# ANALIZA FLUORESCENCYJNA

- czuła metoda analityczna do określania koncentracji pierwiastków
- szeroko wykorzystywana w różnych dziedzinach nauk podstawowych i w badaniach interdyscyplinarnych

# ANALIZA FLUORESCENCYJNA

Najbardziej popularne rozwiązania techniczne to:

- XRF X-Ray Fluorescence metoda wykorzystująca wzbudzanie charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego atomów tarczy przez fotony z lampy rentgenowskiej
- RXRF Radioisotope X-Ray Fluorescence wzbudzanie promieniowaniem γ ze źródeł promieniotwórczych (np. <sup>109</sup>Cd)
- SRIXE (SR-XRF) Synchrotron Radiation Induced X-Ray Emission – wzbudzanie silnym promieniowaniem synchrotronowym
- **PIXE P**article Induced **X**-Ray Emission wzbudzanie cząstkami naładowanymi z akceleratora

## Główna zasada:

rejestracja charakterystycznego promieniowania X emitowanego z atomów na skutek jonizacji wewnętrznych powłok atomowych promieniowaniem wzbudzającym

 energia rejestrowanego promieniowania daje informację o rodzaju pierwiastka,

 natężenie rejestrowanego promieniowania o koncentracji pierwiastka zawartego w próbce Zgodnie z teorią mechaniki kwantowej, każdy elektron opisany jest innym zestawem liczb kwantowych (zakaz Pauliego) i elektrony zajmują takie stany, by atom jako całość posiadał najniższą, możliwą energię.

Do opisu poszczególnych stanów elektronów używa się: n=1,2,3,... - głównej liczby kwantowej l=0,1,2,3,..., n-1 - orbitalnej liczby kwantowej  $m_l=-l, ...,-1,0,1,...,l - orbitalnej magnetycznej liczby kwantowej$  $m_s=\pm 1/2 - spinowej liczby kwantowej$ 

Warunek dążenia atomu do zajęcia najniższego poziomu energetycznego powoduje niemal natychmiastowe (~10<sup>-15</sup>s) zapełnianie przez elektrony wyższych stanów energetycznych dziur (wakansji) wytworzonych wskutek jonizacji powłok wewnętrznych.

Przy przejściu elektronu z wyższej na niższą powłokę elektronową uwalniana jest energia

$$h\nu = E_2 - E_1$$

np. w postaci kwantu promieniowania X.

Każdy atom ma ściśle określone (charakterystyczne tylko dla niego) poziomy energetyczne dostępne dla elektronów – więc możliwe energie emitowanych kwantów X są dla tych atomów również 'charakterystyczne'.



**Serią** nazywamy zbiór wszystkich kwantów promieniowania X emitowanych w czasie przejść elektronowych na określoną powłokę.

W zależności od powłoki, w której pierwotna dziura będzie zapełniana – serie charakterystycznego promieniowania rtg noszą nazwy K(n=1), L(n=2), M(n=3), N(n=4), O(n=5), P(n=6), itd.

Ze wszystkich prawdopodobnych przejść elektronowych mogących zapełniać wakansję, możliwe są tylko takie, dla których spełnione są **reguły wyboru**:

 $\Delta n \neq 0$ ,  $\Delta l=1$ ,  $\Delta j=0,1$  - przejścia dipolowe  $\Delta n \neq 0$ ,  $\Delta l=0,2$   $\Delta j=0,1,2$  - przejścia kwadrupolowe

i linie widmowe dla poszczególnych przejść oznacza się symbolem serii i literą grecka wraz z kolejnymi cyframi arabskimi.

- Z dokładnych analiz widm rentgenowskich można wyznaczyć względne prawdopodobieństwo przejścia (f).
- Intensywności linii charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego wynikają z:

$$\sigma_x = \sigma_i \omega f$$

-  $\sigma_i$  przekrój czynny na jonizację danej powłoki atomowej – zależny od sposobu wzbudzania atomu

 $\omega$  - wydajność fluorescencji – to stosunek liczby wyemitowanych kwantów X danej serii widmowej do liczby wszystkich atomów wzbudzonych w tym czasie na powłoce i

$$\omega_{\scriptscriptstyle K} = N_{\scriptscriptstyle K}^{(x)} \, / \, N_{\scriptscriptstyle K}$$

f – względne prawdopodobieństwo przejścia

gdzie:





**Zjawisko Augera** – to drugi sposób emisji energii uwalnianej przy przejściu elektronu z zewnętrznej na wewnętrzną powłokę – energia ta jest przekazywana na wybicie elektronu z wyższej powłoki i warunkiem tego zajścia jest

#### $E_1 - E_2 \ge E_3$

Podobnie definiuje się

$$\omega_{A} = N_{L}^{(A)} / N_{K}$$

i musi zajść

$$\omega_{K} + \omega_{A} = 1$$

#### DETEKCJA PROMIENIOWANIA X

detektory półprzewodnikowe Si(Li), Ge(Li), HP Ge
detektory NaI



Krzywa wydajności detektora Si(Li) dla wybranych grubości okienek Be i grubości d kryształu

Cecha charakterystyczna detektorów-

energetyczna zdolność rozdzielcza (fwhm)

#### ANALIZA WIDM CHARAKTERYSTYCZNEGO PROMIENIOWANIA X



Przykładowe widma wzorców IAEA



Analiza polega na określeniu intensywności zarejestrowanych linii, odpowiadających określonym przejściom w atomach, które to intensywności są wprost proporcjonalne do stężenia badanego pierwiastka w próbce.

Schemat układu pomiarowego PIXE

#### KALIBRACJA ENERGETYCZNA

- przy ustalonych parametrach układu i znanych przejściach dokonuje się przypisania położenia kanału piku do odpowiadającej pikowi energii
- wykorzystuje się w tym celu znane źródła promieniotwórcze

## METODA OBLICZEŃ FUNDAMENTALNYCH

- Konieczny precyzyjny pomiar wszystkich parametrów układu pomiarowego:
- karta bryłowego,
- grubości wszystkich warstw absorpcyjnych wiązki padającej i charakterystycznego promieniowania X,
- natężenia strumienia promieniowania padającego,
- grubości tarczy pomiarowej,
- składu matrycy badanej tarczy.

$$Y(E_x) = N_t \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon(E_x) e^{-\mu_a x_a} \omega(E_x) \int_{0}^{E_0} \int_{0}^{d} N_p(E) \sigma(E) e^{-\mu x} dx dE$$

 $Y(E_x) = N_t \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon(E_x) e^{-\mu_a x_a} \omega(E_x) \int_{0}^{E_0 d} N_p(E) \sigma(E) e^{-\mu x} dx dE$ 

- $Y(E_x)$  liczba zliczeń pod pikiem danej linii w jednostce czasu,
- N(t) liczba atomów tarczy w obszarze naświetlanym wiązką wzbudzającą
- $\Omega/4\pi$  kąt bryłowy detektora
- $\epsilon(E_x)$  wydajność detektora dla promieniowania X o energii  $E_x$ ,
- $\mu_a$  współczynnik absorpcji dla folii absorpcyjnej
- μ współczynnik absorpcji materiału tarczy pomiarowej
- $N_p(E)$  liczba padających w jednostce czasu cząstek wzbudzających o energii E,
- $\omega(E_x)$  wydajność fluorescencji charakterystycznego promieniowania X,
- $\sigma$  przekrój czynny na jonizację danej powłoki,
- x<sub>a</sub> grubość folii absorbującej
- d grubość tarczy pomiarowej (dla wzbudzania wiązką jonów ich zasięg)
- E<sub>0</sub> maksymalna energia cząstek padających, za pomocą której, dokonując pełnej analizy widma, po prostym przekształceniu wyznaczamy liczbę atomów danego pierwiastka.

## METODA WZORCA ZEWNĘTRZNEGO

 polega na porównaniu widma badanej próbki z widmem tarczy o znanym składzie pierwiastkowym, co pozwala na wyznaczenie zawartości występujących pierwiastków. Sprowadza się to do:

$$Y(E_x) = N_t N_p K$$

N<sub>t</sub> - czynnik normalizujący strumień padających cząstek,
 K - czynnik uwzględniający przekrój czynny, kąt bryłowy, wydajność detektora, absorpcję i wydajność fluorescencji

Wiedząc, że istnieje liniowa zależność między liczbą atomów w badanej próbce i liczbą zliczeń, przez proste porównanie próbki i wzorca otrzymujemy:

$$\frac{Y_{wz}(E_x)}{Y_x(E_x)} = \frac{N_t^{wz}N_p^{wz}}{N_t^x N_p^x}$$

skąd otrzymamy

$$N_t^x = \frac{Y_x(E_x)}{Y_{wz}(E_x)} N_t^{wz} \frac{N_p^{wz}}{N_p^x}$$

Ponieważ stosunek intensywności jest równy stosunkowi stężeń danego pierwiastka we wzorcu i w próbce, powyższy wzór pozwala na określenie stężenia pierwiastka w próbce względem znanego stężenia tego pierwiastka we wzorcu. Jeśli pierwiastek w badanej próbce nie występuje we wzorcu należy posłużyć się krzywą wydajności detekcji pierwiastków, która powstaje przez dopasowanie półempirycznej funkcji W(Z) do liczb W reprezentujących liczbę zliczeń dla danej linii przypadających na jednostkę stężenia (1ppm) oraz na jednostkę czynnika normalizacyjnego:

$$W_x = \frac{Y_x^{wz}}{C_x^{wz} n^{wz}}$$



 $Y_x^{wz}$  - powierzchnia pod pikiem pierwiastka x w widmie wzorca,



- $C_x^{wz}$  stężenie pierwiastka x we wzorcu
- n<sup>wz</sup> czynnik normalizacyjny



Krzywa wydajności wyznaczona z pomiarów PIXE dla wzorca IAEA.

Wzór określający stężenie danego pierwiastka w próbce przyjmuje teraz

postać:

$$C_x = \frac{Y_x}{nW_x}$$

gdzie C<sub>x</sub> - stężenie analizowanego pierwiastka

- Y<sub>x</sub> powierzchnia pod pikiem dla wybranej linii analizowanego pierwiastka,
- N czynnik normalizacyjny
- W<sub>x</sub> -wydajność detekcji analizowanego pierwiastka.

#### METODA WZORCA WEWNĘTRZNEGO

- to metoda idealna do wyznaczania stężeń pierwiastków w próbkach ciekłych, z których przygotowuje się tarcze pomiarowe
- wzorcem wewnętrznym jest pierwiastek wprowadzany do próbki o znanym stężeniu (w materiałach biomedycznych takim pierwiastkiem najczęściej jest Y lub Ga)
- wzorzec wewnętrzny jest dodawany zarówno do badanej próbki jak i do próbek kalibracyjnych, z których powstaje krzywa wydajności względem wzorca wewnętrznego
- uwzględniając założenia "identyczności" matrycowych próbki i wzorców otrzymuje się





 $C_{x} = \frac{Y_{x}}{Y_{y}} C_{y} \frac{W_{y}}{W_{x}}$ gdzie:  $C_{x}, C_{y}$  stężenie danego pierwiastka i wzorca w próbce  $Y_{x}, Y_{y}$ - powierzchnia pików pierwiastka i wzorca  $C_x, C_y$  - wydajność detekcji pierwiastka i wzorca

• o czułości danej metody decyduje granica detekcji określana jako

$$C_{DL} = Cx \frac{3\sqrt{I_b}}{I}$$

## **KLASYCZNA METODA XRF**

XRF

15



- wzbudzanie charakterystycznego promieniowania X promieniowaniem pochodzącym z lampy rentgenowskiej
- z uwagi na zależność przekroju czynnego na fluorescencję od energii padającego promieniowania wynika konieczność stosowania lamp z anodami wykonanymi z różnych materiałów w zależności od potrzeb analitycznych
- stosowanie wzbudzającego promieniowania X tuż powyżej krawędzi absorpcji, gdzie przekrój czynny na wzbudzanie danego pierwiastka osiąga maksimum, da najlepsze rezultaty analizy
- natężenie lamp rentgenowskich sięga ~ $10^{12}$  kwantów/s/ $4\pi$
- możliwe jest rozwiązanie ze spektrometrem krystalicznym, gdzie z emitowanych promieni X wybiera się tylko te spełniające równanie Bragga



Schemat układu spektrometrycznego w metodzie *XRF* 

### **RADIOIZOTOPOWA METODA XRF (RXRF)**

- tu źródłem wzbudzającym jest najczęściej <sup>55</sup>Fe, <sup>57</sup>Co, <sup>109</sup>Cd, <sup>238</sup>Pu, <sup>241</sup>Am
- ich schematy rozpadów pozwalają dokonać wyboru właściwego do określonego typu analizy



#### ANALIZA PROMIENI X WZBUDZANYCH PROMIENIOWANIEM SYNCHROTRONOWYM (SRIXE)

- synchrotron to najsilniejsze źródło promieniowania elektromagnetycznego.
- emisja promieniowania wytwarzana przez naładowane cząstki poruszające się z prędkościami relatywistycznymi po zakrzywionych torach w polu magnetycznym
- najczęściej wykorzystuje się pierścienie akumulacyjne (tzw. storage rings) lub synchrotrony

- na tor wiązki wstawia się specjalne urządzenia (magnesy zakrzywiające)
- **Wiggler** zestaw kilkudziesięciu magnesów wytwarzających bardzo silne przemiennie skierowane pola magnetyczne, powodujące zakrzywienie toru elektronu na bardzo małym promieniu krzywizny pozwala to otrzymać dużo większe intensywności



stosowane magnesy to: magnesy zakrzywiające - tzw. **bending magnets** magnesy wielopolowe - tzw. **Wigglers** magnesy undulatory - tzw. **undulators**  **Wiggler -** zestaw kilkudziesięciu magnesów wytwarzających bardzo silne przemiennie skierowane pola magnetyczne, powodujące zakrzywienie toru elektronu na bardzo małym promieniu krzywizny pozwala to otrzymać dużo większe intensywności promieniowania niż z pojedynczego magnesu zakrzywiającego

• Undulator - wielopolowy magnes nadprzewodzący składający się z około 100 zestawów magnesów ustawionych przemiennie bądź spiralnie -wytwarzających słabe pola magnetyczne (0.1 - 0.2 T). Ustawienie jest takie, że wywołuje interferencję emitowanego promieniowania synchrotronowego, w wyniku czego następuje przesunięcie energetyczne widma promieniowania synchrotronowego w stronę wyższych energii. Spiralne ustawienie magnesów wymusza spiralny ruch cząstek, co w konsekwencji daje kołowo spolaryzowane promieniowanie synchrotronowe.

- Do celów Analizy Fluorescencyjnej zwykle używa się promieniowania wytwarzanego w synchrotronach elektronowych. Zalety tego rozwiązania to:
- szeroki przedział widmowy o dużej intensywności w zakresie od podczerwieni do promieniowania X
- wysoki stopień skolimowania wiązki w kierunku pionowym (mały kat rozwarcia)
- wysoki stopień polaryzacji wiązki w płaszcyznie orbity elektronów (niemal 100%)
- Szeroki wachlarz zastosowań promieniowania synchrotronowego wynika z:
- możliwości ogniskowania wiązki
- możliwości pracy z wiązką monochromatyczną
- długi czas życia wiązki (nawet do 24 godzin)
- charakteru pulsacyjnego wiązki

Dla wiązki promieniowania sychrotronowego i jego źródła określa się:

- Jasność (brilliance) źródła zdefiniowaną jako liczba fotonów o określonej energii emitowanych w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię źródła w jednostkowy kąt bryłowy (liczba fotonów /(s\*mm<sup>2</sup>\*mrad<sup>2</sup>\*eV)
- Luminancję, jaskrawość (brightness) źródła odpowiadającą liczbie wszystkich fotonów emitowanych w dany kąt bryłowy w jednostce czasu (liczba fotonów/(s\*mrad<sup>2</sup>\*eV)
- Strumień (flux) zdefiniowany jako liczba fotonów o danej energii emitowanych w jednostce czasu przez źródło pod danym kątem w stosunku do kierunku rozchodzenia się wiązki promieniowania synchrotronowego (liczba fotonów/(s\*mrad<sub>horvzont</sub>\*eV)



Rozkład energetyczny promieniowania synchrotronowego na przykładzie promieniowania synchrotronu NSLS (National Synchrotron Light Source) w Brookhaven National Laboratory w USA

Zalety promieniowania synchrotronowego przyczyniły się do jego szerokiego zastosowania do analizy składu pierwiastkowego (SRIXE) i metoda ta stała się atrakcyjna z uwagi na:

- bardzo krótki czas analizy
- nieniszczący czas analizy
- możliwość analiz w mikroobszarach
- możliwość analizy wielopierwiastkowej
- możliwość analizy w dowolnej atmosferze
- bardzo dobra wykrywalność poniżej 10 ppb

Z uwagi na duże natężenia promieniowania synchrotronowego ~ $10^{20}$  fotonów, oraz możliwy zakres energii - pomiary prowadzi się w wydzielonych (zamkniętych w czasie eksperymentu) komorach (hutch). Kontrolę nad pomiarem prowadzi się za pomocą kamer TV.

We wszystkich rozwiązaniach wiązka promieniowania synchrotronowego przechodzi przez układ okien berylowych oddzielających bardzo wysoką próżnię synchrotronu od reszty układu pomiarowego, gdzie często panuje ciśnienie atmosferyczne. Często pomiary przeprowadza się w atmosferze helowej, by usunąć pik argonowy z powietrza.



Schematy różnych układów pomiarowych stosowanych w metodzie SRIXE: a) układ tradycyjny, b) układ wykorzystujący zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia, c) układ stosowany do mikroanaliz wykorzystujący kapilarę do ogniskowania wiązki.

Układ pomiarowy do badania mikroobszarów (powierzchni <<1mm<sup>2</sup>) jest wyposażony zwykle w system ogniskujący wiązkę. Zrealizować to można za pomocą układów zwierciadeł (to monokrystaliczne lustra lub wielowarstwowe lustra eliptyczne lub hiperboliczne). Do ogniskowania wiązek stosuje się też mono- lub polikapilary rentgenowskie. We wszystkich rozwiązania wykorzystuje się zjawisko całkowitego odbicia wiązki rentgenowskiej.



Obraz histologiczny 20 µm skrawka tkanki móżdżku myszy i rozkład stężenia żelaza - żelazo koncentruje się głównie we włóknach nerwowych. Jasne punkty reprezentują duże stężenie.



Zasada metody TRXRF i działania kapilary.

Do ogniskowania wiązki stosuje się kapilary wykorzystujące zjawisko całkowitego zewnętrznego odbicia wiązki rentgenowskiej. Rozwiązanie to jest stosowane zarówno w przypadku promieniowania synchrotronowego jak i przy stosowaniu lamp rentgenowskich - tu metoda TRXRF.



Przykładowe widmo TRXRF próbki wody i pyłów z powietrza.

## Zjawisko całkowitego odbicia zewnętrznego promieni X

Charakterystyka odbicia promieni X (fal el.-mag.)

• prawo Sneliusa

 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 

 $\sin\theta_1/\sin\theta_2 = n$ 

jeśli n>1 to istnieje  $\theta_g$ 

 $\sin\theta_g = 1/n$ 

•dla szkła n~1.5  $\rightarrow \theta_g = 41.8^{\circ}$ 



Czy dla calego widma fal elektromagnetycznych n>1??? Jak zależy n od (E, λ, ω)? oddziaływanie fali el-mag z materią model: atomy ośrodka



model: atomy ośrodka to tłumione oscylatory

$$qEe^{i\omega t} = m\left(\mathbf{x} + \frac{1}{\tau}\mathbf{x} + \omega_0^2 x\right)$$

- rozwiązując otrzymamy:

polaryzowalność ośrodka i współczynnik n



dla promieni x: ω>>ω<sub>0</sub> więc rzeczywista część współczynnika n

$$n^2 \cong 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 < 1$$

$$n^2 \cong 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 < 1$$

• konsekwencje:

dla promieni x materia jest ośrodkiem optycznie rzadszym niż próżnia i istnieje  $\theta_g$ 

 $\sin\theta_g = n$ 

całkowite odbicie zewnętrzne  $\theta > \theta_g$ 

stosowane oznaczenie to  $\phi_k = 90^{\circ} - \theta_g$ 

• dla celów praktycznych:

 $n=1-\delta+i\beta$ 

gdzie: δ-składowa dyspersyjna

$$\delta = \frac{N_A}{2\pi} r_0 \lambda^2 \frac{Z}{A} \rho$$

b-składowa absorpcyjna

$$\varphi_k$$
  
n<1  
całkowite odbicie zewnętrzne  $\varphi < \varphi_g$ 

$$\beta = \frac{1}{4\pi} \mu \lambda$$

Wartości  $\delta$  i  $\beta$  są dodatnie i małe ~10<sup>-5</sup> i 10<sup>-7</sup>

## Parametry całkowitego odbicia zewnętrznego promieni X

• oszacowanie  $\phi_k$ 

wykorzystując  $\sin^2 \varphi_k = 1 - \sin^2 \theta_g = 1 - n^2 = 1 - (\omega_p / \omega)^2$ 

• dla SiO<sub>2</sub>

## $\varphi_k$ [mrad]~32.2/E[keV]

dla typowych zastosowań φ<sub>k</sub> jest bardzo małe!
np. dla E=10 keV - φ<sub>k</sub> ~3 mrad (0.17°) dla E=17.48 keV - φ<sub>k</sub> ~1.8 mrad

#### • zależność współczynnika odbicia od kąta padania

z H. Aiginger Spectr. Acta B46 (1991)1313



E=17.4 keV (Mo – K
$$\alpha$$
)  
 $\phi_k = 1.8 \text{ mrad } \text{w SiO}_2$ 

#### zależność głębokości penetracji od kąta padania



E=17.4 keV (Mo – K $\alpha$ )  $\phi_k = 1.8 \text{ mrad w SiO}_2$ 

## podsumowanie

wiązka wnika do ośrodka na niewielką głębokość

R~100%

~30 Å

## Zastosowanie całkowitego odbicia zewnętrznego promieni x

- rentgenowska analiza fluorescencyjna z całkowitym odbiciem wiązki padającej
   Total Reflection X-Ray Fluorescence
- kapilary ogniskujące
- soczewki rentgenowskie
- promieniowanie synchrotronowe
- nowe detektory rentgenowskie

#### Podstawa fluorescencji rentgenowskiej



## Rentgenowska analiza fluorescencyjna – TXRF

• "klasyczna" metoda XRF



jednoczesny pomiar Z>~13
czułość detekcji ~1 ppm (duże tło promieniowania rozproszonego)

Jak ograniczyć rejestrację tła?

#### • IDEA:



- dla  $\phi < \phi_k$  znaczne zmniejszenie poziomu tła od promieniowania rozproszonego
- wiązki padająca i odbita od podkładki (R~100%) równoważne
- detektor blisko próbki duży kąt bryłowy rejestracji promieniowania charakterystycznego

• ograniczenia

rozwiązanie dobre dla bardzo cienkich próbek (roztwory, cienkie warstwy) umieszczonych na podkładkach o wysokim współczynniku "gładkości"

## typowa konfiguracja pomiarowa



#### Zalety:

• zmniejszenie tła – poprawa "czułości metody" do ~1 ppb

poprzez dwukrotne przenikanie wiązki przez próbkę – 'przed' i 'po' odbiciu

monochromatyzacja wiązki lub odcinanie fotonów wysokoenergetycznych





 $\phi_k \sim 1/E$ 

## Badanie czystości Si metodą TXRF



Monochromatyzacja wiązki padającej poprzez odbicie Bragga na wielokrotnych warstwach podwójnych (np.. ~80 warstw o grubości ~nm z Ta/C, W/C, Mo/B<sub>4</sub>C)

 $\delta E \sim 25 eV$ 



## Widmo TXRF



## Zwierciadła rentgenowskie



X-RAY MICROPROBE built at the Lawrence Berkeley Laboratory uses a pair of mirrors coated with multilayers to focus a beam of x rays to a spot several microns in diameter. The beam apertures further reduce the spot size to about 2 microns. The three-dimensional graph illustrates the capability of the microprobe to detect trace amounts of impurities. In this example, the tall peaks represent iron impurities detected in a silicon carbide ceramic substrate. They came from stainless steel tweezers used to handle the ceramic.

## **Badanie cienkich warstw**



B. Lengeler, Postępy Fizyki 42 (1991) 289

 wykorzystanie zjawiska interferencji w warstwie powierzchniowej powoduje oscylacje promieniowania odbitego w zależności od kąta obserwacji

$$E_0=10$$
 keV;  $Ta_2O_5/Si$ 

oscylacje  $\rightarrow$  informacja o grubości i strukturze

## Badanie warstw wielokrotnych



 $Si(16Å) + Ta(11Å) - \sim 80$  warstw

## Badanie warstw 'modyfikowanych'



-Ni(200 Å) / Au (200 Å) M. G. Le B - naświetlane Xe<sup>+3</sup> 570 keV - z oscylacji informacja o procesie mieszania

M. G. Le Boite et al.. NIM B29(1988) 653

## Pierwiastki śladowe w:

- ochrona środowiska
- biologia
- medycyna



## Kapilary ogniskujące



- Parametry:
- długość ~20-40 cm
- Ø wejściowe ~500-50 μm

- Ø wyjściowe ~100-0.1 μm
- wzmocnienie K=P<sub>wyj</sub>/P<sub>wej</sub>

~ kilka – kilkaset razy

## Zastosowanie: µm-wiązki promieni X



#### Zalety:

- skaning x-y obiektów z krokiem do  $\sim 0.1 \ \mu m$
- prostota otrzymywania μ-wiązki promieni X
- $E < E_k \sim 32.2/\phi_k$  redukcja tła wysokoenergetycznego

## Soczewki promieni X





Fig. 23. Photograph of the first multiple reflection X-ray lens.

- Parametry:
- 1=98 cm
- $\phi = 360 \ \mu m$
- f = 5 cm
- N = 2000

## Test soczewki promieni X



Fig. 33. Evolution of the X-ray radiation focusing process depending on the f(c) 2.8 cm off the face; (d) 3.8 cm off the face (c) 5 cm off the face (the

the system face; (a) close to the face; (b) 1.3 cm off the face; (f) 10 cm off the face (5 cm off the focus).

#### Parametry:

- E = 4 keV
- $I_f/I_0 = 3300$

## Wytwarzanie równoległych µm-wiązek promieni X

Połowa soczewki daje wiązkę równoległą



#### Kumakhov:

- układ 6000 kapilar
- $I \sim 10^{14} 10^{15}$  fotonów/s
- dyspersja kątowa ~3 \* 10<sup>-3</sup> rad
- monochromatyczność  $\delta\lambda/\lambda \sim 1 10^{-2}$  %

## Nowe detektory rentgenowskie

Wykorzystanie ogniskowania promieniowania rtg przy pomocy układów kapilar ogniskujących daje możliwość odcięcia fotonów wysokoenergetycznych



Przykład zastosowań:detekcja promieniowania X z kosmosu

- zwiększenie kąta bryłowego
- ograniczenie powierzchni detektora
- odcięcie składowej wysokoenergetycznej
- dobre "ukierunkowanie"
- topografia rtg