозволу може бути на 2-3 порядки вище, ніж світлових, оскільки довжина хвилі X рентгенівського випромінювання на 2-3 порядки менше довжини хвилі видимого світла. Специфічність взаємодії рентгенівських променів з речовиною обумовлює відмінність рентгенівських оптичних систем від оптичних систем для світлових хвиль і для електронів.

В роботі визначаються за допомогою рентгенівського випромінювання параметри кристалічної решітки сплавів титану з добавкою цирконію 15%, 25%, 35%, 45%, 55%.

Виготовлення зразків відбувалося в дуговій печі в атмосфері аргону (Ar) з використанням титан – цирконієвого гетера (сплав Ti – 50%, Zr – 50%).

Експеримент був проведений за допомогою приладу ДРОН - 2 – це прилад для проведення досліджень за допомогою рентгенівських променів з їх реєстрацією сцинтиляційними лічильниками.

В процесі експерименту було отримано 6 дифрактограм

Під час експерименту використовувалося рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 1,54\text{Å}$.

Після розшифровки дифрактограм були отримані результати за допомогою яких було побудовано графік зміни параметрів решітки при зміні концентрації цирконію і

титану в сплаві. З збільшенням цирконію в сплаві крива змінюється лінійно, що підтверджує закон Вегарда.

Висновки. Детально дослідивши історію відкриття рентгенівського випромінювання було встановлено, що відкриття німецького вченого дуже сильно вплинуло на розвиток науки. Експерименти і дослідження з використанням рентгенівських променів допомогли отримати нові відомості про будову речовини, які разом з іншими відкриттями того часу змусили переглянути цілий ряд положень класичної фізики.

Основне застосування рентгенівських променів у фундаментальній науці - структурний аналіз, тобто встановлення просторового розташування окремих атомів в кристалі. У мінералогії методом рентгеноаналіза визначені структури тисяч мінералів і створені експрес-методи аналізу мінеральної сировини.

Методом структурного рентгенівського аналізу було визначено параметри решітки сплавів титан – цирконій, з різним процентним вмістом цирконію в сплаві. Експериментально, побудувавши графік зміни параметрів решітки, перевірено закон Вегарда – про лінійну залежність при постійній температурі між властивостями кристалічної решітки сплаву і концентрацією окремих його елементів.

Рентгенівські методи дослідження є беззаперечно важливими, вони мають сильну проникаючу здатність, яка залежить від природи речовини і її товщини. Завдяки цій властивості вони отримали широке поширення в медицині та промисловості. Останні досягнення в рентгеноаналізі (наноматеріали, аморфні метали, композиційні матеріали) створюють поле діяльності для наступних наукових поколінь.

І так, промені Рентгена, відкриті в кінці XIX ст., дали поштовх досягненням і успіхам XX ст., без яких немислиме сучасне життя і відкриття майбутнього.

Література

1. Бекман И.Н. Лекции: ядерная физика.
2. Бокий Г.Б. Рентгеноструктурный анализ: 1 том /Г.Б. Бокий, М.А. Порай-Кошиц – М.: Московский университет, 1964 – 488 с.
3. Боровский И. Б., Физические основы рентгеноспектральных исследований / И.Б. Боровский – М.: Издательство МГУ, 1956 – 463 с.
4. Дулов Е.Н. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ / Е.Н. Делов, Н.Г.Ивойлов – Казань: Издательство Казанского ГУ, 2008 – 50 с.
5. Жданов Г.С. Дифракционный и резонансный структурный анализ / Г.С.Жданов, А.С. Илюшин, С.В. Никитина – М., Наука, 1980 – 255 с.
6. Порай-Кошиц М.А. Основы структурного анализа химических соединений /М.А. Порай-Кошиц – М.: Высшая школа, 1989 – 192 с.
7. Путилов К.А. Курс физики Том III Оптика. Атомная физика. Ядерная физика / К.А. Путилов, В.А. Фабрикант – М.: Издательство физико – математической литературы, 1963 – 630 с.
8. Реми Г. Курс неорганической химии: том 1 /Г. Реми – М.: Издательство иностранной литературы, 1963 – 920 с.
9. Чупрунов Е.В. Рентгеновские методы исследования твердых тел. Учеб. метод. материалы /Е.В. Чупрунов, М.А. Фаддеев, Е.В. Алексеев – Новгород, ННГУ, 2007 – 194 с.

10. <http://tehno-science.ru/nauka-2454.html>;
11. <http://www.chem.msu.su/rus/cryst/cryshist/braggs.htm>;

Анотація. Пивоваров С.С. Відкриття рентгенівського випромінювання і його застосування для дослідження твердих тіл. Рентгенівське випромінювання - електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль від 10^{-4}Å до 10^2Å . 1895 році В. К. Рентген вперше спостерігав, невідомі раніше промені, проникаючі через непрозорі перешкоди. Джерела рентгенівських променів - рентгенівські трубки. Існує гальмівне і характеристичне рентгенівське випромінювання. Через свої властивості, має широке застосування у різних сферах діяльності.

Ключові слова: рентгенівське випромінювання, дифракція, рентгенівська трубка.

Аннотация. Пивоваров С.С. Открытие рентгеновского излучения и его применение для исследования твердых тел. Рентгеновское излучение – электромагнитное излучение с длинами волн от 10^{-4}Å к 10^2Å . 1895 году В. К. Рентген впервые наблюдал, неизвестные ранее лучи, проникающие через непрозрачные препятствия. Источники рентгеновских лучей - рентгеновские трубки. Существует тормозное и характеристическое рентгеновское излучение. Из-за своих свойства, имеет широкое применение в различных сферах деятельности.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, дифракция, рентгеновская трубка.

Abstract. Brewers SS The discovery of X-rays and its application to the study of solids. X-ray radiation - electromagnetic radiation with wavelengths from 10^{-4}Å to 10^2Å . 1895 VK Roentgen first observed, previously unknown rays penetrate through opaque barriers. Sources of X-rays - X-ray tube. There braking and characteristic X-rays. Because of its properties, is widely used in various fields.

Keywords: X-rays diffraction, X-ray tube.

УДК 47.31

О.Ю. Роєнко

Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка

ДЕТЕКТОРИ ЧАСТИНОК У ПРИСКОРЮВАЧАХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

В сучасній фізиці високих енергій, фізиці елементарних частинок та процесів, що відбуваються на мікро- рівні найважливішу роль відіграють прилади під назвою прискорювачі заряджених частинок. По мірі розвитку технологій ускладнювалися й прискорювачі, сучасні прискорювальні комплекси мають в своїй будові сотні різноманітних модулів, кожен з яких відповідає за певні функції.