Дәріс 11.
Рентген сәулелерін алу және олардың қасиеттері. Үздіксіз рентген спектрі. Сипаттамалық рентген спектрі. Рентген сәулелерінің затпен жұтылуы

Дәріскер: х.ғ.к., доцент

Кудьярова Ж.Б.



Дәрістің мақсаты: білім алушылармен рентген сәулелерін алу және олардың қасиеттерін, үздіксіз және сипаттамалық рентген спектрінің пайда болуын талдау.

Кристалдардағы рентген сәулелерінің дифракциясы ашылуынан кейін ғана, бір жағынан кристалдар көмегімен рентген сәулелерін, екінші жағынан рентген сәулелері көмегімен кристалдарды зерттеу мүмкін болды. Мұнда зерттеудің екінші бағыты қарастырылады, ол *рентгенқұрылымдық анализ* деп аталады.

Рентгенқұрылымдық анализ негізінде рентген сәулелерінің екі таңғажайып ерекшеліктері жатыр: біріншіден, бұл сәулелердің қасиеттері дененің ішкі жағынан ене алады, екіншіден, олардың кристалдық құрылымдық бірліктерінен (атом, ион, молекула) дифракциялану қасиеті, ол кеңістікте периодты түрде қайталанады.

Рентген фотонының қасиеттері

Фотон энергиясы

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

E (кэВ) = 1,23984 / λ (нм)

λ = 0,154 нм болса, E ≈ 8,05 кэВ.

Электромагниттік сәуле

Рентген фотонының электр заряды жоқ. Вакуумда жарық жылдамдығымен таралады.

Иондау қабілеті

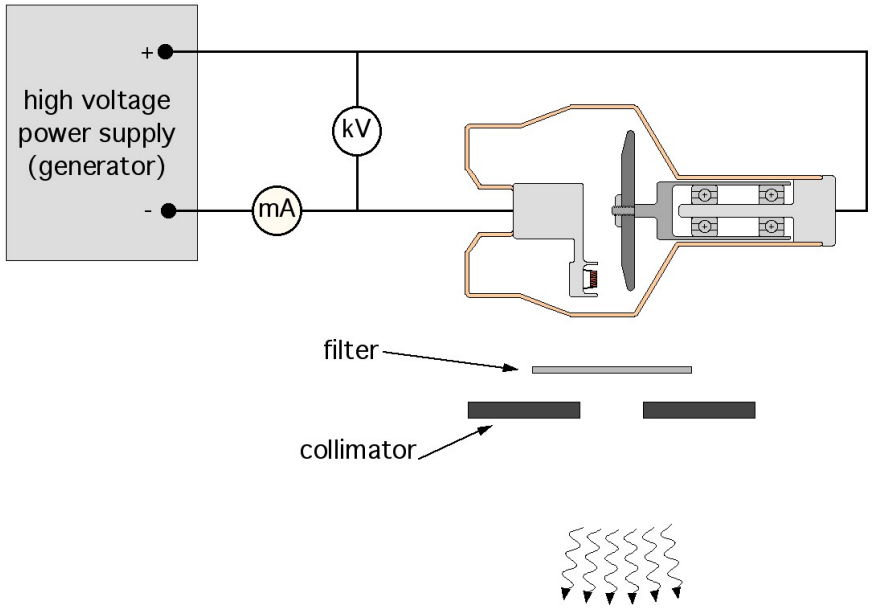
Энергиясы жеткілікті фотон атомнан электронды шығарып, оны иондай алады.

Өтімділік және дифракция

Өтімділік фотон энергиясы мен материалға тәуелді. Толқын ұзындығы кристалл жазықтықтарының аралығымен шамалас болса, дифракция байқалады.

h — Планк тұрақтысы, ν — жиілік, c — жарық жылдамдығы, λ — толқын ұзындығы.

Рентген түтігінің жұмыс қағидаты



01 Электрондардың шығуы

Қызған катод жіпшесінен электрондар термоэлектрондық эмиссия арқылы бөлінеді.

02 Электрондардың үдеуі

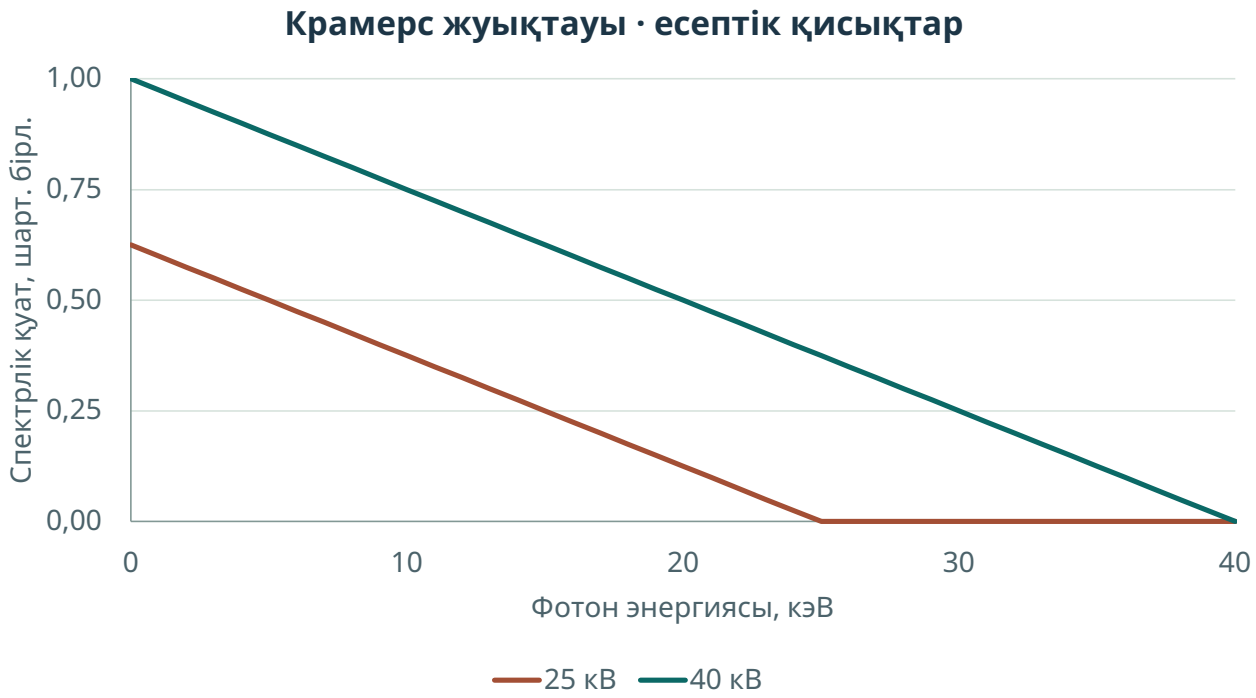
Вакуумда U кернеуі электрондарды анодқа қарай үдетеді. Бір электрон шамамен eU кинетикалық энергия алады.

03 Нысанамен соқтығысу

Электрондар анодта тежеледі және атомдарды иондайды. Тежелулік фон мен сипаттамалық сызықтар түзіледі.

Энергияның басым бөлігі жылуға айналады. Анодты салқындату қажет.

Үздіксіз рентген спектрі



Тежелулік сәуле

Анод ядросының электр өрісінде электронның жылдамдығы мен бағыты өзгереді. Электрон энергиясының бір бөлігі фотонға беріледі.

Неліктен спектр үздіксіз?

Электрондар әр соқтығыста әртүрлі энергия береді. Сондықтан фотондар энергияның кең аралығында түзіледі.

Үздіксіз спектрдің қысқа толқындық шегі

$$E_{max} = eU$$

$$\lambda_{min} = hc / (eU)$$

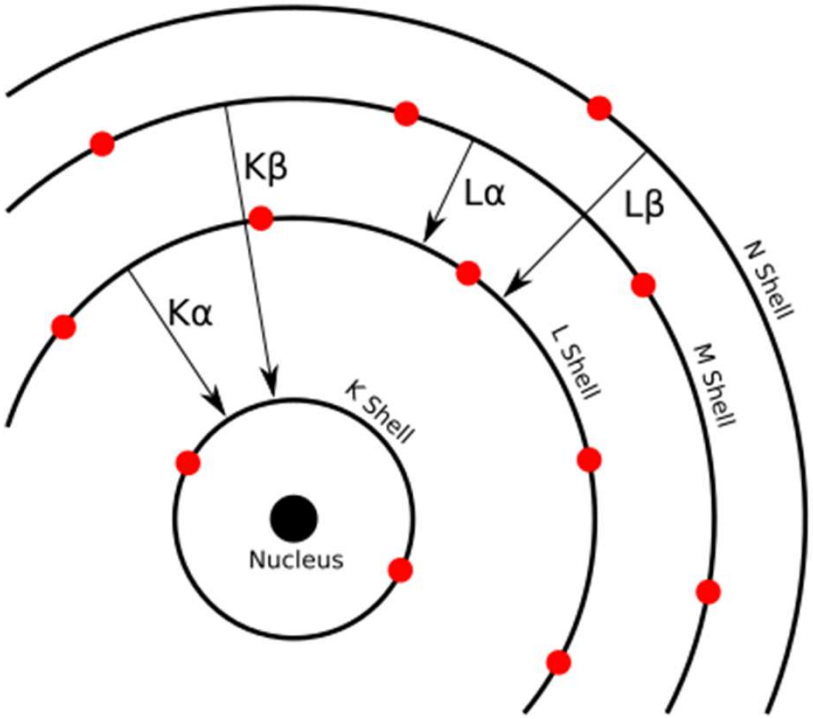
λ_{min} (нм) = 1,23984 / U (кВ)

Шектік жағдайда электронның бүкіл кинетикалық энергиясы бір фотонға беріледі.

U, кВ	E_{max}, кэВ	λ_{min}, нм
20	20	0,0620
30	30	0,0413
40	40	0,0310

Дюэн–Хант заңы бойынша есептелген мәндер

Сипаттамалық сәуленің түзілуі



Ішкі қабықшада бос орын түзіледі

Түтік электронының энергиясы жеткілікті болса, ол анод атомының K-қабықшасындағы электронды шығарады.

Жоғары деңгейдегі электрон ауысады

L-қабықшадан K-қабықшаға ауысқанда Kα, M-қабықшадан K-қабықшаға ауысқанда Kβ сызықтары түзіледі.

Энергия деңгейлерінің айырмасы

$E = E_2 - E_1$. Мұнда E_2 — бастапқы, E_1 — соңғы деңгей энергиясы. Олардың мәні анод элементіне тән.

Бос орынның толуы Оже электронының шығуымен де аяқталуы мүмкін.

Мыс анодының сипаттамалық K-сызықтары

Сызық	Электрондық ауысу	E, кэВ	λ, нм
Cu $K\alpha_1$	$L_3 \rightarrow K$ ($2p_{3/2} \rightarrow 1s$)	8,0478	0,15406
Cu $K\alpha_2$	$L_2 \rightarrow K$ ($2p_{1/2} \rightarrow 1s$)	8,0278	0,15444
Cu $K\beta_1$	$M_3 \rightarrow K$ ($3p_{3/2} \rightarrow 1s$)	8,9054	0,13922

K-қабықшаны иондау шегі

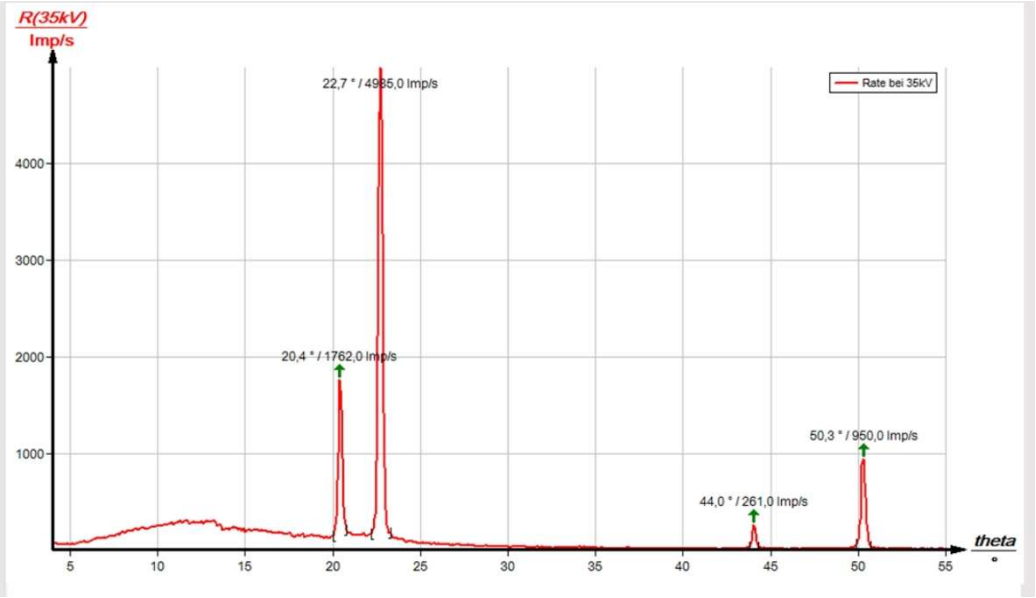
Мыс үшін шамамен 8,98 кэВ. Бұл мән K-сериясын қоздыруға қажет энергияны көрсетеді.

Kα дублеті

$K\alpha_1$ мен $K\alpha_2$ энергияларының айырмасы ≈ 20 эВ. Дублеттің көрінуі аспаптың ажыратуына тәуелді.

Мыс анодының тәжірибелік спектрі

U = 35 кВ, түтік тогы 1 мА. LiF монокристалы Брэгг бұрышы бойынша спектрді ажыратады.



Кең фон

Кіші бұрыштарда тежелулік сәуленің үздіксіз бөлігі көрінеді.

Бірінші реттік шыңдар

20,4° — Kβ. 22,7° — Kα. Осы реттің ішінде бұрыш кішірейген сайын фотон энергиясы артады.

Екінші реттік шыңдар

44,0° және 50,3° шыңдары сол сызықтардың n = 2 реттік шағылуына жатады.

Брэгг шарты $n\lambda = 2d \sin\theta$. Мұнда θ — Брэгг бұрышы, d — LiF кристалы жазықтықтарының аралығы.

Түтік параметрлерінің спектрге әсері

Параметр	Спектрде байқалатын өзгеріс
Анод кернеуі U	E_{max} пен λ_{min} өзгереді. Сипаттамалық сызықтар тиісті иондау шегінен жоғары кернеуде пайда болады.
Түтік тогы	Тұрақты U кезінде фотон ағыны артады. Сипаттамалық сызықтардың энергиялары сақталады.
Анод материалы	Элементтің электрондық деңгейлері өзгергендіктен сызықтардың энергиялары да өзгереді.
Түтік терезесі және сүзгі	Фотондар энергияға тәуелді әлсірейді. Сүзгі өткізілген спектрдің құрамын өзгертеді.

Рентген сәулесінің затпен әрекеттесуі

Үдеріс	Фотонға не болады?	Бастапқы шоқтағы әсері
Фотоэлектрлік жұтылу	Фотон жұтылып, байланысқан электрон босайды. Фотоэлектрон энергиясы ≈ E − E_b.	Фотон бастапқы шоқтан алынады.
Комптон шашырауы	Фотон бағытын өзгертеді және энергиясының бір бөлігін электронға береді.	Фотон бағыты мен энергиясы өзгереді.
Рэлей шашырауы	Фотон бағытын өзгертеді. Оның энергиясы іс жүзінде сақталады.	Фотон бастапқы бағыттан ауытқиды.

Экспоненциалдық әлсіреу заңы

Біртекті материал, моноэнергиялық фотондар және тар шоқ геометриясы.

$$dI = -\mu I\, dx$$

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

$$\mu = -\ln(I/I_0)/x$$

Сызықтық әлсіреу коэффициенті

μ бірлігі — $см^{-1}$. Қалыңдық x сантиметрмен берілсе, μx өлшемсіз болады.

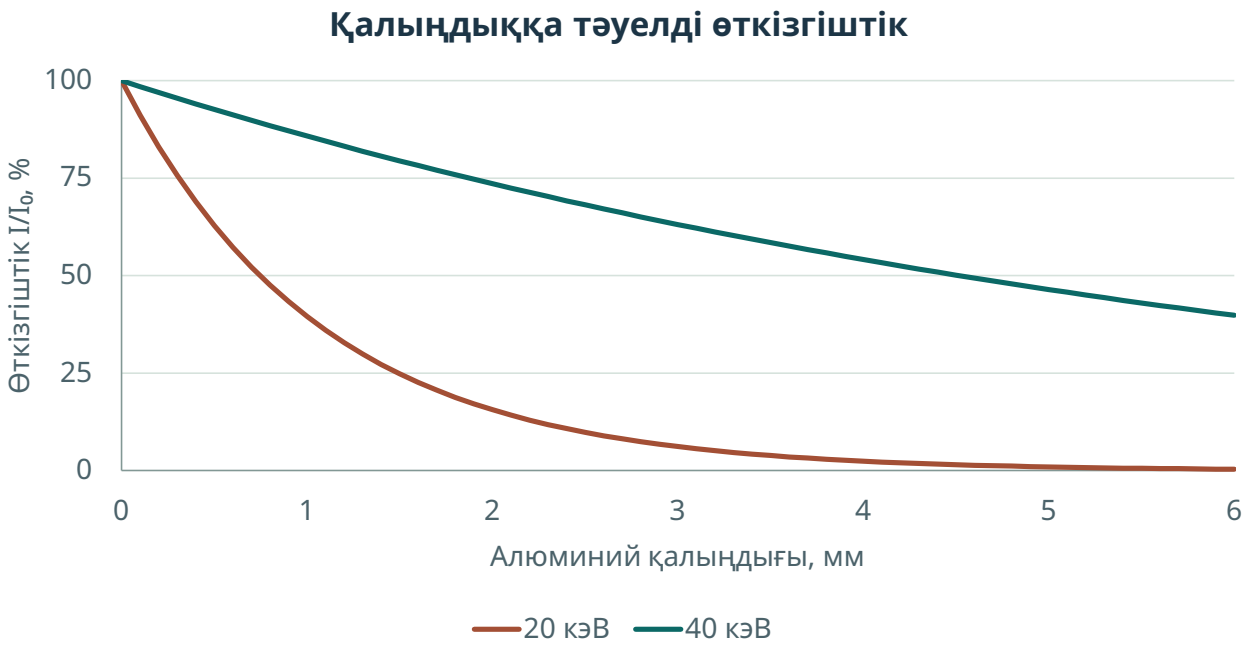
Массалық әлсіреу коэффициенті

μ/ρ бірлігі — $см^2/г$. ρ белгілі болса, μ = (μ/ρ)ρ арқылы есептеледі.

Жартылай әлсірету қабаты

$I/I_0 = 0{,}5$ кезінде $x_{1/2} = \ln 2 / \mu$.

Алюминийдегі рентген сәулесінің әлсіреуі

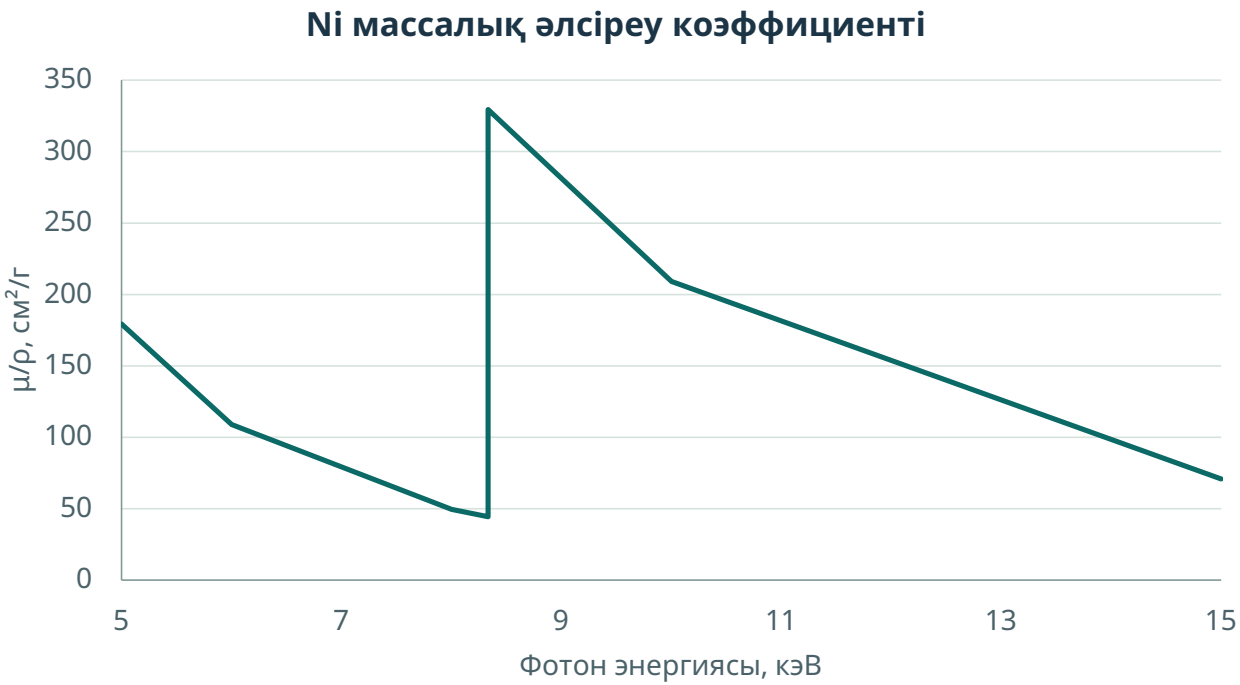


E, кэВ	μ/ρ, см²/г	I/I₀ (2 мм)
20	3,441	15,6%
40	0,5685	73,6%

Жартылай әлсірету қабаты

20 кэВ үшін ≈ 0,75 мм.
40 кэВ үшін ≈ 4,52 мм.

Никельдің K-жұтылу шеті



K-шет 8,3328 кэВ

Осы шектен жоғары фотондар Ni атомының K-қабықшасынан электрон шығара алады.

Cu Kα және Cu Kβ

Kα ≈ 8,05 кэВ, шеттен төмен. Kβ ≈ 8,91 кэВ, шеттен жоғары. Ni сүзгісі Kβ сызығын күштірек әлсіретеді.

Бақылау сұрақтары

01 **Рентген түтігінің құрылымын және онда рентген сәулелерінің түзілуін түсіндіріңіз**

02 **Сипаттамалық сәуленің пайда болуын талқылаңыз.**

03 **Рентген сәулесінің затпен әсерлесу үдерісін сипаттаңыз.**

Әдебиеттер:
1. Полуэктова В. А., Мухачева В. Д. Физико-химические методы анализа. Теория и практика: учебное пособие. — М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. — 200 с.
2. Плисс Е. М. Физико-химические методы анализа: учебник для вузов. — М.: Юрайт, 2025. — 198 с.
Инструментальные методы в химии / под ред. В. В. Лунина, А. К. Буряка. — М.: КУРС, 2024. — 360 с.