

# Laboratoř analýz a modifikace látek iontovými svazky Ústavu jaderné fyziky AV ČR

## 1. Kapitola

### ÚVOD

Účelem této publikace je stručná informace o aktivitách skupiny nukleárních analytických metod v Ústavu jaderné fyziky AV ČR a zejména možnostech využití nového urychlovače typu Tandetron 4130 MC, který bude uveden do provozu počátkem r. 2006. V následujícím období bude urychlovač postupně doplněn dalším experimentálním zařízením umožňujícím jeho efektivní využití. Nový urychlovač představuje moderní, universální zařízení využitelné v mnoha oblastech základního a aplikovaného výzkumu a při školení studentů v oborech jaderná fyzika, jaderné analytické metody, modifikace látek iontovými svazky, radiační chemie, dozimetrie ionizujícího záření, radiobiologie a materiálový výzkum. Ústav jaderné fyziky má mimořádný zájem na efektivním a mnohostranném využití nového urychlovače a vyzývá studenty a zainteresované vědecké pracovníky k účasti na budování experimentálních zařízení a na jejich budoucím provozování.

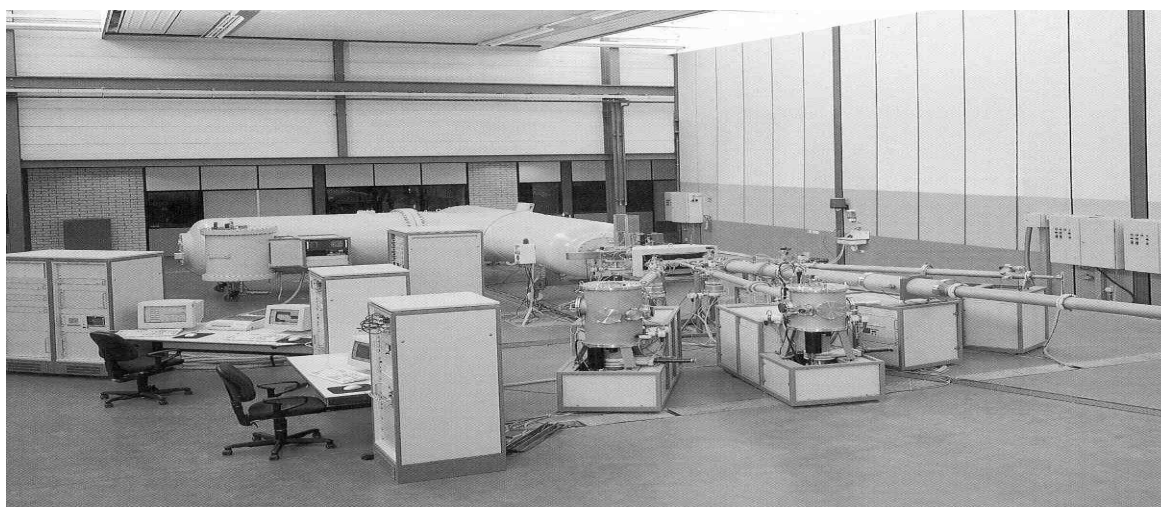
Počátek rozvoje a širšího využití jaderných analytických metod v Ústavu jaderné fyziky AV ČR spadá do první poloviny 60. let minulého století. Jednalo se především o neutronovou aktivační analýzu a o promptní metody analýzy na svazcích neutronů a nabitých částic. Během uplynulého období byla zavedena řada analytických metod, získány praktické zkušenosti s jejich aplikací a navázána spolupráce s mnoha českými a zahraničními výzkumnými pracovišti.

Svazky urychlených iontů se využívají k modifikaci povrchových vrstev pevných látek a pro analýzu jejich složení a struktury. Tyto metody mají řadu unikátních vlastností pro které nemohou být nahrazeny jinými alternativními postupy. V Ústavu jaderné fyziky AV ČR (ÚJF) se pro tyto účely zatím využívá elektrostatický urychlovač Van de Graaffova typu. V průběhu posledních 10 letch byly v ÚJF vybudovány aparatury pro analýzy metodami protonové fluorescenční analýzy (PIXE), pružným rozptylem nabitých částic (RBS, ERDA) a různými jadernými reakcemi (PIGE, NRM) a byly získány značné praktické zkušenosti s využitím těchto analytických postupů v základním a aplikovaném výzkumu. Široce pojatý interdisciplinární výzkum se provádí v těsné spolupráci se specializovanými pracovišti v ČR a v zahraničí. Dosavadní činnost je zaměřena zejména na sledování procesů vytváření tenkých vrstev a vrstevnatých struktur s význačnými mechanickými, elektrickými, magnetickými, optickými, chemickými a biologickými vlastnostmi a na studium fyzikálních a chemických procesů, které v nich probíhají. Pozornost se věnuje analýze vzorků životního prostředí, biologických objektů a vzorků pro lékařský výzkum. Při využití iontových svazků pro analýzy a modifikaci látek dosahuje ÚJF srovnatelné mezinárodní úrovně.

Skupina jaderných analytických metod ÚJF AV ČR se systematicky podílí na studiu syntézy, struktury a vlastností progresivních materiálů pro mikroelektroniku, optiku, optoelektroniku, kryogeniku a materiálů s význačnými vlastnostmi (mikrotvrdość, chemická odolnosť, biokompatibilita a pod.). Povrchové struktury a systémy připravované ve spolupráci

s našimi a zahraničními pracovišti různými metodami (epitaxní růst, Czochralskiho metoda, iontová implantace, plasmová deposice, chemická deposice, CVD, magnetronové naprašování, atp.) jsou na našem pracovišti analyzovány metodami RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry), ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis), PIXE (Particle Induced X-ray Emission), PIGE (Particle Induced Gamma Ray Emission). Analýzy prováděné v ÚJF jsou nepostradatelné pro vývoj nových progresivních materiálů.

Pro udržení dosavadní úrovně a dalšího pokroku v oblasti modifikace látek iontovými svazky a jejich analýz nukleárními metodami byl zakoupen nový elektrostatický urychlovač typu Tandetron 4130 MC od firmy High Voltage Engineering Europa B.V., který bude uveden do provozu počátkem r. 2006. Urychlovač bude poskytovat svazky iontů od vodíku po zlato s intovými toky do desítek  $\mu\text{A}$  a energiemi od stovek keV do desítek MeV



**Obrázek 1: Urychlovač Tandetron 4130 MC s iontovými trasami.**

Nový urychlovač, jediný svého druhu v ČR, umožní podstatným způsobem rozšířit dosavadní analytické možnosti, zavést nové způsoby modifikace látek a syntézy nových materiálů a struktur. Otevře nové možnosti v základním a aplikovaném výzkumu v jaderné a atomové fyzice, v radiační chemii a biologii.

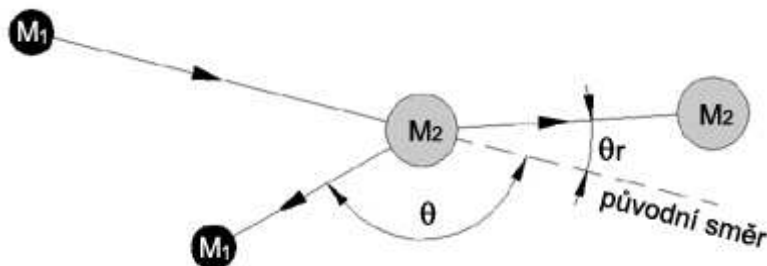
V souvislosti s instalací nového urychlovače počítáme v budoucnosti s omezením analytického servisu a posílením výzkumu zejména v oblastech materiálového inženýrství, radiobiologie, radiační chemie a interakce nabitých částic s prostředím. V současné době vybavujeme naše pracoviště dalšími zařízeními pro deposici tenkých vrstev a pro sledování fyzikálně-chemických procesů v povrchových vrstvách látek *in situ*. Hodláme spolupracovat s tradičními i novými partnery, kteří mohou zajistit přípravu materiálů a struktur speciálními metodami, které nejsou v ÚJF k dispozici. Tato pracoviště rovněž zajišťují diagnostiku materiálů komplementárními metodami optické spektroskopie (FTIR, UV-VIS, Ramanovská spektroskopie), elektronové mikroskopie (HRTEM, SEM), atomové tunelovací mikroskopie (AFM), elektronové spektrometrie (XPS), difrakce RTG záření a neutronových svazků a klasickým měřením elektrických parametrů a povrchové polarizace.

## 2. Kapitola

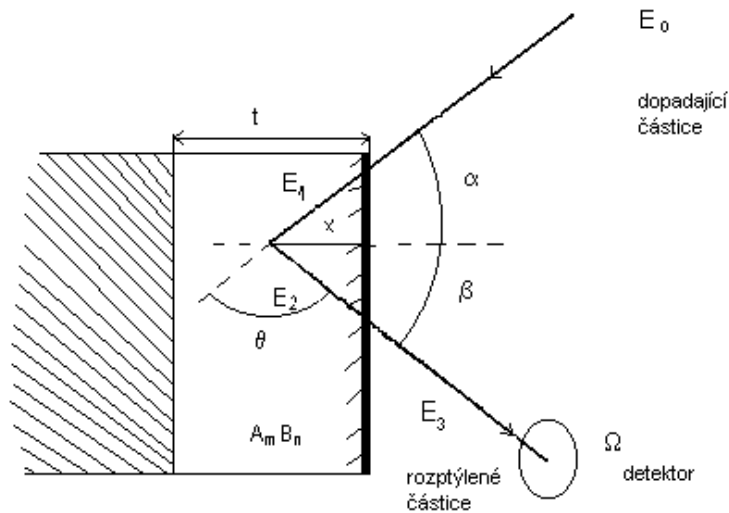
# STÁVAJÍCÍ JADERNÉ ANALYTICKÉ METODY

### 2.1 Rutherford Back-Scattering spectrometry (RBS)

Metoda RBS je nedestruktivní analytické technika, která je hojně využívána pro studium tenkých, řádově nm, vrstev až po multi-vrstevnaté systémy o tloušťce desítek mikrometrů. Rovněž je vhodná pro studium bulkových materiálů jak amorfních tak krystalických, které jsou připravovány nejrůznějšími metodami. Metoda RBS je založena na registraci energetických spekter pružně rozptýlených částic viz. obrázek 2. Tato metoda je vhodná pro nedestruktivní stanovení hloubkových koncentračních profilů prakticky všech prvků. Těžké ionty z nového urychlovače umožní dosáhnout lepšího hmotnostního a hloubkového rozlišení, což je významné pro uplatnění metody RBS v moderních nanotechnologiích. Velké spektrum urychlovaných iontů umožní optimalizaci analytického postupu pro každý konkrétní materiál. RBS je založena na principu pružného odrazu iontů, jejichž spektrum detekujeme polovodičovými detektory s povrchovou bariérou.



Obrázek 2. Pružný rozptyl iontů s hmotností  $M_1$  na jádrech s hmotností  $M_2$ .  $\theta_r$  úhel zpětného rázu a  $\theta$  úhel rozptylu.



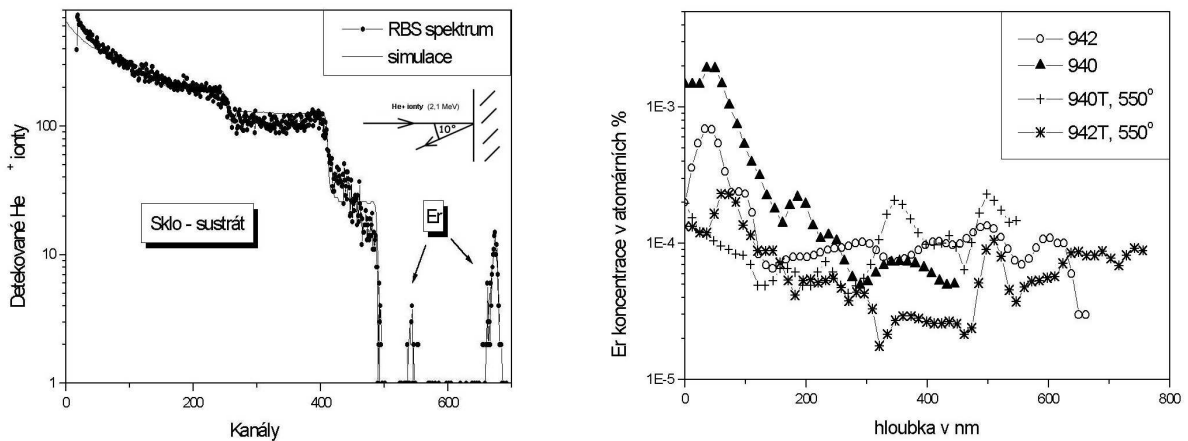
**Obrázek 3.** Schéma rozptylu nabité částice na atomu ležícím v hloubce  $x$  pod povrchem vzorku ve vrstvě se složením  $A_m B_n$ , která je deponována na lehčím substrátu. Svazek nabitých částic s energií  $E_0$  dopadá šikmo pod úhlem  $\alpha$  vzhledem k normále k povrchu vzorku a rozptýlené částice se registrují detektorem umístěným pod úhlem  $\beta$ . V hloubce  $x$  se dopadající částice s okamžitou energií  $E_1$  pružně rozptyluje, těsně po rozptylu má energii  $E_2$  a při vstupu do detektoru energii  $E_3$ .  $\Omega$  je prostorový úhel detektoru. Ve výřezu je schematicky znázorněno příslušné RBS spektrum.

Velikost energie zpětně odražených iontů, které detekujeme pod určitým úhlem, je ovlivněna ztrátou energie vlivem změny hybnosti při srážce s jádrem atomu vzorku a ztrátě energie způsobené průchodem částice v krystalové mřížce vzorku. Detekční limity metody RBS se pohybují v rozmezí  $10^{13}$ - $10^{15}$  atomů/cm<sup>2</sup>, hloubkové rozlišení průměrně činí 10 nm, ve vhodné geometrii měření může být i zlepšeno. Hmotnostní rozlišení může být výrazně zlepšeno použitím těžších iontů, které bude poskytovat nový Tandetron.

## Příklady použití metody RBS

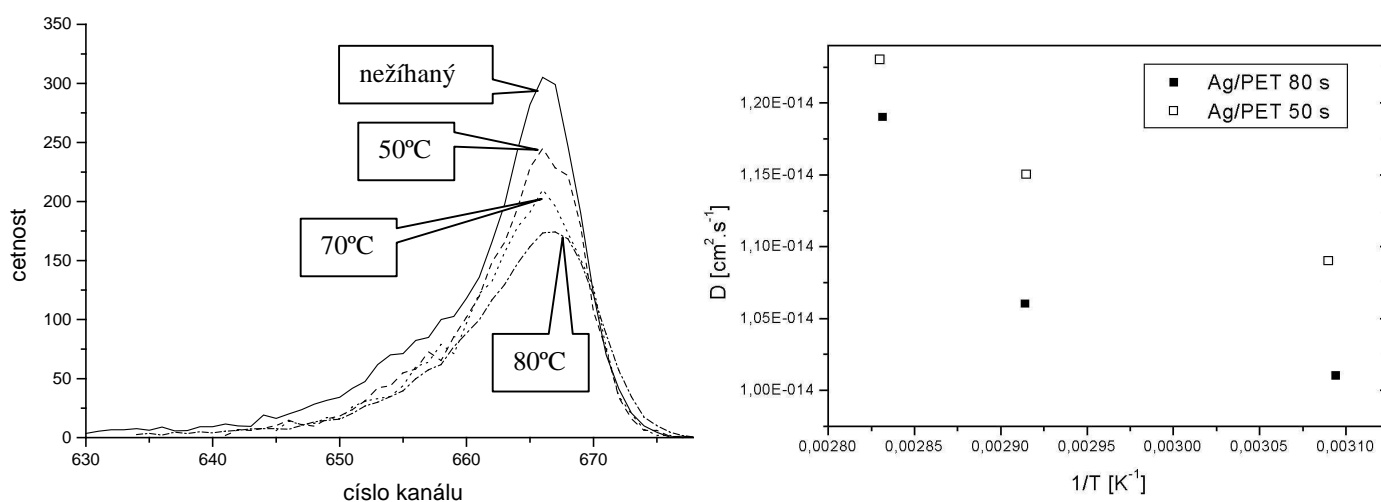
Planární optické vlnovody ve sklech, využívané jako základní komponenty v integrovaných optických strukturách jako multiplexory, splitterly atd., mají celou řadu výhod. Sklo je relativně levný materiál, má transparentní vlastnosti, vysoký práh optického poškození a je dostupný i ve větších rozměrech. Optické vlastnosti jsou získány dopací laserově aktivních iontů např.  $\text{Er}^{3+}$  metodou difúze s použitím elektrického pole, kdy tento iont difunduje do skla a vytváří tak obohacenou vrstvu využitelnou jako planární vlnovod v oblasti laserových vlnových délek.

Na obrázku 4 vidíme vlevo RBS spektrum skla, které neobsahuje těžké příměsi, a signál od erbia, které nadifundovalo do určité hloubky. Použitá geometrie měření je naznačena nahoře uprostřed. Z RBS spektra můžeme pomocí softwaru GISA extrahovat hloubkové profily koncentrace Er ve skle. Vpravo vidíme hloubkové profily pro dva vzorky u nichž se lišili podmínky difúze asistované elektrickým polem a hloubkové profily Er pro tytéž vzorky, které byly žíhány při teplotě 550 °C. Při zvýšené teplotě se Er ionty dostávají hlouběji do skla.



Obrázek 4 Difúze  $\text{Er}^{3+}$  laserově aktivních iontů do skla , hloubkové profily Er.

Metodou RBS také zkoumáme zajímavou problematiku – interakce kovů a polymerů. Polymery mají velmi široké uplatnění díky svým různorodým vlastnostem. Metalizované polymery jsou velmi perspektivní pro použití v mikroelektronice. Výzkum byl zaměřen na studium mobility kovových klastrů event. nano-klustrů v polymerní matici v souvislosti s jejich elektrickými vlastnostmi. RBS měření nám poskytne informaci o hloubkovém profilu Ag do polymeru PET viz. obrázek, z něhož lze extrahovat difúzní koeficienty charakterizující aktivitu kovových částic v polymeru. Difúzní koeficienty jsou vyneseny v Arrheniově grafu v závislosti na reciproké teplotě viz. obrázek.



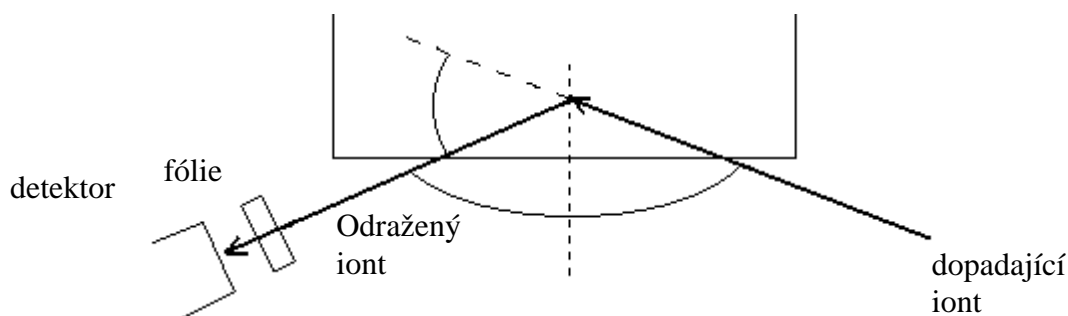
**Obrázek 5.** Vlevo- RBS spektrum odpovídající Ag signálu měnící se s teplotou. Vpravo- Odpovídající extrahované difúzní koeficienty Ag v PET pro jednotlivé teploty.

## 2.2. Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA)

**Metoda ERDA** je založena na detekci atomů vyražených dopadajícími ionty. Při vhodné zvolené geometrii viz. Obr 4 lze detekovat vyražené částice a měřením spektra jejich energií a četností lze stanovit hloubkový profil detekovaného prvku. Standardní metoda ERDA je proto využívána ke studiu hloubkových profilů lehkých prvků jako je vodík, deuterium viz. Obr. 4b v případě našeho uspořádání s využitím svazku  $\text{He}^+$  iontů. V případě nového urychlovače nám umožní urychlené těžší ionty výrazně rozšířit možnosti detekce dalších lehčích prvků jako O, C, N atd. (viz. obrázek 4)

## Příklady použití metody ERDA

Ozáření polymerních materiálů energetickými ionty způsobuje nevratné změny

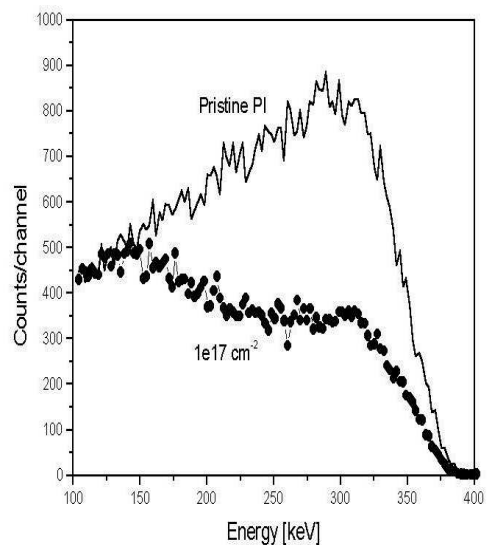
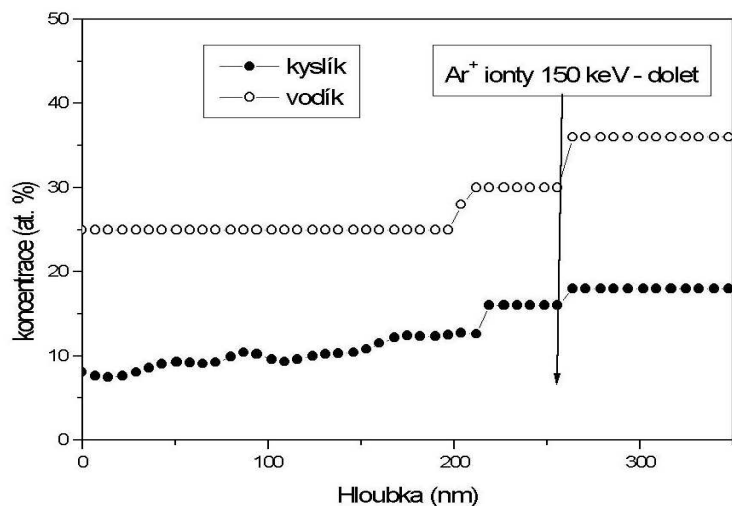


**Obrázek 4** Použití metody ERDA pro studium vodíku v deponovaných vrstvách

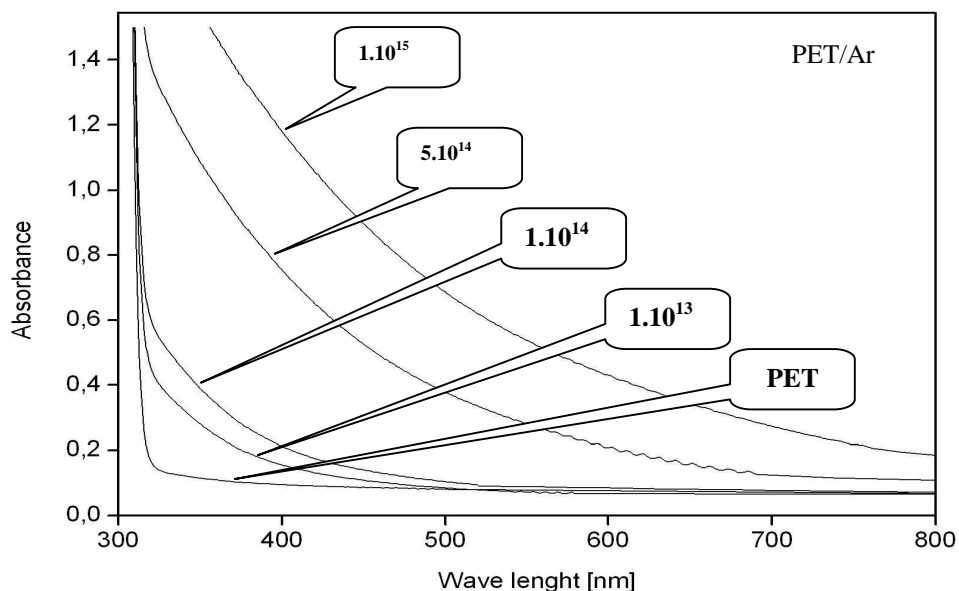
v makromolekulární struktuře polymeru a můžeme tak kontrolovaným způsobem měnit mechanické a chemické vlastnosti povrchové vrstvy, která je iontovými svazky modifikována. ERDA je často používána pro sledování obsahu vodíku v takto upravených polymerech, ozáření ionty způsobuje rozpad polymerních řetězců a posléze vznik nových vazeb, kdy během tohoto procesu se uvolňují lehké fragmenty z modifikované vrstvy.

Sledovali jsme změny složení např. v polymeru PET implantovaném ionty  $\text{Ar}^+$ , s energií 150 keV. V případě nejvyšších dávek  $5 \cdot 10^{14}$ - $1 \cdot 10^{15}$  iontů/cm<sup>2</sup> vykazoval polymer úbytek vodíku a kyslíku v povrchové vrstvě, jejíž tloušťka odpovídá střednímu doletu těchto iontů v polymeru PET obrázek 5. Jedním z procesů probíhajících pod vlivem ozařování ionty je vznik dvojitých vazeb v rámci polymerních řetězců. Kvantitativně lze množství těchto vazeb odhadnout na základě míry absorpce v oboru UV-VIS záření. Na obrázku 6 vidíme prudký nárůst absorpance pro použité vyšší dávky iontů  $\text{Ar}^+$ .

A obrázku 5 vpravo byl metodou ERDA určen výrazný úbytek vodíku v povrchové vrstvě polyimidu ozářeném 60 keV ionty  $\text{Fe}^+$ .



Obrázek 5. Hloubkové profily prvků v polymerech implantovaných  $\text{Ar}^+$  a  $\text{Fe}^+$  ionty stanovené metodami RBS a ERDA.



Obrázek 6. UV-VIS absorpce polymerů implantovaných  $\text{Ar}^+$  ionty

Kapitola

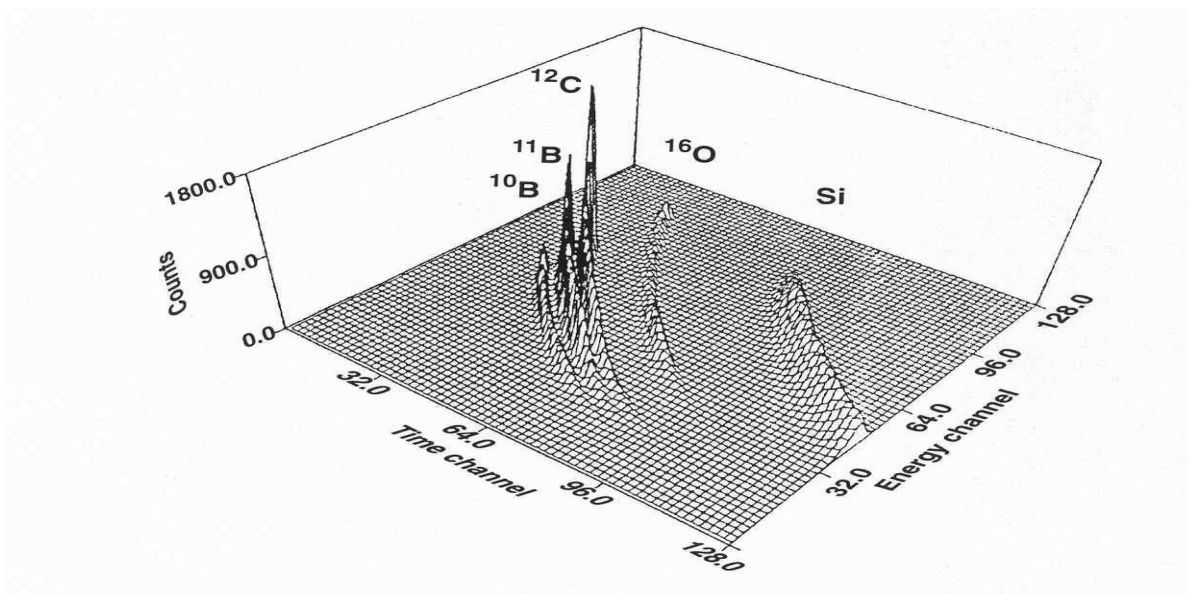
JADERNÉ ANALYTICKÉ METODY REALIZOVANÉ V BUDOUCNU

### 3.1 ERDA-TOF



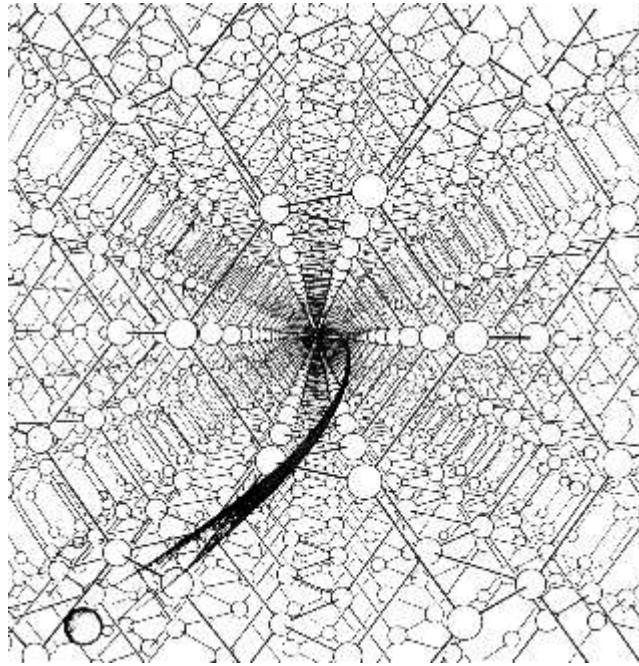
Metoda **ERDA-TOF** (Time-of-Flight) s těžkými ionty umožňuje současné stanovení hloubkových profilů několika lehkých prvků s vysokou mírou správnosti. Metoda je založena na simultánním měření energie a rychlosti atomů vyražených z povrchu vzorku dopadajícími ionty. Z energie a rychlosti se stanoví hmotnost atomů. Rychlost je stanovena měřením času průletu atomu mezi dvěma detektory umístěnými na fixní vzdálenosti. Výsledkem je třídímní spektrum viz. Obr. 7, kde jsou zaznamenány počty částic v závislosti na čase průletu (hmotnosti) a na energii částic.

**Obrázek 7** Spektrum měřené metodou ERDA-TOF.



### 3.2. RBS-channeling

Metoda **kanálování nabitých částic** je unikátním a nenahraditelným prostředkem pro nedestruktivní studium struktury krystalů, poruch krystalické struktury a chování atomů příměsí. Metoda je založena na efektu kanálování obrázek 8, kdy se ionty převážně pohybují v kanálech mezi uspořádanými atomy. Měříme-li závislost počtu rozptýlených částic na úhlu natočení krystalu vůči dopadajícímu svazku částic, projeví se kanálování prudkým poklesem intenzity rozptýlených částic v okamžiku, kdy svazek vstupuje do vzorku v některém z kanálovacích směrů totožných se směrem význačných krystalových os. V porovnání s náhodným spektrem je výtěžek (počet detekovaných částic) při kanálování podstatně menší obrázek 10. Přítomnost cizích atomů v intersticiálních polohách se projeví typickými změnami úhlové závislosti výtěžku rozptylu a tvaru energetického spektra rozptýlených částic. K realizaci této metody je nezbytná instalace goniometru, který natáčí krystalický vzorek a umožní nalezení kritického úhlu pro měření kanálovacího směru v krystalickém materiálu.



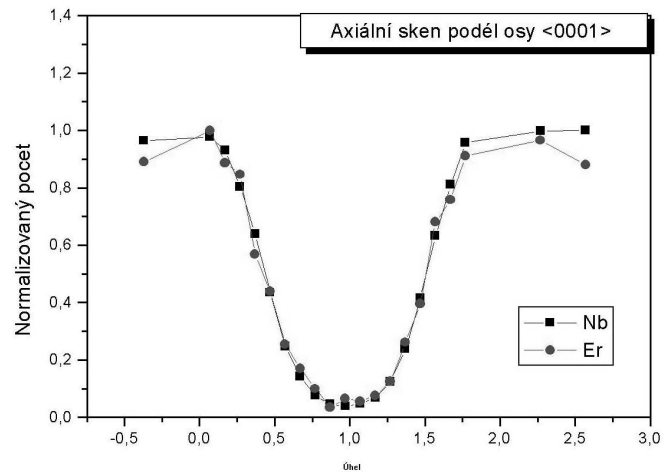
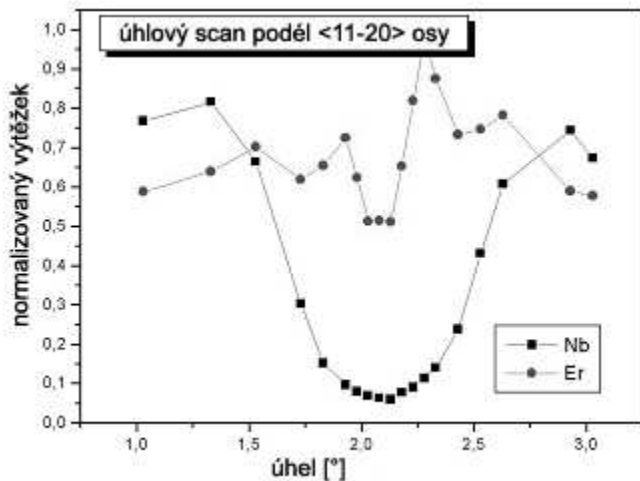
**Obrázek 8 Schéma procesu kanálování**

### **Aplikace metody RBS-channeling**

Pomocí metody RBS channeling lze studovat následujících typy materiálů:

1. Opto-elektronické prvky, vlnovody, vlnovodné lasery na bázi monokrystalických materiálů např.  $\text{LiNbO}_3$ , safíru  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  
Signál od substrátu v kanálovacím spektru odražených částic je výrazně snížen, proto lze měřit i příměsi lehkých prvků a kvalitu krystalu event. počet dislokací.
2. Polovodiče – monokrystalické epitaxní vrstvy, určování poloh dopantů, natočení krystalické mřížky epitaxní vrstvy a substrátu.
3. Nové technologie přípravy vlnovodných struktur tvořících základ planárních vlnovodných laserů, zesilovačů a konvertorů na bázi krystalických vrstev na bázi GaN, GaInN a karbidů  
GaN, GaInN a karbidy jsou krystalické materiály, které lze velmi úspěšně použít pro integrovanou optiku. V současné době jsou připravovány vzorky tohoto typu technologií epitaxe jsou dopovány opticky aktivními ionty Er, Yb, Nd. RBS channeling je jedinou metodou, která může úspěšně tyto struktury zkoumat a definovat polohy a hloubkové profily opticky aktivních atomů.

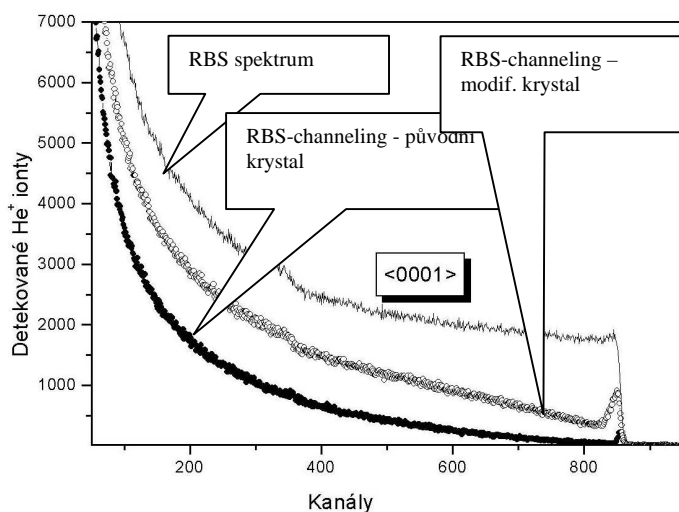
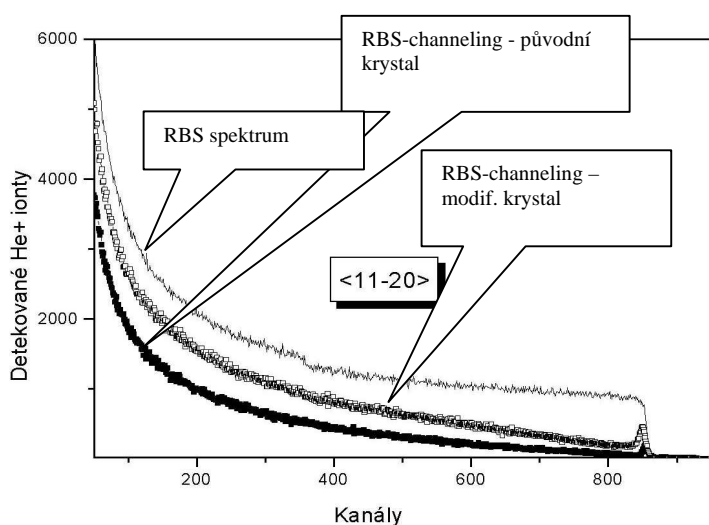
V současné době se zabýváme ve spolupráci s Forschungszentrum Rossendorf měřením dopovaných monokrystalických struktur Er:  $\text{LiNbO}_3$  za účelem determinace polohy laserově aktivního dopantu Er v krystalické mřížce. Podrobným studiem tvaru axiálního skenu, integrálního výtežku iontů při skenu axiálního kanálu, a následné simulaci s využitím metod molekulární dynamiky a Monte Carlo algoritmu lze determinovat přesnou polohu dopantu Er v krystalické mřížce. Ukázka axiálního skenu řezu  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  monokrystalu Er:  $\text{LiNbO}_3$  viz. obrázek 9.



**Obrázek 9 Úhlový skenu řezu  $\langle 11-20 \rangle$  a  $\langle 0001 \rangle$  monokrystalu  $\text{LiNbO}_3$  dopovaného  $\text{Er}^{3+}$  metodou RBS-channeling.**

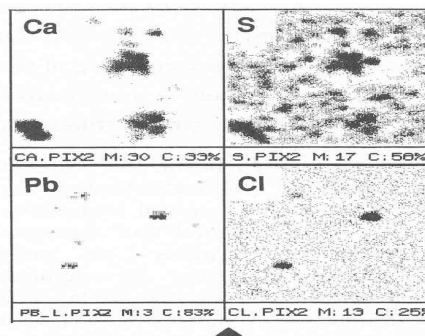
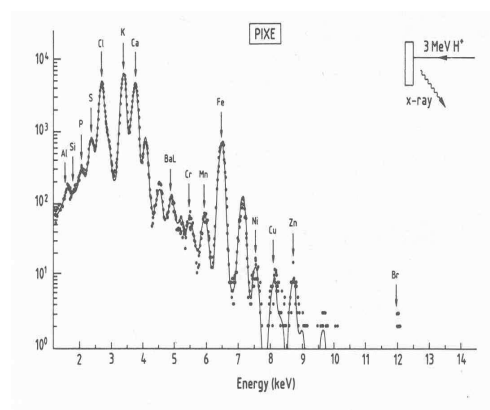
Spektra získaná metodou RBS-channeling lze rovněž využít ke studiu modifikace monokrystalického materiálu, jak jsme rovněž učinili v případě dopovaného, kdy původní dopovaný materiál byl metodou protonové výměny modifikován tak, že byla vytvořena cca 10 mikrometrová vrstva s odlišným indexem lomu. Takto byla vytvořena planární vlnovodná struktura. Ukazuje se, že protonová výměna způsobí modifikaci krystalu – mřížková konstanta se ve dvou směrech podél krystalických os zvětší, pro různé řezy krystalem tak sledujeme různé tvary spekter v kanálovacím směru viz. obrázek 10.

**Obrázek 10 Srovnání standardního RBS spektra se spektrem ve směru hlavní krystalické osy  $\text{Er}:\text{LiNbO}_3$  a  $\text{Er}:\text{LiNbO}_3$  modifikovaného protonovou výměnou.**



### 3.3 Iontová mikrosonda

Iontová mikrosonda vyžaduje velmi stabilní svazek nabitých částic fokuzovaný na  $\mu\text{m}$  průměr. Ve spojení s metodami, PIXE, RBS nebo ERDA umožňuje studium rozložení prvků na povrchu materiálů s  $\mu\text{m}$  stranovým rozlišením a mezemi stanovitelnosti o 2-3 řády nižšími, než je běžné u elektronové mikrosondy. Iontová mikrosonda se využívá pro mapování biologických objektů, uměleckých artefaktů, identifikaci defektů na mikrostrukturách a pro iontové mikroobrábění. Takové zařízení v ČR dosud není k dispozici ale počítá se s jeho vybudováním na novém urychlovači.



### 3.4. Accelerator Mass Spectrometry (AMS)

Urychlovačová hmotnostní analýza – Accelerator Mass Spectrometry (AMS) je jednou z nejcitlivějších analytických metod, umožňuje stanovit příměsi prvků resp izotopů v koncentracích  $10^{-15}$ . Jde o variantu klasické hmotnostní spektrometrie s využitím výkonného urychlovače. V zahraničí se metoda AMS široce využívá pro uhlíkové datování. Dále pro stanovení dlouho žijících radionuklidů ( $^3\text{H}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{129}\text{I}$ ), které jsou vedlejším produktem jaderných technologií a pokusných jaderných explozí. Metoda AMS slouží mimo jiné i pro detekci ilegálních jaderných aktivit. Významné je rovněž použití metody AMS v biologii a medicíně pro sledování migrace sloučenin značených např. isotopy  $^3\text{H}$  a  $^{14}\text{C}$ . V ČR zařízení pro analýzy metodou AMS není a na existujících urychlovačích ho principiálně nelze realizovat. Nový urychlovač by po doplnění dalšími speciálními zařízeními může být použit pro stanovení radionuklidů  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$  a  $^{41}\text{Ca}$ .

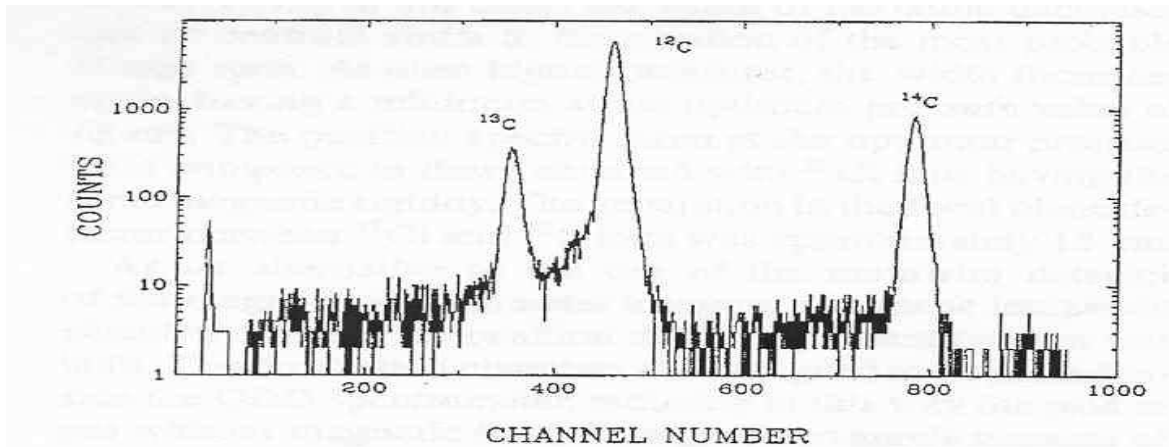


Fig. 2. Energy spectrum obtained with a solid state detector showing  $^{14}\text{C}$  ions. The contaminants  $^{12}\text{C}$  and  $^{13}\text{C}$  are originated in the breakup of  $^{12}\text{CH}_2$  and  $^{13}\text{CH}$  molecules in the stripper foil.

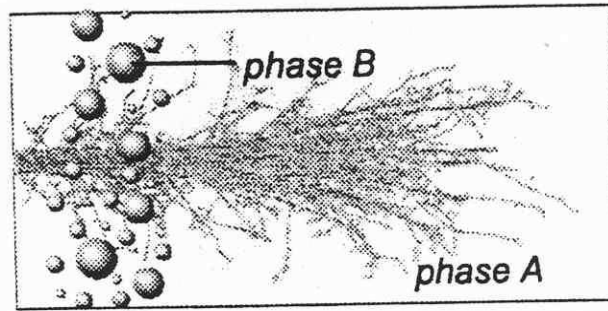
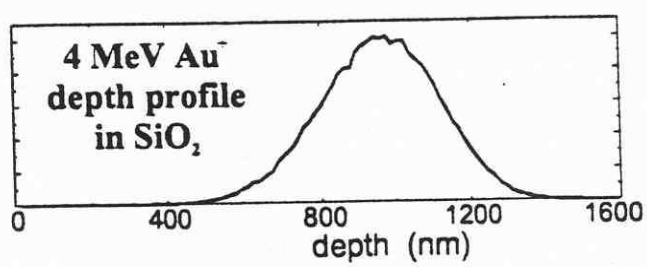
#### 4. Kapitola

### VYUŽITÍ URYCHLOVAČE NABITÝCH ČÁSTIC V INTERDISCIPLINÁRNÍM VÝZKUMU

#### 4.1.

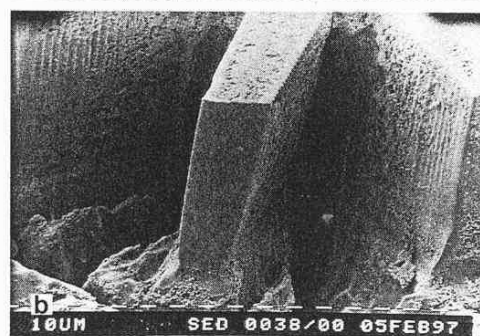
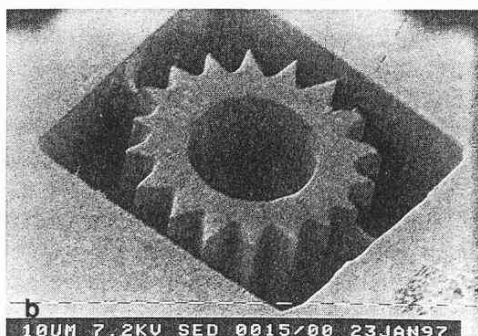
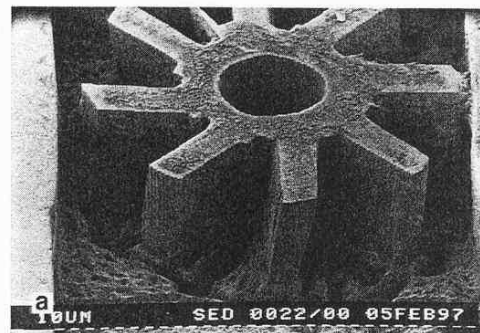
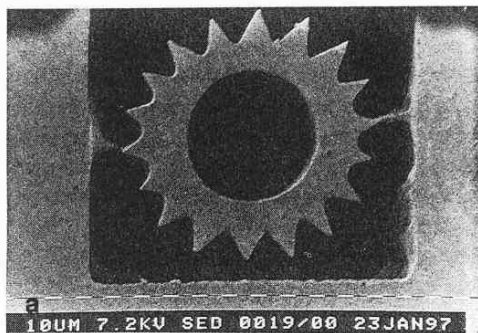
**Iontová implantace a syntéza nových materiálů.** Nový urychlovač tandemového typu, který urychluje ionty většiny prvků na energie od  $10^2$  –  $10^4$  keV může být využit pro iontovou implantaci, která je jednou z nejvýznamnějších technik používaných v materiálovém inženýrství pro modifikaci látek. Zařízení se srovnatelnými parametry v ČR zatím neexistuje. Předpokládá se využití iontové implantace pro vytváření struktur s význačnými optickými, elektrickými a biologickými vlastnostmi. V tomto směru navážeme zejména na existující, dlouhodobý výzkum modifikace polymerních materiálů iontovou implantací.

Hlubkový profil (nahore) a znázornění trajektorií iontů Au s energií 4 MeV implantovaných do  $\text{SiO}_2$  (dole).



#### 4.2.

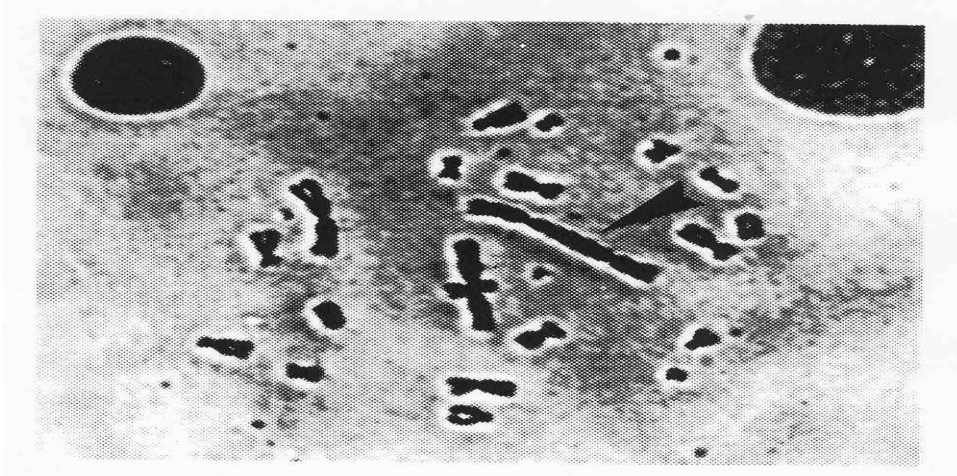
**Iontová litografie a mikroobrábění iontovými svazky** jsou v současné době rychle se rozvíjející obory zaměřené na přípravu mikroelektrických a optoelektrických komponent vysoké integrace a výrobu miniaturních mechanických zařízení s možnými aplikacemi např. v medicíně. Tuto techniku bude možné realizovat na novém urychlovači po jeho vybavení iontovou mikrosondou (viz. výše).



Ozubená kolečka vytvořená metodou iontové litografie ve fotorezistu.

### 4.3

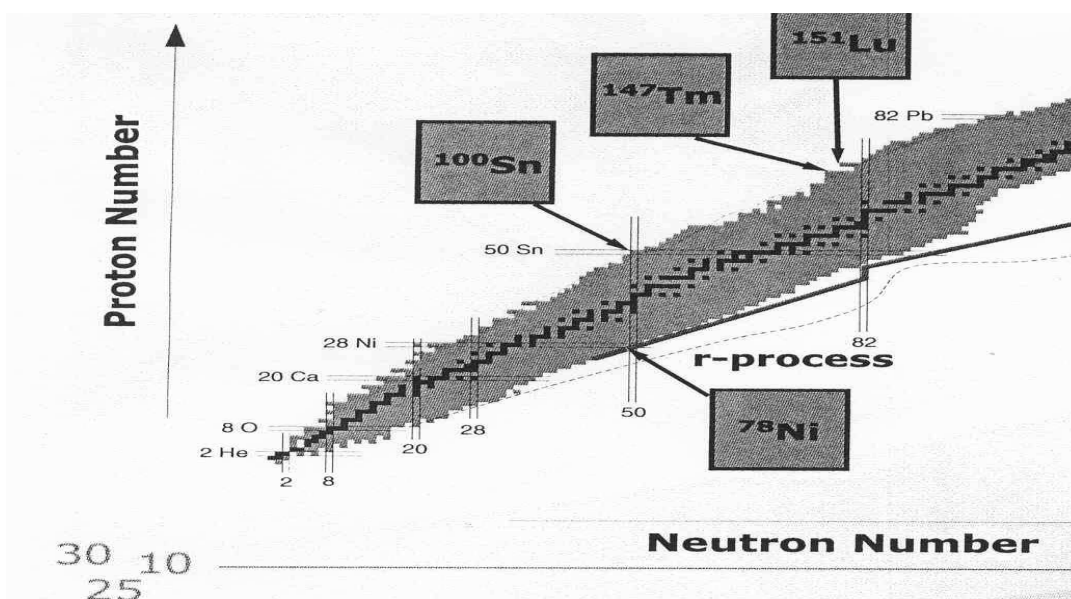
**Biologické účinky nabitých částic.** Nový urychlovač umožní studovat biologické účinky nabitých částic v závislosti na jejich energii a hmotnosti. Takový výzkum má význam fundamentální pro poznání interakce nabitých částic s biologickými objekty i praktický pro optimalizaci ozařování zhoubných nádorů. V této oblasti se předpokládá spolupráce s našimi specialisty v oblasti mikrodozimetrie.



Aerace chromosomů vyvolané ozářením těžkými ionty.

### 4.4

**Jaderné reakce pro jadernou fúzi a astrofyziku.** Nový urychlovač poskytne nové možnosti pro studium jaderných reakcí významných pro realizaci řízené termionukleární reakce a pro astrofyziku. V tomto směru experimenty na novém urychlovači navazovat na experimenty, kterými se ÚJF tradičně zabývá.

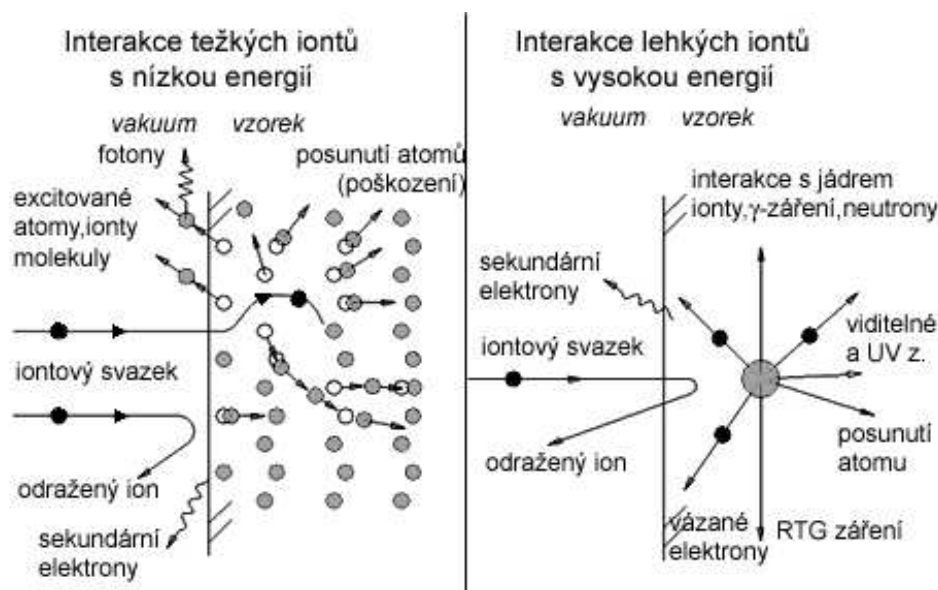


#### 4.5.

**Studium radiačního poškození.** Mechanismy radiačního poškození konstrukčních materiálů mají základní význam pro odhady životnosti jaderných zařízení, plánování úložišť jaderných odpadů, pro plánování nových zařízení určených pro likvidaci jaderných odpadů (projekty transmutoru jaderných odpadů) a pro projekci zařízení pro řízenou termionukleární reakci jako nového zdroje energie.

#### 4.6.

**Průchod nabitých částic prostředím.** Energetické ztráty nabitých částic při průchodu prostředím mají zásadní význam pro jaderné analytické metody, dozimetrii a konstrukci detektorů nabitých částic. Široké spektrum a rozsah energií iontů z nového urychlovače umožní detailní studium takových procesů jako je excitace atomů a s tím spojená emise charakteristického rtg. záření, desorpce atomů při dopadu nabitých částic (sputtering), emise elektronů při interakci nabitých částic s látkami atp. Studium těchto procesů je aktuální jak z hlediska fundamentálního tak i pro rozvoj metod pro analýzu povrchových vrstev látek viz. obrázek .



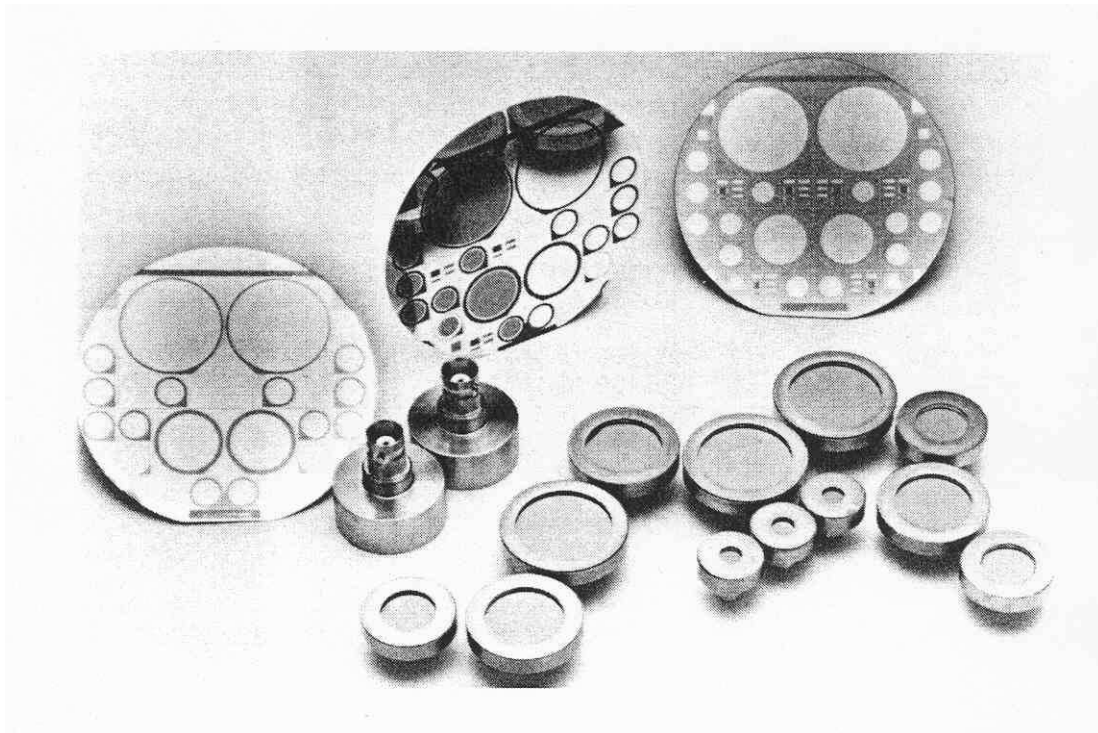
**Obrázek** Procesy probíhající v pevné látce indukované procházejícími ionty.

#### 4.7



**Testování nových detekčních systémů.** Předpokládá se využití nového urychlovače pro testování detektorů resp. detekčních systémů nabitých částic vyvíjených pro experimenty na velkých urychlovačích v zahraničí. V tomto směru by bylo možné využít i metodu IBIC (Ion Beam Induced Current) pro zjišťování účinnosti sběru náboje a délky driftu nosičů náboje zejména v polovodičových materiálech a součástkách. Spočívá v bombardování objektu mikrosvazkem iontů nebo jednotlivými ionty a měření elektrické odezvy. Metoda má význam pro optimalizaci mikroelektronických komponent a zjišťování jejich radiační odolnosti. U této problematiky se předpokládá spolupráce s pracovišti na ČVUT a v AV ČR.

Typický sortiment polovodičových detektorů nabitých částic



#### 4.8

Jaderné analytické metody jsou účinným, v mnoha případech nepostradatelným nástrojem pro studium struktury a složení látek. Podobně jako jiné analytické metody nemohou poskytnout o zkoumaném objektu vyčerpávající informaci. Doplnující údaje musí být získány jinými, komplementárními postupy. Jednou z metod, které jsou rovněž rozvíjeny v ÚJF je **neutronové hloubkové profilování (NDP)**, které využívá pro analýzu lehkých prvků interakce neutronů s atomovými jádry izotopů He, Li, Be, B, N a některých dalších lehkých prvků. Příkladem použití metody NDP je studium difúze atomů Li v tantalu

