

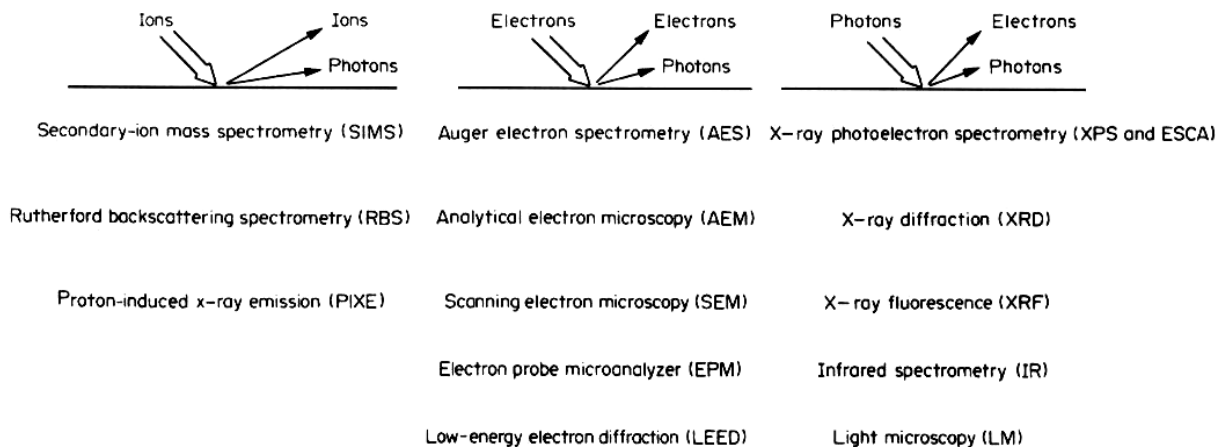
2. METODE KARAKTERIZACIJE

2.1. Uvod

Osnovno pitanje koje uvijek postavimo kada dobijemo ili pripravimo neki materijal glasi: ŠTO JE TO? Jel li to monokristal, polikristal, nanokristal ili staklaste strukture. Kakav je kemijski sastav? Odgovara li deklaraciji ili sastavu koji je bio predviđen sintezom? Znači, moramo ga prvo identificirati. Postoji u principu samo jedna metoda, a to je rentgenska difrakcija, jer svaki materijal ima tipičan izgled rentgenograma, koji je kao otisak prstiju kod čovjeka, i uspoređujući s bazom podataka, vrlo brzo se nađe odgovor. Ako "rentgenskog otiska" nemamo u bazi podataka, moramo odrediti strukturu, pri čemu će nam puno pomoći kemijski sastav koji se može odrediti raznim metodama. Dalje će nas zanimati je li struktura mikrokristalna ili nanokristalna, kakav je oblik kristalita i međugranična struktura kristala, kakav je raspored defekata, možemo li ustvrditi gdje se u kristalnoj rešetki smještaju dopirani atomi, itd. Tek nakon toga možemo pristupiti određivanju drugih fizičkih svojstava kao magnetska svojstva, električna, itd., i utvrđena fizička svojstva se onda povezuju uz neku određenu strukturu. Da bi materijal bio dobro karakteriziran/opisan moramo znati:

- kemijski sastav,
- dimenziju jedinične ćelije i položaje atoma u ćeliji,
- prisustvo defekata, prirodu, broj i raspodjelu defekata,
- prisustvo nečistoća i njihovu raspodjelu (homogena, nehomogena, u malim ili većim nakupinama),
- za mikro- i nano-kristalne uzorke: broj, veličinu oblik i raspodjelu kristalita, unutarnja mikro naprezanja,...
- strukturu površine: razliku između površinskih i unutarnjih svojstava,
- odrediti ravnotežne faze na pojedinim temperaturama i promatrati fazne transformacije/pretvorbe promjenom temperature ili tlaka (difuzijske, martenzitne), odnosno karakterizirati metastabilne faze i promatrati pretvorbe prema ravnotežnim strukturama,
- itd.

Ukratko, struktura i sastav materijala može se istražiti prema tome kako materijal "reagira" na rentgenske zrake, na elektrone ili ione. U vezi toga razvile su se odgovarajuće tehnike i neke od njih su prikazane na **slici 2-0**.



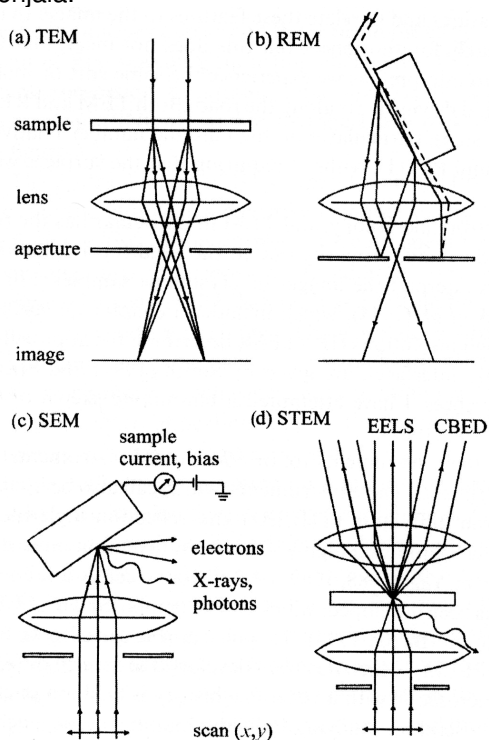
Slika 2-0

Važna veličina je dubina prodiranja upadnog zračenja (fotoni, elektroni ili ioni). Primjerice u nekim metodama upadno zračenje su rentgenske zrake, a emitiraju se elektroni ("X-ray photoelectron spectroscopy"-XPS), dok je u drugih obrnuto, upadno zračenje su elektroni, a emitiraju se rentgenske zrake ("Electron probe microanalysis"-EPM). Kod mnogih metoda potreban je vrlo dobar vakuum. Ako se kao srednji vakuum smatra od 10^{-2} do 10^{-5} Pa, onda je za mnoge metode potreban visoki vakuum od 10^{-6} do 10^{-9} Pa, primjerice za LEED, XPS, AES, SIMS, SNMS i FIM.

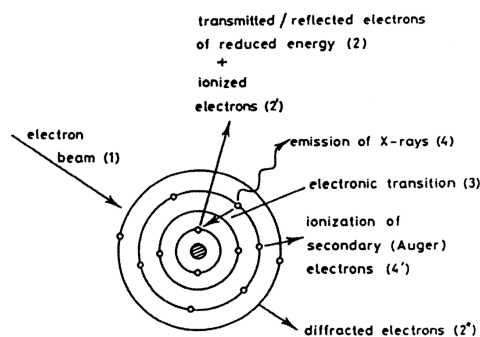
Ako je ikako moguće, s obzirom na veličinu uzorka, počinje se rentgenskom difrakcijom i onda se koriste druge metode ovisno o prvim rezultatima, kao i o tome što je krajnji cilj. Postoji ogroman broj metoda karakterizacije materijala. No detaljnije ćemo opisati samo one koje se najčešće koriste, a pogotovo u istraživanju nanomaterijala. Metode ćemo svrstati u nekoliko većih grupa i podgrupa, uz napomenu da će se u različitim knjigama naći razne varijante podjele. Primjerice, mikroskopi se mogu dijeliti na transmisijske i pretražne, a mogu se dijeliti i prema tome kakvu vrstu elektronskog snopa koriste (nepomični, rasterski). Na **slici 2-1** mogu se vidjeti spomenute opcije. Na slici **(a)** i **(b)** su transmisijski elektronski mikroskop (TEM) i reflektirajući elektronski mikroskop (REM) sa nepomičnim upadnim snopom, dok na slici **(c)** imamo reflektirajući rasterski (snop skenira površinu) elektronski mikroskop (SEM) i slika površine gleda se pomoću reflektiranih

elektrona. Kombinacija TEM-a i SEM-a je prikazana na slici (d), to je tzv. pretražni (skenirajući) transmisijski elektronski mikroskop (STEM) koji može raditi u normalnom TEM modu (nepomični snop), ili u skenirajućem modu. Transmisijska pretražna slika dobiva se skeniranjem uzorka snopom.

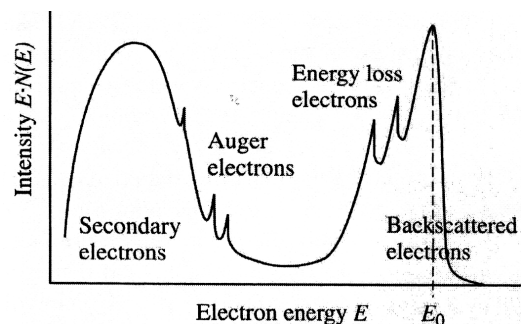
Zračenjem/bombardiranjem uzorka elektronima (1) (slika 2-2) dolazi do više pojava na osnovi kojih su izvedene određene tehnike karakterizacije materijala: (2') elektronska difrakcija; (4) emisija rentgenskih zraka, koje se analiziraju ili prema valnoj duljini ("wavelength dispersive"-WD) ili prema energiji rentgenskih fotona ("energy dispersive"-ED) što omogućuje identifikaciju elemenata odnosno kemijski sastav uzorka. Do elementa natrija (od većih rednih brojeva) analiza se vrši rutinski, između Na i Be potrebni su posebni detektori, dok je za još lakše atome potrebna Augerova spektroskopija-AES (4'), ili pomoću "electron energy loss spectroscopy"-EELS (2) i (2'). Kao što su rentgenske zrake karakteristične za svaki element tako su i Augerovi elektroni (ustvari sekundarni elektroni) karakteristika atoma iz kojih su emitirani. Emisija Augerovih elektrona se događa kada stvoreni rentgenski foton, na svom putu prema van iz atoma, izbaci neki elektron višeg kvantnog stanja; tako stvoreni elektroni zovu se sekundarni ili Augerovi elektroni i daju informaciju o kemijskom sastavu materijala.



Slika 2-1



Slika 2-2



Slika 2-3

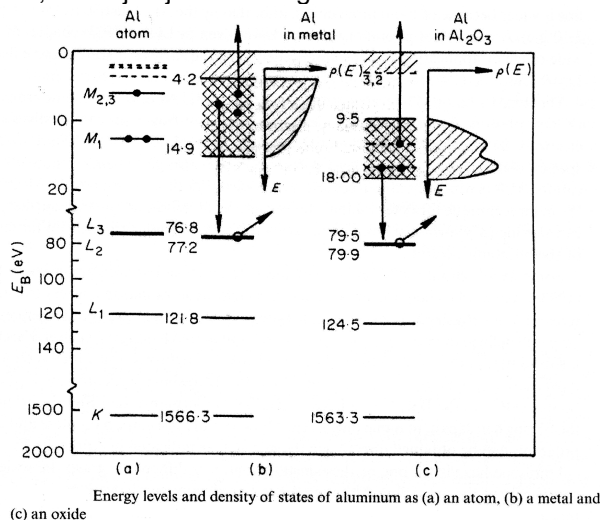
EELS-om se detektiraju prolazni upadni elektroni (1) koji nakon prolaza kroz uzorak gube energiju u raznim procesima te se smanjenje energije EELS elektrona uspoređuje s energijom upadnih elektrona (1). Mogu se elektroni promatrati i u refleksiji (tzv. "Back scattered electrons") (2) i time dobiti podatke o površinskom kemijskom sastavu, kao i o topografiji površine.

Energijski spektar elektrona stvorenih u procesima prilikom bombardiranja uzorka elektronima prikazan je na slici 2-3.

No uzorak se može zračiti i fotonima. Povijesno najpoznatiji proces je fotoelektrični efekt i moderne verzije u visokom vakuumu ("ultra-high vacuum"-UHV) zovu se "Ultraviolet photoelectron/Photoemission spectroscopy"-UPS, ako zračimo ultraljubičastim zrakama i elektroni se izbijaju direktno iz valentne vrpce (slika 2-4), odnosno "X-ray photoelectron/photoemission Spectroscopy"-XPS, ako zračimo rentgenskim zrakama i elektroni se izbijaju iz unutarnjih ljusaka. Treća verzija fotoelektronske spektroskopije je već spomenuta Augerova emisijska spektroskopija-AES, gdje elektroni mogu biti pobuđeni fotonima, no najčešće se pobuđuju elektronima. Osnovni Augerov proces uključuje tri elektrona i ostavlja za sobom dvostruko ionizirani atom. XPS i AES koriste se za kemijsku analizu uzoraka, a UPS za određivanje širine energijskih vrpca i u čvrstim tijelima.

To je bilo samo nekoliko kratko spomenutih metoda karakterizacije. Potpuno je jasno da je nemoguće detaljnije opisati sve postojeće tehnike. Svi koji žele saznati više o pojedinim metodama, mogu koristiti popis priložene literature.

Nazivi (i skraćenice) metoda su na engleskom onako kako se koriste u literaturi, s eventualnim prijevodima. Ako nema prikladnog prijevoda, ostavljen je samo engleski naziv.



Slika 2-4

Tokom čitanja ovog uvodnog dijela odmah je jasno da i najbolje opremljeni laboratoriji ne mogu raspolagati sa svim metodama. Bolje opremljeni laboratoriji će primarno raspolagati s tehnikama kao (redosljed nabiranja ne znači i redosljed važnosti tehnike): *kemijska analiza, termičke analize, optička mikroskopija, ultraljubičasta, vidljiva i infracrvena spektroskopija, skenirajuća i transmisivna elektronska mikroskopija, nuklearna magnetska rezonancija, rentgenska difrakcija, Augerova fotoelektronska spektroskopija, pretražni tunelirajući mikroskop, "atomic force" pretražni mikroskop, Ramanova spektroskopija,....* Rjeđe korištene metode mogle bi biti: *difrakcija nisko-energijskih elektrona, masena spektroskopija sekundarnih iona, "field-ion" microscopy, elektronska spinska rezonancija, Mössbauerova spektroskopija,....*

Treba napomenuti da mnoge od navedenih metoda imaju podgrupe koje zahtijevaju različite instrumente tako da čak dobro opremljeni laboratoriji ne posjeduju sve mogućnosti. Primjerice, unutar metode rentgenske difrakcije postoji velik broj posebnih tehnika kao: *visoko i niskotemperaturna rentgenska difrakcija, Laueova metoda, Debye-Scherrerova metoda, Guinierova metoda, Berg-Barrett i Langova metoda, mikrodifrakcija, difrakcija pomoću dvostrukog kristala, difraktometar za određivanje teksture, difraktometar za monokristale, Weissenbergova tehnika, difraktometar za određivanje rezidualnih naprezanja,....*

Koji će se instrumenti kupiti u nekom laboratoriju? Ako je samo povremeno potrebno koristiti primjerice rentgensku difrakciju ili Augerovu spektroskopiju, onda je bolje koristiti usluge nekog drugog laboratorija. S druge strane ako je stalna potreba za Ramanovom spektroskopijom onda je očito potrebno nabaviti Ramanov spektrometar.

No postoje tehnike za koje se unaprijed zna da će se morati koristiti izvan laboratorija jer su vrlo skupe i zahtijevaju posebne službe održavanja kao primjerice *sinkrotronsko zračenje, neutronska difrakcija, Rutherfordovo odzivno raspršenje,....*

2.2. Povijest razvoja/otkrića raznih načina snimanja/oslikavanja/"imaging" i karakterizacije materijala ("Imaging systems and materials characterization")

Povijesno gledano, izum optičkog mikroskopa (Antony van Leuwenhoek) oko 1668. g. možemo smatrati kao preduvjet početka područja kojeg danas nazivamo snimanje materijala ("imaging of materials"), no moralo je proći još skoro 200 godina do prvog promatranja materijala transmisivnim načinom (Henry Clifton Sorby u 1849.g; tanki slojevi minerala), a 1863. g. je Sorby bio prvi koji je koristio optički mikroskop za ispitivanje puknute tračnice nakon željezničke nesreće, što bi se mogle uzeti kao početak karakterizacije materijala.

Oko 1869.g. su električnim izbojem u razrijeđenom plinu proizvedene katodne zrake i uočene pomoću luminiscencije i fluorescencije. W. Crookes je 1886.g. uočio da se katodne zrake otklanjaju u električnom i magnetskom polju te je uslijed toga pretpostavio da su katodne zrake negativno nabijene čestice, što je 1895.g. J. Perrin i dokazao. Te iste godine W. C. Röntgen otkriva nepoznato zračenje (danas zovemo rentgenske zrake; u engleskom govornom području "X-rays") i 1912. g. M. Von Laue prvi radi rentgensku difrakciju na kristalnim materijalima.

1927.g. D. J. Davisson i L. H. Germer čini prvu difrakciju elektrona ("refleksijom" na monokristalu nikla), a nešto kasnije i P. Thompson i A. Reid u transmisiji na tankom metalnom sloju. 1933.g. E. Brüche uspijeva prvi

dobiti sliku polirane metalne površine pomoću fotoelektrona izbijenih iz površine ultraljubičastim zračenjem. Razlučivanje površinskih detalja je bilo red veličine bolje od optičkog mikroskopa. Nekoliko godina kasnije (1936.g.) E. M. Müller smišlja "field-electron emission microscope-FEM" gdje se pomoću visokog napona, u vakuumu, između šiljaste katode i pozitivno nabijenog fosfornog zastora izvlače iz šiljka elektroni koji na zastoru daju sliku površine šiljka. Povećanje je iznosilo oko 10.000 puta. Dvadeset godina kasnije, E. M. Müller okreće polaritet, stvarajući tzv. "field-ion microscope-FIB" u kojem se atomi plina ioniziraju uz površinu šiljka i projiciraju uzduž linija električnog polja na ekran, omogućujući praktički atomsko razlučivanje.

E. Ruska daje 1934.g. prve osnove transmisijskog elektronskog mikroskopa (TEM), da bi 1938.g. E. Ruska i B. Von Borries napravili prvi komercijalni TEM. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) se počeo razvijati od 1937.g., ali prvi komercijalni SEM-i su se pojavili tek 1960.g.

1978.g. se pojavljuje "scanning tunneling microscope-STM" (H. Rohrer i G. Binnig), skoro deset godina kasnije i "atomic force microscope-AFM" (naziva se i "scanning force microscope-SFM").

Na osnovi spomenutih instrumenata razvile su se brojne dodatne tehnike karakterizacija materijala i u ovim skriptama prikazat će se osnove rada i korištenja tih instrumenta/tehnika.

2.3. Popis metoda karakterizacije

3.1. DIFRAKCIJSKE TEHNIKE

- 3.1a) Rentgenska difrakcija/difrakcija rentgenskih zraka (*X-ray Diffraction-XRD*)
Vremenski razlučiva rentgenska difrakcija (*Time Resolved X-ray Diffraction-TRXRD*)
- 3.1b) Elektronska difrakcija (*Electron Diffraction-ED*)
Transmisijska visokoenergijska elektronska difrakcija (*Transmission High Energy Electron Diffraction-THEED*)
- 3.1c) Difrakcija elektrona niske energije/niskoenergijska elektronska difrakcija (*Low-energy Electron Diffraction-LEED*)
- 3.1d) Visokoenergijska refleksijska elektronska difrakcija (*Reflection high-energy electron diffraction-RHEED*)
- 3.1e) Neutronska difrakcija (*Neutron Diffraction-ND*)
- 3.1f) Rentgensko raspršenje pod malim kutom za mali/okružujući upadni kut (*Grazing-incidence Small-angle X-ray Scattering-GISAXS*)
- 3.1g) Rentgenska difrakcija/raspršenje pod malim kutom (*Small-angle X-ray Diffraction/Scattering-SAXS*)
- 3.1h) Elektronska difrakcija konvergentnim snopom (*Convergent Beam Electron Diffraction-CBED*)
- 3.1i) Elektronska difrakcija povratnim raspršenjem elektrona (*Backscattered Electron Diffraction-BSED/ Electron Backscattered Diffraction-EBSD*)

3.2. MIKROSKOPSKE METODE

- 3.2a) Optička mikroskopija (*Optical Microscopy-OM*)
- 3.2b) Transmisijska elektronska mikroskopija (*Transmission Electron Microscopy-TEM*)
Standardna/uobičajena transmisijska elektronska mikroskopija (*Conventional Transmission Electron Microscopy-CTEM*)
Analitička elektronska mikroskopija s mikroanalizom (*Analytical Electron Microscopy with Microanalysis-EMMA*)
Analitička transmisijska elektronska mikroskopija (*Analytical Transmission Electron Microscopy-ATEM*)
Transmisijska elektronska mikroskopija i mikroanaliza elektronskom sondom (*Transmission Electron Microscopy with Electron Probe Microanalysis-TEM-EPMA*)
Visokorazlučujuća transmisijska elektronska mikroskopija (*High-resolution Transmission Electron Microscopy-HRTEM*)
Ultravisoko razlučujuća transmisijska elektronska mikroskopija (*Ultra High-resolution Transmission Electron Microscopy-UHRTEM*)
Pretražna/skenirajuća transmisijska elektronska mikroskopija (*Scanning Transmission Electron Microscopy-STEM*)
Transmisijska elektronska mikroskopija u uvjetima okoliša (*Environmental Transmission Electron Microscopy-ETEM*)
Energijski filtrirana transmisijska elektronska mikroskopija (*Energy-filtering Transmission Electron Microscopy-EFTEM*)
Niskonaponska elektronska mikroskopija (*Low-voltage Electron Microscopy-LVEM*)
Srednjenaponska elektronska mikroskopija (*Intermediate Voltage Electron Microscopy-IVEM*)

3.2c) Rentgenska mikroskopija/oslikavanje (*X-ray Microscopy/Imaging*)**3.3. POVRŠINSKE METODE**

- 3.3a) Pretražna/skenirajuća mikroskopija (*Scanning Electron Microscopy-SEM*)
Pretražna/skenirajuća mikroskopija emisijom elektrona poljem/primjenom polja (*Field Emission Scanning Electron Microscopy-FESEM*)
- 3.3b) Mikroskopija elektronima niske energije/Niskoenergijska elektronska mikroskopija (*Low-energy Electron Microscopy-LEEM*)
- 3.3c) Pretražna/skenirajuća tunelirajuća mikroskopija (*Scanning-tunneling Microscopy-STM*)
Pretražna/skenirajuća mikroskopija tunelirajućim spinski polariziranih elektrona (*Spin-polarized Scanning- tunneling Microscopy- SP-STM*)
Pretražna/skenirajuća mikroskopija ionskom vodljivošću (*Scanning Ion Conductance Microscopy-SICM*)
- 3.3d) Mikroskopija atomskom silom (*Atomic-force Microscopy-AFM*)
Mikroskopija atomskom silom mjerenjem struje (*Current-sensing Atomic Force Microscopy-CS-AFM*)
Mikroskopija atomskom silom uz vibracijsko pobuđivanje sonde (*Atomic-force Acoustic Microscopy –AFAM*)
- 3.3e) Mikroskopija lateralnom/poprečnom silom (*Lateral Force Microscopy-LFM/Surface Force Apparatus-SFA/ Friction Force Microscopy-FFM*)
- 3.3f) Mikroskopija magnetskom silom (*Magnetic Force Microscopy-MFM*)
Mikroskopija promjenljivom magnetskom silom (*Magnetic Exchange Force Microscopy-MExFM*)
- 3.3g) Mikroskopija elektrostatičnom/električnom silom (*Eletrostatic/Electric Force Microscopy-EFM*)
Mikroskopija atomskom silom mjerenjem struje (*Conducting Atomic Force Microscopy-CAFM*)
- 3.3h) Mikroskopija termičkom silom (*Termic Force Microscopy-TFM*)
- 3.3i) Pretražna/skenirajuća optička mikroskopija bliskim poljem (*Near-field Scanning Optical Microscopy- NSOM/ (Scanning Near-field Optical Microscopy-SNOM)*)
- 3.3j) Mikroskopija emisijom iona poljem/primjenom polja (*Field-ion Microscopy-FIM/ Field-emission Microscopy-FEM*)
- 3.3k) Mikroskopija fokusiranim ionskim snopom (*Focused Ion Beam Microscopy-FIBM/Focused Ion Beam Milling-FIBM*)
- 3.3l) Refleksijska elektronska mikroskopija (*Reflection Electron Microscopy-REM*)

3.4. SPEKTROSKOPSKE METODE (Spectroscopic Methods)

- 3.4A) *Optička spektroskopija (Optical Spectroscopy)*
- 3.4Aa) *Elipsometrija (Ellipsometry)*
- 3.4Ab) *Infracrvena spektroskopija (Infrared Spectroscopy-IR)*****
*Infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom (Fourier Transform Infrared Spectroscopy-FTIR)*****
- 3.4Ac) *Ramanova spektroskopija (Raman Spectroscopy-RS)*****
*Površinski pojačano Ramanovo raspršenje (Surface-Enhanced Raman Scattering-SERS) *****
- 3.4Ad) *Luminiscencija (Luminiscence)*
- 3.4Ae) *Nelinearna optika (Nonlinear Optics-NLO)*
- 3.4Af) *Mössbauerova spektroskopija (Mössbauer spectroscopy-MS)******
- 3.4Ag) *Elektronska mikroskopija fotoemisijom (Photoemission Electron Microscopy-PEEM)*
- 3.4Ah) *Fluorescentna spektroskopija/spektroskopska analiza potpunom refleksijom rentgenskih zraka (Total Reflection X-ray Fluorescence Spectroscopy (Analysis)- TXRFS(A))*
- 3.4B) *Elektronske i ionske spektroskopije*
Elektronske spektroskopije
- 3.4Ba) *Kemijska analiza elektronskom spektroskopijom (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis-ESCA)*
Spektroskopija ultraljubičastim fotoelektronima (Ultraviolet Photoelectron/Photoemission Spectroscopy-UPS)
Spektroskopija rentgenskim fotoelektronima (X-ray Photoelectron/Photoemission Spectroscopy-XPS)

- 3.4Bb) **Augerova elektronska spektroskopija/spektrometrija (*Auger Emission Spectrometry/Spectroscopy-AES*)**
 Spektrometrija/Spektroskopija Augerovim elektronima pobuđenim rentgenskim zrakama (*X-ray Induced Auger Electron Spectrometry"- XAES*)
 Pretražna/Skenirajuća Augerova mikroskopija (*Scanning Auger Microscopy-SAM*)
- 3.4Bc) **Spektrometrija gubitka energije elektrona (*Electron Energy Loss Spectrometry-EELS*)**
 Struktura gubitka energije blizu ruba (*Energy loss near-edge structure-ELNES*)
 Proširena fino strukturalna spektrometrija gubitka energije elektrona (*Extended Energy-loss Fine Structure-EXELFS*)
 Elektronsko spektroskopsko oslikavanje (*Electron Spectroscopic Imaging -ESI*)
 Energijski filtrirana transmisijska elektronska mikroskopija (*Energy-filtering Transmission Electron Microscopy-EFTEM*)
 Refleksijska spektrometrija gubitkom energije (ili gubitka energije) elektrona (*Reflection Electron Energy-loss Spectrometry-REELS*)
- 3.4Bd) **Niskoenergijska spektrometrija gubitka (gubitkom ?) energije elektrona (*Low-energy Electron Loss Spectrometry-LEELS*)**
- 3.4Bđ) **Kutno razlučiva fotoelektronska spektroskopija (*Angle-resolved Photoelectron Spectroscopy-ARPES*)**
Ionske spektroskopije
- 3.4Be) **Emisija rentgenskih zraka pobuđenih česticama (*Particle Induced X-ray Emission-PIXE*)**
- 3.4Bf) **Rutherfordova spektroskopija povratnim raspršenjem (*Rutherford Backscattering Spectrometry-RBS*)**
- 3.4Bg) **Rutherfordova spektroskopija povratnim raspršenjem (*Rutherford Backscattering Spectrometry- RBS*)**
- 3.4Bh) **Analiza nuklearnih reakcija (*Nuclear Reaction Analysis-NRA*)**
- 3.4Bi) **Oslikavanje sekundarnim elektronima (*Secondary electron imaging-SEI*)**
- 3.4Bj) **Ionoluminiscencija (*Ionoluminescence-IL*)**
- 3.4Bk) **Analiza detekcije elastičnog odboja (*Elastic Recoil Detection Analysis-ERDA*)**
- 3.4Bl) **Pretražna/skenirajuća transmisijska ionska mikroskopija (*Scanning Transmission Ion Microscopy-STIM*)**
- 3.4Bm) **Naboj induciran ionskim snopom (*Ion Beam Induced Charge-IBIC*)**
- 3.4Bn) **Masena spektroskopija sekundarnih iona (*Secondary-ion Mass Spectroscopy-SIMS*)**
 Masena spektroskopija sekundarno ioniziranih atoma (*Sputtered/Secondary Neutral Mass Spectroscopy-SNMS*)
 Vrijeme proleta SIMS (*Time of Flight SIMS-ToF-SIMS*)
 Spektroskopija ionskim raspršenjem (*Ion Scattering Spectroscopy-ISS*)
- 3.4Bo) **Trodimenzijska atomska proba/sonda (*3-dimensional Atom Probe-3DAP*)**
- 3.4C) **Rentgenske spektroskopije**
- 3.4Ca) **Emisijske tehnike**
 Rentgenska fluorescencija (*X-ray Fluorescence-XRF*)
 Mikroanaliza elektronskom probom/sondom (*Electron Probe Microanalysis-EPMA*)
 Energijski razlučujuća/disperzivna rentgenska spektrometrija (*Energy Dispersive X-ray Spectrometry-EDS*)
 Energijski razlučujuća/disperzivna rentgenska analiza (*Energy Dispersive X-ray Analysis-EDS*)
 Spektrometrija razlučivanjem valnih duljina (*Wavelength-dispersive Spectrometry-WDS*)
- 3.4Cb) **Apsorpcijske tehnike**
 Spektroskopija rentgenskom apsorpcijom (*X-ray Absorption Spectroscopy-XAS*)
 Finostrukturalna spektroskopija rentgenskom apsorpcijom (*X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy-XAFS*)
 Struktura rentgenske apsorpcije blizu ruba (*X-ray Absorption Near Edge Structure-XANES*)
 Fina strukturalna rentgenske apsorpcije blizu ruba (*Near-edge X-ray Absorption Fine Structure-NEXAFS*)
 Fina strukturalna apsorpcijskog ruba (*Absorption Edge Fine Structure-AEFS*)
 Proširena fino strukturalna spektroskopija rentgenske apsorpcije (*Extended X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy-EXAFS*)
 Površinska proširena fino strukturalna spektroskopija rentgenske apsorpcije (*Surface Extended X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy (SEXAFS)*)

Fino strukturna spektroskopija proširenog područja apsorpcije reflektiranih rentgenskih zraka (*Reflected Extended X-ray Absorption Fine-structure Spectroscopy-REFLEXAFS*)

3.5. TRANSPORTNA MJERENJA

3.5a) električna otpornost i Hallov efekt

3.5b) termosnaga (Thermopower), Peltierov efekt i toplinska vodljivost

3.6. MAGNETSKA MJERENJA

3.6a) Fonerov magnetometar

3.6b) Faradayeva vaga

3.6c) AC most

3.6d) Supravodljivi kvantni interferentni uređaj/interferometer (Superconducting Quantum Interference Device-SQUID)****

3.7. REZONANTNE TEHNIKE

3.7a) Nuklearna magnetska rezonancija (*Nuclear magnetic resonance-NMR*)****

3.7b) Elektronska spinska rezonancija (*Electron Spin Resonance-ESR*)***

Elektronska paramagnetska rezonancija (*Electron Paramagnetic Resonance-EPR*)**

3.7c) Dvostruka nuklearna elektronska rezonancija (*Electron Nuclear Double Resonance-ENDOR*) ****

3.7d) Nuklearna kvadrupolna rezonancija (*Nuclear Quadrupole Resonance-NQR*)*****

3.7e) Rezonancija površinskih plazmona (*Surface Plasmon Resonance-SPR*)

3.8. TEHNIKE KOJE UKLJUČUJU ELEMENTARNE ČESTICE

3.8a) Spektroskopija anihilacije pozitrona (*Positron Annihilation Spectroscopy-PAS*)

3.8b) Spektrometrija precesije muona (*Muon Precession Spectrometry- μ PS*)

3.9. TOPLINSKE (TERMIČKE) ANALIZE

3.9a) Termogravimetrija (*Thermogravimetry-TG*)

3.9b) Diferencijska termička analiza (*Differential Thermal Analysis-DTA*)

3.9c) Diferencijska pretražna kalorimetrija (*Differential Scanning Calorimetry-DSC*)

3.10. MEHANIČKA MJERENJA

3.10a) Test/pokus razvlačenjem (*Tension Test*)

3.10b) Test/pokus komprimiranjem (*Compression Test*)

3.10c) Test/pokus vibracijom (*Vibration Test*)

3.10d) Test/pokus tvrdoće (*Hardness Test*); Test/pokus mikrotvrdoće (*Micro-hardness Test*); Test/pokus nanotvrdoće (*Nano-hardness Test*); Test/pokus nanoindentacijom (*Nano-indentation Test*)

3.10e) Test/pokus ekstremno visokim tlakom (*Extreme High Pressure Test*)

3.10f) Dilatometrija (*Dilatometry*)