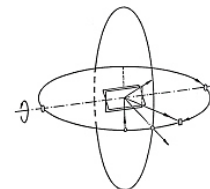


30th CSCA COLLOQUIUM

The second part of contributions from the traditional colloquium which was organized more as a course on experimental methods in X-ray and neutron structure analysis..



X-ray sources

ZDROJE RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ

Jaroslav Brádlér

Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8, Česká republika

Keywords:

X-ray generators, rotating anode, synchrotron radiation

Abstract

A short review of current X-ray sources is presented. Characteristic physical quantities are defined and origins of X-rays are described. The sources are divided in two groups: laboratory (sealed-off tubes, rotating anodes) and storage rings.

Pro plánování experimentů je důležité znát vlastnosti jednotlivých zdrojů rtg záření, jejich výkony a dostupnost. Vzhledem k šířce problematiky studovaných jevů (např.: studium povrchů, vrstevnatých struktur, prášků, materiálů podléhajících změnám po ozáření, „time resolved“ experimenty, fázové přechody, tomografie, atd.), je nutné používat různé zdroje záření.

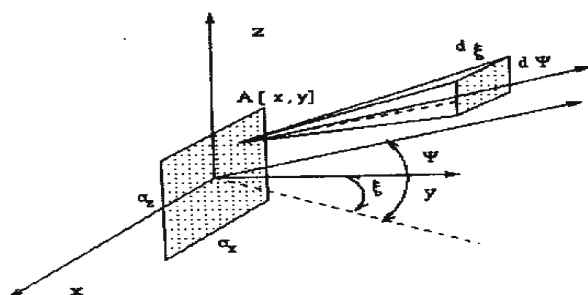
Pro posouzení vlastností zdroje pro daný problém je důležité znát jeho parametry.

Na obr. 1 je znázorněn systém souřadnic pro následující pojmy:

Jas [$\text{phot.s}^{-1}\text{mrad}^{-2} \text{mm}^{-2}$; $E/E = 10^{-3}$]

$$n = (x, z, \psi, E, t)$$

t. j. počet fotonů vyzařovaných bodem **A** o souřadnicích x, z ve směru ψ s energií E za jednotku času, velikosti zdroje, prostorového úhlu a šířce spektra $E/E = 10^{-3}$.



Obr. 1

Intenzita [$\text{phot.s}^{-1}\text{mrad}^{-2}$; $E/E = 10^{-3}$]

$$I = f(x, z, \psi, E, t) \cdot n \cdot d\xi dz$$

Spektrální tok [phot.s^{-1} ; $E/E = 10^{-3}$]

$$S = f(E, t) \cdot Id \cdot d$$

1. Vznik rtg záření

Rtg záření vzniká v zásadě třemi způsoby :

- dopadem urychleného elektronu na pevnou podložku
- změnou dráhy relativistického elektronu – synchrotronové záření
- jako vybuzené fluorescenční záření

Pro účely rtg difrakce má fluorescenční záření příliš malou intenzitu a jako zdroj rtg záření ho prakticky nepoužíváme. Záření vznikající dopadem elektronu na hmotu dělíme ještě na **brzdné** – vzniká změnou rychlosti elektronu a **charakteristické** určené energetickými hladinami elektronů chemického prvku(ů) hmoty. Podrobnější informace [1- 4].

1.1 Brzdné záření

Zdrojem elektronů je žhavené wolframové vlákno emitující tepelné elektrony jež jsou urychlovány elektrickým polem – obvykle 10 – 60 keV, pro některé speciální difrakční techniky i nad 100 keV. Přibližný vztah odvozený z experimentů [1]

$$I = CZ (\omega -)$$

kde I je energie vyzářená jedním elektronem do prostoru (ω) o frekvenci ν , Z je atomové číslo, $\omega = E_e/h$ (E_e je energie elektronu $E_e = eU$, U [V], h je Planckova konstanta, $C = (5 - 1,5) \cdot 10^{-57}$ [J.s^2]). Spektrální intenzita se ale liší od uvedeného vztahu vlivem absorpce a na straně absorpční hrany s vyšší energií. Integrací přes ω a dosazením za $h \nu = E$ dostaneme:

$$I = 1,3 \cdot 10^7 Z U i (1 - E/U_e)$$

$$I = U i Z (1 - E/U_e)$$



účinnost pak $10^{-6} ZU$, kde dosazujeme U [kV], i [mA] a E [keV].

1.2 Charakteristické záření

Přesáhne-li urychlovací napětí hodnotu budícího napětí daného materiálu, začne se přes spojité spektrum překládat *charakteristické* záření o zcela určité vlnové délce dané energetickými hladinami s velmi malou spektrální šířkou 10^{-5} nm. Experimentální vztah odvozený Greenem [2] pro počet fotonů vybuzených jedním elektronem:

$$P_j = K_{jz} (E_e - E_{ejz})^{1,63}$$

Intenzita charakteristického záření :

$$I = 5 \cdot 10^8 K_{jz} f(\theta) i (E_e - E_{ejz})^{1,63}$$

kde $f(\theta)$ závisí na energii dopadajících elektronů, směru dopadu a úhlu projekce, K_{jz} je experimentální konstanta.

Účinnost pak je:

$$= K_{jz} E_{ej} (eU - E_{ejz})^{1,63}$$

Dosažením hodnot pro MoK napětí $U = 40$ kV, vyjde $3,7 \cdot 10^{-4}$.

1.3 Synchrotronové záření

Název „synchrotronové záření“ pochází z typu urychlovače – elektron synchrotronu. Vzniká zakřivením dráhy relativistického elektronu nebo pozitronu. Vyzářená energie částice pohybující se po kruhové dráze:

$$P = 0,0265 E^3 B I \quad [\text{kW}; \text{GeV}, \text{T}, \text{mA}]$$

Spektrální rozložení záření ohybového magnetu a undulátoru je na Obr. 2. Z grafu je patrné, že spektrum záření je spojité od dlouhých vlnových délek s přibližně konstantní intenzitou a prudce klesá pro kritickou vlnovou délku :

$$= 18,6 B E^2 \quad [\text{T}; \text{GeV}]$$

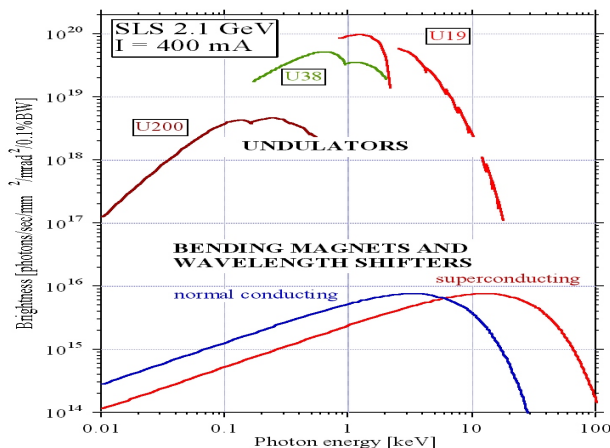
Synchrotronové záření je polarizováno v rovině orbity, odchylkou od této roviny je možné použít i elipticky polarizované záření. Další vlastností je koherence záření a jeho časový průběh (částice obíhají v klubkách (bunch)).

2. Zdroje záření

2.1.1 Laboratorní zdroje

Pro bezpečné používání konvenčních zdrojů je zapotřebí mít:

- regulovatelný zdroj napětí a proudu s dostatečnou stabilitou
- vysokonapěťový kabel
- kryt rentgenky s okny uzavíranými buď ručně nebo elektromagnetem
- chladicí medium – nejčastěji voda s uzavřeným chladicím okruhem
- rentgenku



Obr. 2

2.1.1 Odtavené rentgenky

Pro jednoduchost výměny záření, ceny a spolehlivosti jsou nejpoužívanějším zdrojem. Funkčními prvky jsou: anoda, katoda a Wehneltův válec (slouží k fokusaci elektronů). Anoda je vyrobena obvykle z měděného bloku intenzivně chlazeného; pokud chceme používat charakteristické záření jiného prvku, tento je pak naletován nebo přivařen na Cu blok. Záření vychází beryliovými okénky (1-4) o tloušťce cca 0,4 mm. Profil skleněného obalu slouží k odisolování vysokého napětí od uzeměného krytu. Vnitřní objem pak jako zásobárna vakua – lepší než 10^{-3} Pa.

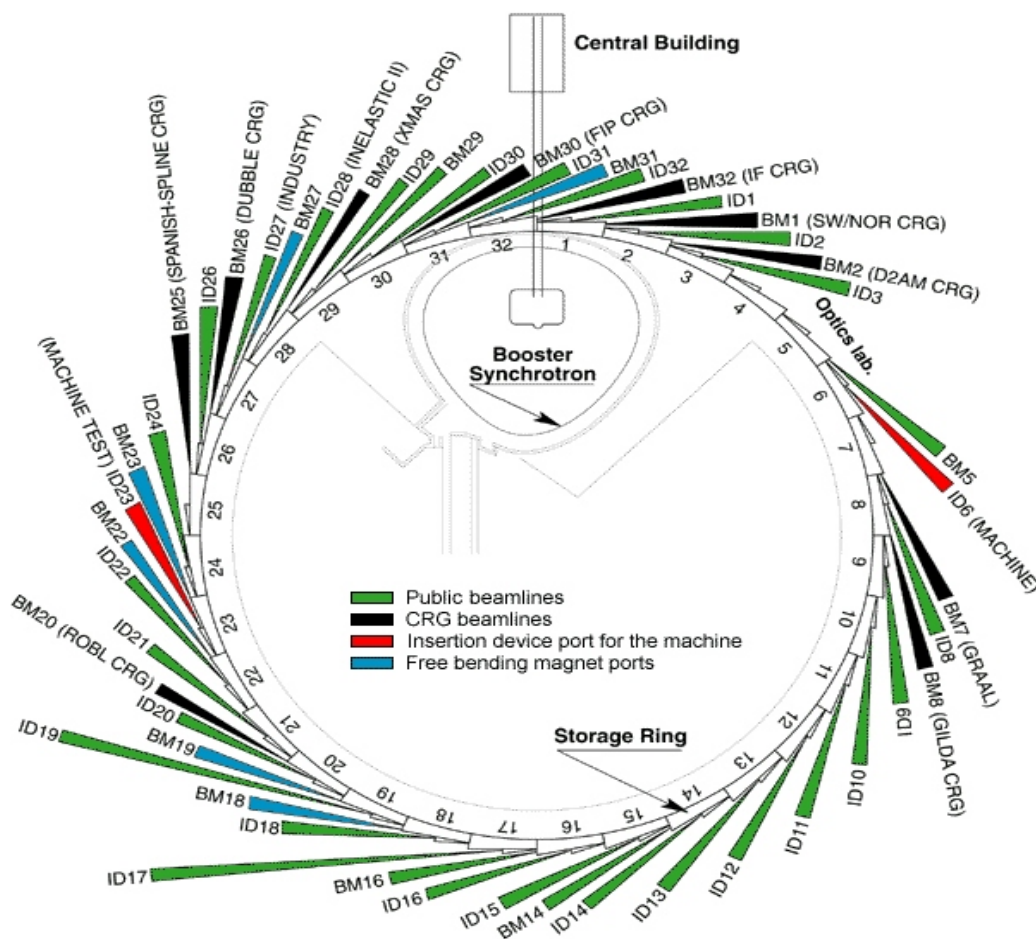
2.1.2 Rotační anoda

- představuje výrazné zvýšení intenzity rtg záření odtavených rentgenek rozložením tepelného zatížení na obvod válce o faktor > 5 . Anoda je tvořena dutým válcem, jehož osou je přiváděno a odváděno chladicí medium. Osa je těsněna buď O kroužky, nebo labyrintem permanentních magnetů v jejichž mezerách je ferromagnetická kapalina s nízkou tenzí par. Rychlost otáčení anody je obvykle 6000 ot/min. Vzhledem k velkému čerpanému objemu, průniku okolní atmosféry a vysoké teplotě katodového systému, používá se obvykle turbomolekulární pumpa k udržení vakua $\sim 10^{-3}$ Pa.

2.2 Akumulační prstence

jsou na rozdíl od laboratorních zdrojů značně nákladnou záležitostí (např. ESRF uvedení do provozu ~ 158 MEuro, v r. 2001 provoz činil 69 MEuro). Synchrotronové záření může být produkováno pouze částicemi s elektrickým nábojem (elektrony nebo pozitrony). Tepelně emitované elektrony jsou urychlovány na energie \sim MeV v lineárním urychlovači elektrickým polem rezonátorů, injektovány do booster synchrotronu, kde získají energii \sim GeV. Takto urychlená klubka elektronů jsou pak přivedena do akumulacího prstence. Zde jsou dále urychlována nebo hrazeny ztráty dutinovými rezonátory napájenými z klystronu.

Schema uspořádání ESRFS v Grenoblu v němž máme spoluúčast 0.35 % je na Obr. 3. Parametry prstence: energie = 6,03 GeV; max.proud = 200 mA; počet klubek (bunch) = 1 – 992; čas mezi klubky = 2816 – 2,82 ns. Rozměry zdroje záření závisí na použitém ohybovém magnetu



Obr. 3. ID = vložené zařízení, BM = ohybový magnet

nebo vloženém zařízení a jsou v rozmezí: horizontální = 60 400 m, vertikální = 8 30 m. Vertikální divergence = 0,85 3 rad, horizontální divergence = 10 116 rad.

Zdroje rtg záření se stále vyvíjejí a zlepšují se jejich parametry. Přestože limit zátěže pro odtavené rentgenky byl téměř dosažen, intenzitu záření lze ještě zvýšit zvětšením úhlu akceptance kolimátoru nebo monochromátoru. Větší možnosti skýtá další zlepšování parametrů akumulčních prstenců použitím vložených zařízení. Rovněž stavbou nových zařízení např. SOLEIL, LLS atd. se zvyšuje možnost přístupu k nim.

1. U. Bonse: X-Ray sources. Characterization of Crystal Growth by X-ray Methods. New York 1980. Plenum Press.
2. M. Green: X-ray Optics and Microanalysis. London. Academic Press.
3. C. S. Barrett & T. B. Massalski: Structure of Metals. Oxford 1980. Pergamon Press.
4. U. W. Arndt: International Tables for Crystallography Vol. C. London 1992. Kluwer Academic Publishers.
5. V. P. Suller: Accelerator Physics, Synchrotron Radiation, Sources and Applications. Edinburgh 1980. Edinburgh University Press.
6. ESRF Highlights 2001. Editor: G. Admans. Grenoble 2002.
7. internet: http://www-als.lbl.gov/als/synchrotron_sources.html, <http://www.chess.cornell.edu>