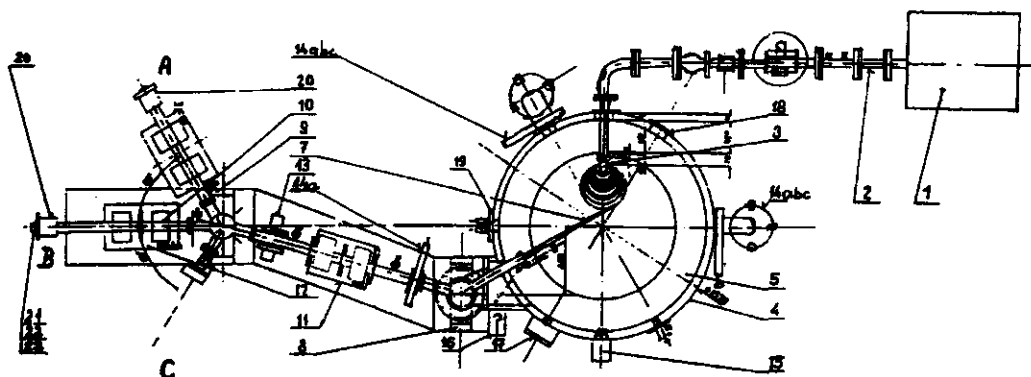


## Mikrotron MT 25 – zdroj tvrdého záření gama

Chvátil David, Vognar Miroslav, Krist Pavel

Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i., Řež u Prahy

Mikrotron MT25 je kruhový urychlovač elektronů (obr. 1). Je zdrojem relativistických elektronů (primární elektronové záření), sekundárního brzdného záření a neutronů z fotojaderných reakcí. Svazek urychlených elektronů je striktně monoenergetický (disperse energie řádově 10 keV), energie je měnitelná od 6 MeV do 25 MeV. Svazek urychlených elektronů má pulsní charakter, délka pulsu je 3,5  $\mu\text{s}$ , opakovací frekvence 423  $\text{s}^{-1}$ , střední proud ve svazku dosahuje až 20  $\mu\text{A}$ . Pomocí magnetických optických prvků může být svazek elektronovodem vyveden na tři různá pracoviště. Velikost středního elektronového proudu je měřena indukčním bezdotykovým snímačem před výstupem z elektronovodu, indikujícím současně polohu svazku s přesností  $\pm 1$  mm. Svazek je vyveden do vzduchu hliníkovým oknem umístěným na konci elektronovodu. Průměr svazku na výstupu je nastavitelný od 1 mm do 20 mm. Brzdné záření vzniká průchodem elektronového svazku wolframovým terčem umístěným za výstupním oknem. Brzdné záření má spojité energetické spektrum, jehož horní hranice je rovna energii urychlených elektronů. Mikrotron může sloužit také jako zdroj neutronů, které vznikají fotojadernými reakcemi fotonů brzdného záření na olovu nebo fotoštěpením uranu. Výtěžky jsou přibližně  $2,5 \cdot 10^{11}$  neutronů/s u olova,  $5 \cdot 10^{11}$  neutronů/s u uranu, emise je téměř izotropní do celého prostorového úhlu.



Obr. 1: Schéma mikrotronu MT25

vysokofrekvenční zdroj, 2 – vlnodná trasa, 3 – dutinový rezonátor, 4 – elektromagnet s vakuově těsným jhem, 5- cívky vinutí elektromagnetu, 6 – napájecí zdroj elektromagnetu, 7 – vývod svazku urychlených elektronů, 8 – deflekcí magnet D1, 9 - deflekcí magnet D2, 10 – elektronovod, 11 – první kvadrupólový dublet, 12 – kvadrupólový dublet dané trasy elektronovodu, 13 - deflekcí magnet D3, 14<sub>a,b,c</sub> – vakuový ventil, turbomolekulární a rotační vývěva, 15 – pohon pro úhlový pohyb vývodního kanálu pro výběr dráhy (krokový motor, absolutní digitální počítadlo otáček), 16 – pohon pro nastavení délky vývodního kanálu (krokový motor, absolutní digitální počítadlo otáček), 17 – vakuová průchodka elektromagnetu, 18 – vakuová průchodka kabeláže, 19 – vakuové měřky, 20 – indukční snímač středního proudu a polohy svazku urychlených elektronů, 21 – vakuové výstupní okénko (Al folie 0,1 mm), 22 – clona pro elektronový svazek nebo 23 – záslepka z Al tl. 30 mm

V letech 2003-2005 proběhla modernizace mikrotronu, jejímž cílem bylo zvýšení středního proudu urychlených elektronů, zlepšení kvality svazku a zvýšení spolehlivosti při dlouhodobém provozu. Toho bylo dosaženo záměnou zastaralého a poruchového magnetronového generátoru za moderní a výkonnější, přechodem od napájení 400 Hz měničem na napájení ze sítě 50 Hz, rekonstrukcí elektrických napájecích a signálních tras,

zlepšením vakuového systému instalací výkonnější TMP a nyní probíhajícím vybavením elektronovodných tras systému indikace a kontroly parametrů svazku. K automatizaci provozu mikrotronu plánovaným na rok 2008 bude zaveden nový systém kontroly a řízení počítačem s využitím programovatelného automatu TECO.

Část těchto prací byla a je prováděna ve spolupráci s SÚJV Dubna, kde paralelně probíhá modernizace téhož typu mikrotronu. Cílem modernizace je vytvořit podmínky pro rozšíření dosavadních aplikačních možností využití mikrotronu v základním i aplikovaném výzkumu a radiačních technologiích a na převzetí části aplikací z pracoviště v SÚJV po vyčlenění tamějšího mikrotronu plně pro projekt DRIBs. Přehled fyzikálních parametrů dosahovaných po rekonstrukci urychlovače je shrnut v tabulce 1.

**Tab. 1: Přehled fyzikálních parametrů Mikrotronu MT –25 a jeho radiačních polí**

Maximální energie	25 MeV
energetický rozsah	6 - 25 MeV
Proud urychlených elektronů	20 $\mu\text{A}$
<b>Vf zdroj</b>	
Přeladitelný magnetron	2796 $\pm$ 5 Mhz
Výkon	5 MW
Délka pulsu	3,5 $\mu\text{s}$
Vlnová délka	10 cm
Opakovací frekvence	423 $\text{s}^{-1}$
Frekvence rezonátoru	2798 Mhz
Frekvence napájecích zdrojů	50 Hz
Počet pracovišť	3
Homogenní pole	pracoviště B
<b>Elektronové pole</b>	
Velikost ve vzdálenosti 1m od výst. Okénka	min. 20x20 $\text{cm}^2$
Homogenita	$\pm 5 \%$
Dávkový příkon ve vzdálenosti 1m	25 $\text{Gy}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\mu\text{A}$
<b>Fotonové pole</b>	
Velikost ve vzdálenosti 1m od výst. okénka	min. 20x20 $\text{cm}^2$
Homogenita	$\pm 5 \%$
Dávkový příkon ve vzdálenosti 1m	0,2 $\text{Gy}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\mu\text{A}$

Mikrotron poskytuje tedy svazek urychlených elektronů s energií do 25 MeV s nominálním středním proudem do 20  $\mu\text{A}$ . Monoenergetičnost elektronů na výstupu z kanálu je lepší než 1%. Časová struktura elektronového svazku je určena principem urychlování a impulsním charakterem práce magnetronu. Opakovací frekvence pracovních cyklů je dána modulátorem vf zdroje a je rovna 423 Hz, délka impulsu je 3,5  $\mu\text{s}$ . Takovouto makrostrukturu má výstupní proud elektronů. Uvnitř každého tohoto makropulsu existuje ještě mikrostruktura, určená samofázováním elektronů na drahách do shluků délky cca 12 mm, následujících jeden za druhým ve vzdálenosti rovné délce vlny, na které pracuje magnetron (t.j. 10 cm). V makropulsu délky 3,5  $\mu\text{s}$  je 7600 těchto mikropulsů.

Ke konverzi elektronů na brzděné záření se používají terčičky z materiálu s vysokým atomovým číslem. Jejich tloušťka je optimalizovaná tak, aby v terči došlo k emisi podstatné části brzděného záření, aniž by záření emitované horními vrstvami terčičku bylo podstatně zeslabeno při průchodu hlubšími vrstvami. Brzděné záření má tvar kužele, který směřuje ve směru dopadajících elektronů a je soustředěno v prostorovém úhlu  $\Theta$ , který závisí na energii dopadajících elektronů, tloušťce terčičku a energii fotonů brzděného záření. Pro aktivační analýzu je důležitá energie fotonů vyšší nežli prahová energie dané fotojaderné reakce a pro  $\Theta$  platí poloempirický vztah:

$$\Theta = 58,6/E + a(E,Z) \cdot e^{-b(Z)/t}$$

kde E je energie elektronů [MeV], t je tloušťka v radiačních délkách, pro W je radiační délka 3,7 mm, Z je atomové číslo, kde

$$a(E,Z) = 5,17 - 1,32 \cdot \ln E + 2,28 \cdot 10^{-2} \cdot Z$$

$$b(Z) = 5,1 \cdot 10^{-3} + 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot Z$$

Pro wolfram je Z = 74 a pro energii elektronů 23 MeV a tloušťku terče 2mm vychází  $\Theta = 13^\circ$ .

Tuto rovnici lze využít pro určení rozměrů ozařovaného vzorku, resp. geometrie ozařování. Zvyšováním energie urychlených elektronů je jednak kužel brzděného záření užší a jednak roste jak celkový počet produkovaných fotonů, tak i podíl fotonů gama s vysokou energií. Jinak řečeno, zvýšením energie elektronů se dosáhne značného zvýšení hustoty fotonů schopných vyvolávat fotojaderné reakce, jichž se využívá při GAA. Vyvedený svazek elektronů může být před dopadem na wolframový terč rozšířen, takže zdroj brzděného záření má plošný charakter. Téhož efektu, a to ještě ve větší míře, lze dosáhnout rozmítáním svazku proměnnými magnetickými poli.

Vysoká pronikavost vysokoenergetických fotonů brzděného záření se umožňuje dokonalé prozáření větší hmotnosti vzorku řádu až desítek gramů. Oproti INAA (instrumentální neutronová analýza) jsou tedy i nároky na homogenitu vzorku nižší a lze bez problémů analyzovat i vzorky se zrnem 1-2 mm.

Při ozařování na mikrotronu lze vyvádět svazky elektronů z různých orbit, tj. s různými energiemi. Tím lze využít různých hodnot reakčních prahů.

Výhody využití urychlovačů elektronů, jako zdroje tvrdého záření, pro účely gama aktivační analýzy vyniknou především v oblasti polykomponentní aktivační analýzy. Lze je shrnout do několika bodů:

- energie, intenzita a charakter záření lze volit podle podmínek analýzy
- s tokem záření je možno manipulovat (skenovací zařízení, elektromagnetické čočky)
- vysoká pronikavost brzděného záření umožňuje ozařovat reprezentativní vzorky o vysoké hmotnosti
- GAA lze použít pro stanovení většiny prvků

#### Srovnání GAA a NAA

- pomocí GAA se dají jednoduše stanovit následující prvky: Na, Mg, Si, Cl, K, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, I, Cs, Ba, Ce, Nd, Sm, Au, Tl, Pb, Th a U v různých matricích, zejména v geologických vzorcích. Některé z těchto prvků nelze v určitých vzorcích při malých koncentracích stanovit pomocí NAA.

- na rozdíl od NAA, pomocí GAA můžeme také stanovit stopové koncentrace některých prvků s malým protonovým číslem, jako C, N, O, F a P.

- využitím vysokoenergetického brzděného záření se eliminuje problém neutronového samostínění v NAA pro matrice s vysokým účinným průřezem pro neutronový záchyt (např. materiály s vyšším obsahem B, Cd, lanthanoidů, Au, atd.

- vysoká pronikavost vysokoenergetických fotonů brzděného záření umožňuje dokonalé prozáření větší hmotnosti vzorku - řádu až stovky gramů. Oproti INAA jsou tedy i nároky na

homogenitu vzorku nižší a lze bez problémů analyzovat i vzorky se zrnem 1-2 mm (např. zlaté rudy, koncentráty těžkých minerálů, atd.)

- stanovení některých stopových prvků v životním prostředí pomocí radiochemické GAA, jako F, Si, Tl, a Pb, které je velice obtížné získat užitím NAA

- značný počet aplikací GAA vyhovuje požadavkům na rychlost, přesnost a dostatečně nízkou mez stanovitelnosti a to za přijatelnou cenu.

Na druhou stranu je potřeba zmínit i nevýhody .Na rozdíl od NAA není GAA vhodná pro analýzu malých vzorků (méně než 1 mg) a analytické možnosti pro biologické vzorky jsou pro velký počet prvků značně limitovány nedostatečnou přesností a/nebo nedostačující mezí stanovitelnosti.

Co říci závěrem? GAA by měla být brána v úvahu buď jako doplňková metoda k NAA, protože vhodným zkombinováním obou technik lze stanovit většinu prvků periodické tabulky, nebo jako alternativní metoda pro situace, kdy není z nějakých důvodů přístup na reaktor. Toto krátké shrnutí si rozhodně neklade za úkol shrnout všechny možnosti a záludnosti GAA. V podstatě jde o to, že po delší pauze je mikrotron, naprosto ideální zdroj pro GAA, opět v provozu, tak jsme chtěli tímto příspěvkem připomenout, dle našeho soudu, neprávem opomíjenou analytickou metodu.

1. Šimáně Č., Vognar M., Kliský V., Československý mikrotron a jeho využití pro gama aktivační analýzu, Souhrny přednášek Konference o instrumentální aktivační analýze IAA 81, 1.-5. června 1981, Klučenice, ÚISJP, str. 7
2. Vognar, M., Výstavba bezkomorového mikrotronu MT25 na FJFI ČVUT a perspektivy jeho využití, 9.celostátní seminář "Jaderné metody v hornictví, geologii, geofyzice a geochemii", Mariánská u Jáchymova, 1991
3. Řanda Z., Špaček B., Kunců J., Benada J., Nondestructive gamma activation analysis of mineral materials, Ed. Z. Řanda, Czechoslovak Atomic Energy Commission, Nuclear Information Centre, Praha, 1981. 1-157
4. Řanda Z., Kreisinger F., *J. Radioanal. Chem.*, **77** (1983) 279
5. Vognar M., Šimáně Č., Chvátíl D., *Acta Polytechnica*, **38** (1998) 131
6. Vognar, M., Šimáně, Č., Burian, A., Chvátíl, D., Microtron as a potential source of relativistic electrons and hard bremsstrahlung for dosimetric metrology, 5<sup>th</sup> Symposium of Nuclear Methods and International Workshop „Microtron '95“, University of Plovdiv, 27-28 October 1995, Plovdiv, Bulgaria, p.14
7. Vognar, M., Šimáně, Č., Burian, A., Chvátíl, D., *Nucl. Instrum. Meth. in Physics Res. A*, **380** (1996) 613
8. Vognar, M., Šimáně, Č., Chvátíl, D., *Acta Polytechnica*, **43** (2003) 50

#### **Micotron MT 25 – hard bremsstrahlung source**

*Chvátíl David, Vognar Miroslav, Krist Pavel*

Nuclear Physics Institute, v.v.i., Academy of Sciences of the Czech Republic, Řež near Prague, Czech Republic

The reconstruction of the cyclic electron accelerator – microtron has been realized from 2003 to 2005. The main aim of the reconstruction was change all power supplies, increase of microtron operation stability and its physical parameters. Thanks to reconstruction was obtained infallible source of relativistic electrons and hard bremsstrahlung with energy range 6-25 MeV. These energy range and mean power in electron beam allow microtron use in following areas: gamma activation analysis, radiation damage of materials, irradiation of biological samples, production radioisotopes, dosimetric measuring in homogeneous electron and photon fields.