Conf. dr. Antoaneta ENE

TEHNICI RADIOMETRICE DE ANALIZĂ ŞI CONTROL

Conf. dr. Antoaneta ENE

TEHNICI RADIOMETRICE DE ANALIZĂ ŞI CONTROL

Editura Fundaţiei Universitare
„*Dunărea de Jos*” - Galaţi, 2006

UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS" DIN GALAȚI
Facultatea de Ştiințe

Control ştiinţific:

Prof. dr. **ION V. POPESCU**

Tehnoredactare computerizată şi
grafică: **ANTOANETA ENE**

©Editura Fundației Universitare
„Dunărea de Jos"din Galați, 2006

www.editura.ugal.ro
editura@ugal.ro

ISBN (10) 973-627-308-3
ISBN (13) 978-973-627-308-7

Colecția MONOGRAFII

Prefață

Monografia ***„Tehnici radiometrice de analiză şi control”*** constituie o introducere în domeniul tehnicilor nucleare moderne de analiză şi control a probelor complexe, care sunt utilizate pe plan național şi internațional în laboratoare de cercetare şi industriale sau în scopuri educaționale.

Apariția în ultimul timp a unor domenii ale ştiinței şi tehnicii şi necesitatea unui control de calitate cât mai eficient au impus elaborarea unor metode de analiză şi control caracterizate printr-o mare sensibilitate, selectivitate, reproductibilitate şi precizie.

Prezenta lucrare se adresează cursanților de la secția de Masterat „Metode fizico-chimice de analiză şi control” şi studenților anului IV de la secțiile de Fizică-Chimie şi Matematică-Fizică din cadrul Facultății de Ştiințe a Universității „Dunărea de Jos” din Galați, dar poate fi consultată şi de ingineri sau cercetători specialişti în fizică, chimie sau studiul materialelor, cadre didactice din învățământul universitar şi preuniversitar, doctoranzi etc.

Monografia este structurată pe nouă capitole şi descrie principiile teoretice, particularitățile, aparatura şi aplicațiile multidisciplinare ale celor mai importante tehnici radiometrice de analiză şi control: fluorescența de raze X (FRX/XRF – X ray fluorescence) excitată cu surse radioactive sau tub de radiații X; analiza cu microsonda electronică (EPMA – Electron probe microanalysis); analiza prin activare cu neutroni (AAN/NAA – Neutron activation analysis) termici sau rapizi, şi cu particule încărcate (CPAA – Charged particle activation analysis); analiza prin împrăştierea elastică a particulelor încărcate (RBS – Rutherford backscattering spectrometry); analiza prin emisia radiațiilor X (PIXE – Particle induced X ray emission) sau gama prompte (PIGE – Particle induced gamma ray emission) induse de particule încărcate sau prin detecția produşilor uşori din reacțiile nucleare (NRA – Nuclear reaction analysis), retroîmprăştierea radiațiilor beta, absorbția radiațiilor X şi gama.

Primul capitol este destinat prezentării tipurilor de procese de interacție a radiațiilor nucleare cu substanța şi detectării acestora. Modul de interacțiune a radiațiilor nucleare cu substanța depinde de natura şi energia radiațiilor şi de numărul atomic al elementelor din proba investigată. În dependență de aceşti factori pot avea loc fenomene de atenuare (absorbție şi împrăştiere) a fluxului de radiații, de excitare sau de ionizare a atomilor sau moleculelor mediului străbătut sau reacții nucleare pe nucleele atomice, în cazul unor anumitor tipuri de radiații cu energii mari. Astfel de interacțiuni stau la baza unor tehnici radiometrice de analiză instrumentală de mare sensibilitate, adecvate pentru analiza compoziției de elemente majore, minore şi „urmă” în diferite probe (geologice, biologice, arheologice, metalurgice, alimentare, criminalistice, straturi subțiri, materiale semiconductoare etc) sau pentru controlul omogenității materialelor, grosimilor, densităților, nivelurilor lichidelor în recipiente.

Autoarea mulțumeşte pe această cale domnilor Prof. dr. Ion V. Popescu de la Facultatea de Ştiințe, Universitatea „Valahia” din Târgovişte şi Cerc. şt. I dr. Teodor Bădică de la Institutul Național de Fizică şi Inginerie Nucleară „Horia Hulubei” din Bucureşti pentru sfaturile şi spijinul acordat de-a lungul elaborării tezei de doctorat şi a lucrărilor ştiințifice colective.

Conf. dr. fiz. Antoaneta Ene

Galați, mai 2006

CUPRINS

CAP. I. INTERACŢIA CU SUBSTANŢA A RADIAŢIILOR NUCLEARE ŞI DETECTAREA ACESTORA 9

1.1. Generalităţi asupra proceselor de interacţie.....9
1.2. Interacţia cu substanţa a particulelor grele încărcate.....14
1.2.1. Excitarea şi ionizarea atomilor substanţei.....17
1.2.2. Reacţii nucleare sub acţiunea particulelor grele încărcate.....22
1.2.2.1. Particularităţile reacţiilor nucleare cu particule încărcate.....24
1.2.2.2. Randamentul unei reacţii nucleare.....26
1.2.3. Împrăştierea elastică a particulelor grele încărcate.....29
1.3. Interacţia electronilor cu substanţa 32
1.3.1. Pierderea de energie prin excitarea şi ionizarea atomilor 32
1.3.2. Emisia radiaţiei de frânare.....38
1.3.3. Radiaţia Vavilov−Cerenkov.....44
1.3.4. Împrăştierea electronilor.....48
1.4. Interacţia radiaţiilor gama şi X cu substanţa.....54
1.4.1. Procesele de interacţie ale radiaţiilor gama.....54
1.4.1.1. Efectul fotoelectric.....54
1.4.1.2. Efectul Compton.....56
1.4.1.3. Formarea perechilor electron-pozitron.....59
1.4.1.4. Atenuarea fasciculelor de fotoni gama.....62
1.4.2. Procesele de interacţie ale radiaţiilor X.....64
1.5. Interacţia neutronilor cu substanţa.....66
1.5.1. Reacţiile nucleare produse de neutroni la trecerea prin substanţă 67
1.5.2. Secţiunea eficace microscopică de interacţie.....71
1.6. Detectarea radiaţiilor nucleare.....75

CAP. II. FLUORESCENŢA DE RAZE X (FRX).....…84

2.1. Principiile fluorescenţei de raze X……...…….....….....84
2.1.1. Emisia radiaţiilor X caracteristice……..……..…….....84
2.1.2. Randamentul de fluorescenţă. Procesul Auger..……...……...…88
2.2 Surse de excitare a radiaţiilor X caracteristice.....….91
2.2.1. Excitarea cu ajutorul tubului de raze X.....…91
2.2.2. Excitarea cu radiaţii emise de radioizotopi….....97
2.3. Spectrometria radiaţiilor X.....100
2.3.1. Spectrometre cu dispersie după lungimea de undă (WDS).....100
2.3.2. Spectrometre cu dispersie după energie (EDS)….....109
2.3.3. Detecţia radiaţiilor X….....111
2.3.3.1. Contorul proporţional cu circulaţie de gaz.....112
2.3.3.2. Detectorul cu scintilaţie.....115
2.3.3.3. Detectorul cu semiconductori.....116
2.3.3.4. Prelucrarea spectrelor energetice de radiaţii X.....118
2.4. Analiza FRX calitativă şi cantitativă….....123
2.4.1. Analiza calitativă….....123
2.4.2. Efecte de matrice….....125
2.4.3. Analiza cantitativă.....…127
2.4.3.1. Ecuaţiile fundamentale ale excitării razelor X.....127
2.4.3.2. Metoda absolută.....131
2.4.3.3. Metoda relativă.....133
2.5. Aplicaţii ale fluorescenţei de raze X….....134

CAP. III. ANALIZA ŞI CONTROLUL MATERIALELOR FOLOSIND MICROSONDA ELECTRONICĂ (EPMA).....140

3.1. Principiile tehnicii EPMA.....140
3.1.1. Excitarea radiațiilor X cu electroni….....140
3.1.2. Tipuri de semnale care rezultă în urma interacției electronilor cu substanța….....141
3.2. Microsonda electronică….....148
3.3. Analiza EPMA calitativă şi cantitativă….....150
3.4. Aplicații ale tehnicii EPMA….....157

.

CAP. IV. ANALIZA PRIN EMISIA RADIAȚIILOR X SUB ACȚIUNEA PARTICULELOR GRELE ÎNCĂRCATE (PIXE).....160

4.1. Particularitățile tehnicii PIXE.....160
4.1.1. Emisia radiațiilor X sub acțiunea particulelor grele încărcate.....160
4.1.2. Secțiunea eficace de ionizare a atomilor cu particule încărcate.....163
4.1.3. Acceleratoare de particule încărcate.....168
4.1.3.1. Acceleratoare directe.....168
4.1.3.2. Acceleratoare ciclice.....173
4.1.4. Spectre de radiații X caracteristice induse de particule încărcate.....174
4.1.5. Alegerea energiei optime a particulelor proiectil în analizele PIXE.....177
4.2. Analiza PIXE calitativă şi cantitativă. Efecte de matrice……..…...180
4.3. Aplicații ale tehnicii PIXE……..……...190

CAP. V. ANALIZA PRIN ACTIVARE.....196

5.1. Analiza prin activare cu neutroni termici (AAN).....196
5.1.1. Surse de neutroni.....199
5.1.1.1. Surse izotopice de neutroni.....200
5.1.1.2. Surse cu fisiune spontană.....201
5.1.1.3. Acceleratoare de particule.....202
5.1.1.4. Reactorul de fisiune spontană.....203
5.1.2. Legea de activare cu neutroni termici.....205
5.1.3. Analiza calitativă.....208
5.1.3.1. Spectrometria radiațiilor γ.....210
5.1.4. Analiza cantitativă.....213
5.1.5. Prelucrarea unui spectru γ obținut cu detectori de Ge(Li).....219
5.1.6. Aplicații ale tehnicii de analiză prin activare cu neutroni termici.....224
5.2. Analiza prin activare cu neutroni rapizi.....231
5.2.1. Particularitățile tehnicii.....231
5.2.2. Aplicații ale analizei prin activare cu neutroni rapizi.....235
5.3. Analiza prin activare cu particule încărcate.....237
5.3.1. Particularitățile tehnicii. Procedee de standardizare.....237
5.3.2. Aplicații ale analizei prin activare cu particule încărcate.....244

CAP. VI. ANALIZA ŞI CONTROLUL MATERIALELOR PRIN ÎMPRĂŞTIEREA ELASTICĂ A PARTICULELOR ÎNCĂRCATE (RBS).....248

6.1. Principiul tehnicii RBS.....248
6.2. Aparatura utilizată în analizele RBS.....256
6.3. Tipuri de spectre RBS. Analiza calitativă.....258
6.4. Analiza RBS cantitativă.....263
6.5. Aplicații ale tehnicii RBS.....270

CAP. VII. ANALIZA NUCLEARĂ PROMPTĂ.....275

7.1. Principiul tehnicii PIGE.....276
7.1.1. Emisia radiaţiilor γ prompte sub acţiunea particulelor încărcate.....276
7.1.2. Alegerea energiei optime a particulelor proiectil în tehnica PIGE.....277
7.1.3. Analiza PIGE calitativă şi cantitativă.....279
7.1.4. Aplicaţii ale tehnicii PIGE.Rezultate proprii.....283
7.2. Principiul tehnicii NRA. Aplicaţii.....297

CAP. VIII. ANALIZA ŞI CONTROLUL MATERIALELOR PRIN RETROÎMPRĂŞTIEREA RADIAŢIILOR BETA.....301

8.1. Generalităţi.....301
8.2. Factorii care afectează retroîmprăştierea radiaţiilor β.....302
8.2.1. Dependenţa randamentului de retroîmprăştiere de numărul atomic Z, concentraţia unei soluţii şi grosimea materialului.....304
8.3. Aplicaţii ale retroîmprăştierii radiaţiilor β.....309
8.3.1. Geometria utilizată în experimentele de retroîmprăştiere.....309
8.3.2. Măsurarea grosimii straturilor superficiale prin retroîmprăştierea radiaţiilor β.....315
8.3.3. Controlul compoziţiei unui amestec binar prin retroîmprăştierea radiaţiilor β.....318

CAP. IX. ANALIZA ŞI CONTROLUL MATERIALELOR PRIN ATENUAREA RADIAŢIILOR X ŞI GAMA.....321

9.1. Absorbţia radiaţiilor X şi γ moi 321
9.1.1. Determinarea coeficienţilor de absorbţie.....323
9.1.2. Executarea măsurătorilor de absorbţie. Aplicaţii.....324
9.2. Absorbţia radiaţiilor γ dure. Aplicaţii.....327

Bibliografie 331