

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Martin Setvák

Analýza tenkých vrstev energetickými iontovými svazky

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 25 (1980), No. 4, 196--200

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139758>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1980

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Analýza tenkých vrstev energetickými iontovými svazky

*Martin Setvák,
katedra fyzikální elektroniky FJFI*

Úvod

O možnostech využití iontových svazků pro technologické účely a o činnosti katedry fyzikální elektroniky FJFI v této oblasti jsme již referovali na stránkách tohoto časopisu [1]. Vývoj a rozsah využití technologie iontové implantace pokračuje velmi rychle, její účelné využití vyžaduje i vývoj vhodných analytických metod.

Rozvoj této problematiky podstatně urychlila i ta skutečnost, že asi před 15 lety byl k dispozici ve světě značný počet urychlovačů s energiemi v rozsahu 0,5 až 10 MeV, které v podstatě vyčerpaly svoje možnosti v jaderné fyzice, urychlovače byly využívány jen částečně nebo vůbec ne. V USA bylo takových urychlovačů asi 500, v ostatních zemích asi 200 [2]. Koncem šedesátých let se iontová implantace začala používat pro sériovou výrobu polovodičů a vznikla potřeba měřit parametry implantovaných vrstev, jako je hloubkový profil, poloha implantovaných atomů v krystalové mříži základního materiálu, rozsah radiačního poškození a dalších. U analýzy těchto parametrů jde zejména o metody založené na pružném i nepružném rozptylu iontů na atomech pevné látky a o metodu založenou na vybuzení charakteristického rentgenového záření v atomech pevné látky. Zdrojem primárních částic pro tyto účely může být zařízení pro iontovou implantaci s energií kolem 100 keV, urychlovač iontů typu Van de Graaff nebo jiného typu s energií řádu MeV nebo vhodný radioaktivní zdroj alfa-částic.

Na katedře fyzikální elektroniky FJFI připravujeme tyto metody pro řadu aplikací. Vychází se přitom z dlouholetých zkušeností s využitím a zdokonalováním zařízení pro iontovou implantaci a analýzu povrchu pevných látek, vybudovaného rovněž na fakultě. Připravované analytické metody jsou v některých případech nenahraditelné jinými metodami, v některých případech se dociluje podstatně lepších parametrů proti podobným metodám buzeným elektronovými svazky.

1. Analýzy založené na rozptylu iontů

Při bombardování povrchu např. křemíku ionty hélia s energií kolem 2 MeV je doběh iontů asi 8 μm , přitom v počáteční fázi brzdění iontu jde převážně o interakci letícího iontu s obalovými elektrony pevné látky. Letící iont se přitom pohybuje přímočaře ve směru dopadu, protože při jednotlivých srážkách s elektrony dochází k nepatrné změně impulsu letící částice. Při proniknutí povrchové vrstvy terče asi 0,5 μm je ztráta energie iontu lineárně úměrná tloušťce vrstvy, při větších tloušťkách se začíná linearita

zhoršovat. Malá část iontů pronikne až pod spodní vrstvu obalových elektronů do těsné blízkosti jádra atomu terče, vlivem elektrického pole jader předá letící atom část své kinetické energie atomu pevné látky, sám změní směr pohybu a při dostatečně velkém úhlu odklonu od původního směru se pohybuje zpět k povrchu pevné látky, přitom ztratí opět část své energie. Po výstupu odražené částice z pevné látky do vakua je možno změřit její energii v detektoru. Na základě poklesu energie iontu lze stanovit hmotnost částice terče při srážce na povrchu pevné látky nebo je možno stanovit hloubku příměsi, jestliže známe hmotnost atomů základního materiálu i příměsi. Tohoto efektu se využívá pro nedestruktivní stanovení hloubkového profilu implantovaných příměsí v polovodičích, pro studium prostorového uspořádání vrstevnatých struktur, sledování interdifúze tenkých kovových vrstev za různých teplot, určení polohy implantovaných příměsí v krystalové mřížce, stanovení hloubkového profilu radiačního poškození monokrystalu. Analýza je nedestruktivní a kvantitativní a stala se jednou z nejrozšířenějších metod analýzy složení pevných látek.

Tento druh pružného rozptylu dvou částic založený na vzájemném působení coulombovských polí jader obou atomů se nazývá Ruthefordovým rozptylem (též RBS, tj. Rutheford backscattering) nebo rozptylem na velké úhly. Spodní hranice energie iontů, kde k tomuto jevu ještě dochází, je asi 80 keV; proto je možné provádět analýzy touto metodou i při energiích dopadajících iontů kolem 100 keV, analýza se však dá provádět jen u atomů blízko povrchu pevné látky. Nejvhodnější energie dopadajících iontů je kolem 2 MeV, při vyšších energiích se lineární rozsah analyzovaných vrstev nezvětšuje, naopak vzniká větší pravděpodobnost různých rezonancí a jaderných reakcí, které mohou zkomplikovat spektrum rozptýlených iontů.

Nepružný rozptyl jader obou atomů se používá též k analýzám tohoto druhu a tento druh analýz je komplementárním k pružnému rozptylu. Při pružném rozptylu totiž není možné analyzovat nejjednodušší prvky, protože iont hélia při srážce s jiným atomem s blízkou hmotností mu předá podstatnou část své energie, takže zbude energie, která nestačí na výstup z materiálu a na analýzu; proto je tato analýza vhodná hlavně pro těžší prvky na lehkém pozadí. Pro analýzu lehčích prvků na těžším pozadí je naopak vhodnější metoda nepružného rozptylu, protože projektil, který s danou energií snadno vnikne do jádra lehkého atomu, vniká nesnadno do jádra těžkého atomu následkem silného coulombovského pole a tím nevzniká rušivé pozadí. Vzhledem k úzkému energetickému rozsahu, při kterém jaderná reakce vzniká, je i tato metoda vhodná k přesnému stanovení hloubky příměsi pod povrchem. Rozdíl energie primárních iontů a energie potřebné pro vznik jaderné reakce určuje tloušťku vrstvy, kterou iont proletěl a tím i hloubku příměsi pod povrchem. Zplodinami reakce jsou alfa-částice nebo fotony gama-záření. Analýza je rovněž kvantitativní.

2. Analýza založená na buzení charakteristického rentgenového záření protony

Interakcí rychlých iontů s elektronovým obalem atomů pevné látky dochází k ionizaci a excitaci i k pružnému rozptylu s elektrony. Vyražením elektronu z některé z vnitřních drah atomu vznikne nestabilní stav, který se vyrovná tím, že na takto uvolněné místo

přeskočí některý z vnějších elektronů s vyšší energií a energetický rozdíl se vyrovná vyzářením fotonu rentgenového záření, jehož energie se rovná rozdílu energií příslušných hladin. Stanovením energie fotonu se dá určit i prvek, na kterém k reakci došlo. Při daném proudu dopadajících iontů je počet vybuzených fotonů stejné energie i mírou počtu atomů pevné látky stejného atomového čísla. Metoda dává kvantitativní výsledky. Proti obdobným metodám analýzy, kde se buzení rtg. záření provádí elektronovým svazkem nebo fotonu UV-záření, má tento způsob buzení přednost v tom, že rušivé pozadí je o dva až tři řády nižší a tím je i citlivost až o dva řády lepší a dosahuje citlivosti až 10^{-7} .

Doběh protonů s energií 2 MeV je v pevné látce několik desítek μm (např. u křemíku 50 μm), takže když analyzujeme tenkou vrstvu o tloušťce asi jeden mikrometr, ztratí iont při průletu touto vrstvou jen nepatrnou část své energie a v celém objemu bombardované vrstvy je pro stejné atomy stejná pravděpodobnost vybuzení fotonů, které též při průchodu tenkou vrstvou ztratí zanedbatelnou část své energie. Analyzovaná tenká vrstva může být buď pevná látka, nebo tenká vrstva prachových částic zachycených na filtrační podložce, nebo vytvořená odpařením daného objemu kapaliny. Přitom nezáleží na tvaru prachových částic, podmínkou je jenom, aby maximální rozměr částice nepřesáhl určitou mez. To vytvořilo podmínky pro široké využití v ekologii, medicíně, kriminalistice apod. Za normálních okolností se vzorky vkládají do vakuové terčové komory; je však možné vyvést svazek iontů tenkou fólií i do atmosféry pro analýzu vzorků, které působí potíže ve vakuu, např. biologické preparáty. Moderní polovodičové detektory fotonů mají vysokou rozlišovací schopnost a umožňují současnou analýzu všech prvků zastoupených ve vzorku s výjimkou nejlehčích, u kterých je energie vybuzených fotonů velmi nízká. Analýza jednoho vzorku trvá několik minut. Tyto okolnosti umožnily snížení nákladů na analýzu jednoho prvku asi na jedno procento proti klasickým metodám a v současné době se sledování znečištění ovzduší velkých měst a průmyslových center v průmyslově vyspělých státech provádí převážně touto metodou.

Běžně užívané zkratky ve světové literatuře jsou pro tento typ analýz PIX, PIXE, PIXEA (Proton Induced X-ray Analysis).

3. Geometrie svazku iontů pro analýzy

Uvedené analytické metody se zpravidla provádějí se svazkem iontů, jehož průměr při dopadu na terč je několik mm. Metody rozptylu iontů umožňují hloubkové rozlišení příměsí s přesností až 10 nm. Při snížení průměru svazku iontů při dopadu na terč na dostatečně malý průměr umožňují tyto metody stanovit i plošné rozložení příměsí rastrováním svazku nebo terče s příčnou rozlišovací schopností danou průměrem svazku při dopadu na terč. Spolu s hloubkovou rozlišovací schopností metody samotné by bylo možno stanovit prostorové rozložení příměsí. Metoda Ruthefordova rozptylu vyžaduje při dopadu na terč svazek s minimálním úhlovým rozptylem, což bývá v rozporu s požadavkem minimálního průměru; proto je nutno věnovat velkou pozornost návrhu optiky iontového svazku. Při buzení charakteristického rtg. záření není úhlový rozptyl dopadajících částic kritický a právě při této aplikaci je zájem o extrémní snižování prů-

měru svazku. Hlavní potíž je v tom, že při fokusaci iontů s energiemi řádu MeV se již nedá použít klasický způsob fokusace normálními axiálně symetrickými elektrostatickými nebo magnetickými prvky. Pro fokusaci je nutno použít axiálně nesymetrických kvadrupolových čoček se silnou fokusací, které vytvářejí obrazy vždy jen v jedné rovině procházející osou svazku. Při požadavku malého průměru při dopadu na terč je nutno najednou vytvořit obraz v obou rovinách vzájemně kolmých. To není úloha snadná a v poslední době se tomuto tzv. ortomorfnímu zobrazení věnuje značná pozornost [3, 4, 5]. Snahou je vytvořit na terči svazek iontů o průměru několik mikrometrů při proudu iontů řádu 1 až 10 nA.

Zájem o analytické metody založené na bombardování ionty jde ještě dále; je snaha vytvořit rastrovací mikroskop analogický elektronovému rastrovacímu mikroskopu, kde by byl svazek elektronů nahrazen svazkem iontů s energií kolem 1 MeV. Elektronový rastrovací mikroskop dosáhl vrcholu rozlišovací schopnosti 0,1 až 0,3 nm s možností pozorovat jednotlivé atomy.

Přechodem od optického mikroskopu k elektronovému se docílilo zlepšení rozlišovací schopnosti asi o tři řády. Použitím iontů místo elektronů se mez rozlišovací schopnosti dá snížit o další dva řády na hodnoty řádu 10^{-3} nm [4].

Snaha o vytvoření iontových svazků velmi malých průměrů klade i značné požadavky na dokonale ovládnutí optiky iontových svazků, na výpočetní metody návrhu iontových svazků a jejich zdrojů. Touto problematikou se na katedře fyzikální elektroniky FJFI zabýváme i ve spolupráci s dalšími pracovišti [6].

Moderní výpočetní metody optiky iontových tras jsou založeny na maticové reprezentaci jednotlivých optických prvků a driftových prostor mezi nimi. Výpočetní metody iontových tras byly dovedeny k vysokému stupni dokonalosti v souvislosti s návrhy obřích urychlovačů nabitých částic pro potřeby fyziky vysokých energií [7, 8]. Naším cílem je umožnit použití těchto přesných metod i pro návrh zařízení na nižších energiích, kde je problematika návrhu odlišná.

Závěr

Problematika využití iontových svazků pro modifikaci a analýzu pevných látek má již svou tradici na katedře fyzikální elektroniky FJFI. Zařízení pro iontovou implantaci je v nepřetržitém provozu již pět let a v některých základních parametrech nebylo překonáno ani drahými komerčními zařízeními z dovozu.

Získané zkušenosti se využívají při projektu a výstavbě unikátních analytických zařízení pro náš průmysl polovodičů i pro řadu jiných aplikací.

Literatura

- [1] M. SETVÁK: *Implantace iontů do pevných látek*. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie XXII (1977), 330
- [2] V. M. KOLJADA, A. K. ZAJČENKO, R. V. DMITRENKO: *Rentgenospektral'nyj analiz s ionnym vozbuždenijem*. Atomizdat, Moskva 1978.

- [3] Z. H. CHO, M. SINGH, A. MOHABBATIZADEH: *Biomedical applications and instrumental implications of ion microprobe*. IEEE Trans. Nucl. Sci. 21 (1974), No 1.
- [4] Z. H. CHO, M. SINGH, G. C. HUTH: *The scanning ion microprobe: An alternative to the scanning electron microscope*. Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 306, p. 223—261, March 1978.
- [5] M. SETVÁK, A. HRDÁ, M. KUZMIAK: *Návrh trasy pro přenos svazku od lineárního urychlovače FJFI*. Výzkumná zpráva FJFI, 1979.
- [6] M. SETVÁK, A. HRDÁ, M. KUZMIAK: *Maticová reprezentace dynamiky svazku nabitých částic*. Výzkumná zpráva FJFI, 1979.
- [7] K. L. BROWN, F. ROTHACKER, D. C. CAREY, CH. ISELIN: *Transport — a computing program for designing charged particle beam transport systems*. SLAC-91, Stanford Linear Accelerator Center, 1977.
- [8] K. L. BROWN: *A first- and second-order matrix theory for the design of beam transport systems*. SLAC Report No 75, Stanford, 1972.

Integrální dozimetrické metody využívající pevné fáze

*Josef Šeda, Ladislav Musílek,
katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření FJFI ČVUT*

1. Úvod

Integrální dozimetrie — měření dávek akumulovaných ve sledovaném objektu za určité časové období — byla na počátku svého rozvoje z metodického hlediska doménou dvou měřicích principů: využívaly se buď fotografické účinky ionizujícího záření, nebo jeho ionizační účinky v plynu. I když byla zjištěna celá řada dalších jevů vyvolaných ionizujícím zářením v různých materiálech, jejich využití ke stanovování dávek bylo minimální. Uvedené dvě metody jsou doposud důležitou součástí souboru dozimetrických prostředků.

Uvážíme-li však, že nepochybně nejdůležitější oblastí integrální dozimetrie je měření dávek, které obdrží ozařované osoby, a zvážíme-li dále uvedené nevýhody, které tyto „tradiční“ dozimetrické metody pro osobní dozimetrii mají, nelze se divit, že je snahou řady výzkumných pracovišť nalézt jiné postupy, které by daly stejně spolehlivé a přesné výsledky bez nedostatků vlastních fotografickým nebo ionizačním měřením.

Za základní nevýhodu dozimetrů na fotografickém principu je možné považovat jejich vysokou náročnost zpracování. Vyvolávací proces je zdoluhavý a musí být přesně reprodukován. Mimoto jsou poměrně choulostivé na vnější vlivy, jako je tlak, teplota, vlhkost,