

Primeri primene fraktalne analize za karakterizaciju novih materijala

Sanja Aleksić, Branislav Randelović, Aleksandar Pantić, Neda Stanojević, *Member, IEEE*, Dušan Milošević

Apstrakt—U ovom radu je dat pregled novih metoda za prikupljanje, obradu i analizu materijala koji se koriste ili su u fazi istraživanja za primenu u savremenim uređajima za široku ili specifičnu, namensku proizvodnju. Razvoj biofizike, elektorhemije, napredak u proizvodnji alternativnih izvora energije, biomolekulima, ali i svim ostalim oblastima nauke, ukratko je objašnjen vezom između nanotehnologije, kao intrdisciplinarnih nauke budućnosti i novih matematičkih metoda i pristupa koji omogućavaju analizu zrna, pora i njihovih sračunskih delova i interakcija. Dobijeni rezultati imaju za cilj da se električne, fizičke i hemijske osobine materijala povežu sa njihovim izlaznim parametrima (temperatura, gustina, električna i magnetna provodnost...) i da se, u skladu sa tim, dođe do novih ili uvedu korekcije u postojeće matematičke i fizičke teorije i jednačine, da bi se dobili što relasniji i precizniji rezultati za karakterizaciju uređaja u kojima se koriste. Jedan od elementarnih uslova za unapređivanje karakteristika materijala je optimizacija procesa sinterovanja i elektro-fizičkih osobina materijala, što je, takođe, analizirano u ovom radu.

Ključne reči—Nanotehnologije; fraktalna analiza; obnovljivi izvori energije; materijali za elektroniku.

I. UVOD

Sve novije i, doskora, čak i nezamislivo nepoznate potrebe modernog čoveka u svim sferama života, primoravaju nas da budemo kreativni i gradimo nove koncepte bezbedne i stabilne arhitekture, medicine, informacionih i telekomunikacionih elemenata - objekata i sistema za prenos informacija na što veće daljine sa što manje gubitaka, sredstava za transport i prevoz robe i putnika, unapređenja poljoprivrede u cilju dobijanja što većih količina zdrave i jeftinije hrane, itd. Činjenica da su bukvalno sve oblasti života i rada, koje bi ljudima trebalo da donose dobrobiti, u intenzivnoj fazi razvoja, podrazumeva da je osnovni preduslov za to obezbeđivanje tehničkih i tehnoloških uslova

Sanja Aleksić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, ulica Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: sanja.aleksic@elfak.ni.ac.rs).

Branislav Randelović – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, ulica Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: branislav.randjelovic@elfak.ni.ac.rs).

Aleksandar Pantić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, ulica Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: aleksandar.pantic@elfak.ni.ac.rs).

Neda Stanojević – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, ulica Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: neda.stanojevic94@gmail.com).

Dušan Milošević – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, ulica Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dusan.milosevic@elfak.ni.ac.rs).

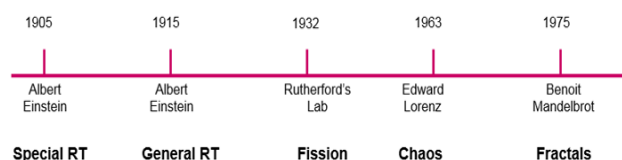
za proizvodnju i korišćenje ogromnih količina, najpre toplotne i električne, a zatim i svih ostalih vidova energije. Naravno, sve nove tehnologije bi, takođe, morale zadovoljavati što veći broj kriterijuma koji su okosnica borbe savremenog sveta za očuvanje životne sredine.

Nanotehnologije, nova naučna disciplina koja uključuje, pre svega, fundamentalne nauke kao što su, fizika, hemija, biologija, nauka o materijalima, ali i veliki broj inženjerskih grana (elektronika, građevinarstvo, mašinstvo), obećavaju da će u budućnosti biti vrlo bitan faktor razvoja i proizvodnje novih generacija uređaja za upotrebu u svim sferama života savremenog društva sa visokim stepenom minijaturizacije i integracije, a minimumom utroška energije [1-6].

Razvoj tehnika i tehnologija je nezamisliv i beskoristan ukoliko ne postoje novi načini za korišćenje već postojećih ili pronalaženje načina za proizvodnju i upotrebu novih, modernih materijala, koji bi od strane fizike, hemije i biologije mogli biti proučavani na neki način drugačiji od klasičnog. Prilagođavanje metodologija je neophodno s obzirom da se radi o objektima čije su dimenzije reda veličine nekoliko (ili nekoliko desetina) nanometara, tj. dimenzijama koje teže veličini jednog atoma, molekula ili njihovih klastera [1].

Osim gore pomenutih tehnika i tehnologija, čiji je razvoj uzročno-posledično povezan sa razvojem i upotrebom novih materijala, neophodno je razvijati i naučne metode prikupljanja, obrade i analize dobijenih rezultata eksperimentalnih merenja ili simulacija, koji služe za karakterizaciju njihovih fizičkih, hemijskih ili električnih osobina.

U ovom radu će biti dat osvrt na jedan noviji matematički pristup, koji se razlikuje od konvencionalne Euklidove geometrije i predstavlja pionirske pokušaje uvođenja drugačijeg načina razmišljanja primenjenog na zrnastu strukturu materijala, koji je poznat kao fraktalna analiza.



Sl. 1. Periodi važnih otkrića tokom XX veka.

Na Sl. 1 se vidi da je do otkrića "fraktala" došlo mnogo kasnije nego što je to bio slučaj sa prethodnim važnim

saznanjima koja su pomogla čovečanstvu na putu otkrivanja velikih tajni prirode.

Jedan fenomen, veoma intrigantan za ljudsku socijalnu inteligenciju, je činjenica da isti atomi predstavljaju osnovne gradivne elemente i nosioci su istih procesa i u živoj i u neživoj prirodi. Osnova tih procesa i pojava je, ustvari, kretanje elektrona, samostalno ili unutar atoma ili molekula. Potreba za razumevanjem "trenutka" koji pravi razliku između materije koja je živa i one koja to nije, zahteva interdisciplinarni pristup molekularne biologije i ostalih grana nauke i inženjerstva. Naime, molekularna biologija, kao nauka o životu, proučava različite procese u živim organizmima na molekularnom nivou. To znači da se ona bavi i kretanjem elektrona u biomolekulima, pa je neophodna saradnja sa molekularnom bioelektronikom, jer se kretanje elektrona zasniva na istim principima u živim organizmima, kao i u svim ostalim oblicima materije. Zbog toga je jedini ispavan pristup proučavati ga kao zajedničko svojstvo jednog fundamentalnog procesa [2].

Dosadašnji razvoj nauke i tehnologije ne omogućava nam da pratimo kretanje i proučavamo pojedine elektrone, kao nosioce elementarnog naelektrisanja i energije (električne, toplotne, mehaničke...). U ovom trenutku je moguće posmatranje i opisivanje kretanja molekula metodama koje nudi kvantna fizika. Naravno, sve vreme imamo u vidu da svaki molekul nosi klaster elektrona koji se kreće zajedno sa njim, ali se i svaki electron ponaosob kreće unutar samih atoma koji čine molekule, i čiji su osnovni elementi građe. Zato činjenica da, unutar molekula koji su delovi biosistema, postoje atomi i elektroni koji "nisu svesni" da li su delovi žive ili nežive prirode, je veoma važna, jer izdvaja molekul kao značajan integrativni faktor između njih.

Zbog svega toga će na ovom mestu biti ukratko objašnjene osnove fraktalne analize, kao jedne od novijih matematičkih metoda, koja se danas sa velikim uspehom, naročito uzimajući u obzir ograničenja Euklidove geometrije, koriste za karakterizaciju materijala na nivou nanometra. Korisnost njene primene u materijalima koji su zanimljivi sa stanovišta fizičke elektronike biće prezentovana na nekoliko, od velikog broja primera, ali bez ograničenja da se identična analiza ne može proširiti univerzalnim principima od objekata nanodimenzija do otkrivanja tajni kosmosa, jer sve to, sagledano objektivnim očima van našeg egocentričnog referentnog sistema, doprinosi i spoznaji uzroka, načina i razloga postojanja nas samih u univerzuma čiji smo sastavni deo.

Zbog toga će u ovom radu ukratko biti opisane osnove na kojima se bazira ideja fraktalne matematike, metode koje se primenjuju u zavisnosti od toga o kojoj vrsti problema i sferi ljudskog života se radi i primeri vezani za fizičku elektroniku, alternativne izvore energije, materijale za energetiku i telekomunikacione uređaje...

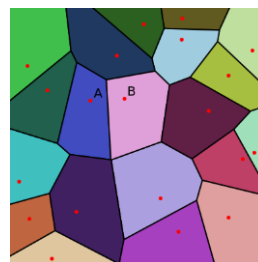
II. OSNOVNE POSTAVKE FRAKTALNE TEORIJE

U cilju približavanja koncepta novog načina razmišljanja i njegove primene u pomenutim naučnim istraživanjima

vezanim za razvoj elektronskih komponenata, prvenstveno u sferi primene u novim, alternativnim izvorima energije i telekomunikacionim sistemima, počecemo kratkom recapitulacijom analize BaTiO_3 , koja, kao što je već rečeno, predstavlja pionirska istraživanja u ovoj grani nauke.

Pokazano je da su kod BaTiO_3 , čiji prah ima zrnastu, granularnu strukturu, oblasti prostora oko granica pojedinačnih zrna odgovorne za skoro sve procese koji određuju fenomene i osobine različitih materijala. Naime, pojave opisane kao, veoma specifične karakteristike elektroprovodnosti, dielektrične, feroelektrične, feromagnetne, poluprovodničke i brojne druge, zajedno definišu bazične električne osobine u čitavoj zapremini materijala. To znači da se pomenuti procesi odigravaju u slojevima koji se mogu opisati kao ljske Minkovskog, i da se mogu ponavljati i na isti način prostirati po čitavoj zapremini posmatranog uzorka.

Zato je pogodna polazna tačka za opisivanje ćelijskih struktura kao što je kristalni perovskit i slični materijali Voronojeva teselacija (mozaički raspored geometrijskih figura u prostoru koje se ne preklapaju, ali "komuniciraju" graničnim oblastima bez praznina između njih), jer termin *tessella* potiče od latinske reči *tessella*, što znači ravan kamenčić ili parče keramike ili stakla za pravljenje mozaika. Ovakav koncept je primenljiv i na zrna i na pore, i efikasan je alat za prognozu projektovanih mikrostrukturnih svojstava i mikrostrukturne karakterizacije materijala (Sl.2).



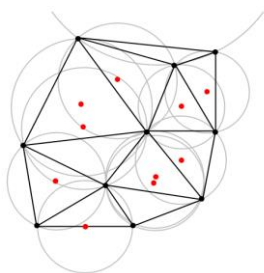
Sl. 2. Primer Voronojevog dijagrama.

Voronojevi dijagrami imaju mnogo mogućnosti za primenu, prvenstveno u predviđanju ili simulaciji interakcija između susednih struktura. Na primer, modeliranje bioloških ćelijskih struktura, modeliranje obrazaca rasta u šumama, procena mineralnih rezervi za rudarenje, mapiranje najbližeg aerodroma avione koji bi trebalo da slete u hitnim slučajevima, itd [6].

Da bi se formirala Voronojeva teselacija, potrebno je posmatrati skup tačaka u ravni, jer je to najlakše zamisliti, naročito u euklidskoj metrici. Za svaku tačku je moguće odabrati oblast u okolini koji je bliži toj tački od bilo koje druge tačke u datom skupu. Na taj način svaka oblast formira ćeliju koja odgovara toj tački. Unija svih skupova takvih ćelija pokriva oblast prostora koji se posmatra u datoj ravni. Ta unija skupova predstavlja Voronojevu teselaciju.

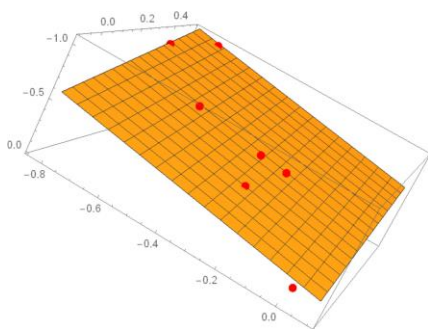
Usko povezan pojam sa Voronojevom teselacijom je Deloneova triangulacija. Za dati skup tačaka u nekom matematičkom prostoru, Deloneova triangulacija se formira povezivanjem tačaka i stvaranjem trouglova sa uslovom da za

bilo koju tačku ne postoji ni jedna druga tačka u opisanoj kružnici odgovarajućeg trougla (Sl.3).

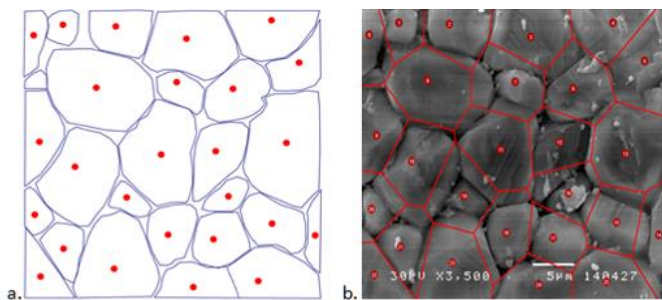


Sl. 3. Primer Deloneove triangulaciju sa tačkama (crvenim) koje predstavljaju centre odgovarajućih opisanih krugova Deloneovih trouglova.

Bazirajući se na osnovnim postavkama koje smo pomenuli, Voronojev dijagram je, najpre, definisan kao ravan ili deo ravni ili teselacije (S), pri čemu je ispunjen uslov da je skup $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, \dots\}$ i da je njihova unija skup S , a presek između bilo koje dve ćelije prazan skup. Osim toga, ovakva teselacija je izomorfizam sa konačnim skupom tačaka $Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\}$ iz skupa S na način prikazan na Sl.4 i 5:



Sl. 4. Izomorfni skup tačaka odabrane ravni ili teselacije S .



Sl. 5. Poligonalna aproksimacija konture zrna

Voronojeva ćelija V_i , koja je generisana oko tačke z_i , sadrži sve tačke x iz S i zadovoljava jednačinu:

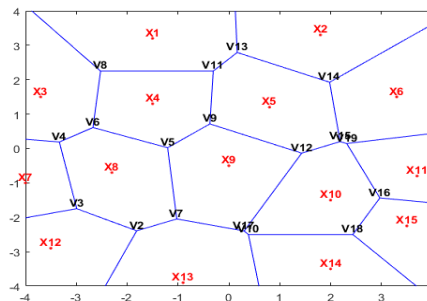
$$\rho(x, z_i) < \rho(x, z_j), \text{ za } j \neq i, \quad (1)$$

pri čemu je ρ Euklidovo rastojanje:

$$\rho(x, y) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

za tačku čije su koordinate:

$$x = (x_1, x_2), \quad y = (y_1, y_2). \quad (3)$$



Sl. 6. Primer Voronojevog dijagrama za datu distribuciju tačaka sa jednom pokretnom generišućom tačkom.

Na Sl.6 je dat primer Voronojevog dijagrama za datu distribuciju tačaka sa jednom pokretnom generišućom tačkom.

Algoritam za generisanje planarnih Voronojevih dijagrama može biti direktan i indirektan. Prva grupa algoritama generiše Voronojeve ćelije počevši od, a priori, datih tačaka generisanja. Indirektni algoritmi prvo generišu Deloneov trougao koji potom proizvodi Voronojeve ćelije. Triangulisana nepravilna mreža (TIN) je geometrijska struktura podataka koja se koristi, npr. u Geografskim informacionim sistemima (GIS) za 3D modeliranje reljefa (Sl.3). Osnovna karakteristika TIN strukture je korišćenje većeg broja tačaka na mestima gde je prikazan niži nivo detalja. Generalno, kad je set tačaka definisan, mora biti uspostavljena optimalna veza između tačaka trouglova korišćenjem Delaunai triangulacije (DT).

Ovakve polazne geometrijske i matematičke postavke su se pokazale kao izuzetno efikasan alat za prognozu projektovanih mikrostrukturnih svojstava i mikrostrukturne karakterizacije materijala čije su jedinice građe zrna i pore. Naime, čist euklidski pristup ne daje dovoljno verodostojnu reprodukciju oblika zrna i pora, pa pretpostavka fraktalne geometrije, bazirana na Voronojevom modelu daje rezultate mnogo bliže realnom formiranju mikrostrukturnih konstituenata – granica zrna i pora. Zato ovakav mikrostrukturni pristup rekonstrukcije i prognoze daje i realnije vrednosti elektrofizičkih parametara i svojstava, čime se pomeraju granice unutar fraktalne mikroelektrotrnike i stvaraju novi pristupi koji vode ka minijaturizaciji i integraciji višeg nivoa (Sl.4). Diektna implikacija svega toga se vidi u reviziji i korekcijama osnovnih fiziko - hemijskih i elektrkofizičkih zakona i jednačina (Cobbleov, Heivangov i intergranularni model za određivanje kapacitivnosti kondenzatora, Curie – Veisov zakon, visina Šotkijeve barijere, dielektrična i magnetna susceptibilnost materijala, električna otpornost...)

Veću fleksibilnost po pitanju rekonstrukcije strukturalnih jedinica (zrna i pora) i njihovih međusobnih odnosa sa konačnim ciljem predviđanja osobina mikrostrukture tokom procesa minijaturizacije obezbeđuje Kantorov pristup, razvijen kao metod fraktalne analize, koji omogućava modeliranje fraktalne površine modelirane kao skup fraktalnih krivih.

Kantorov ternarni skup C je kreiran iterativnim brisanjem otvorene srednje trećine iz skupa linearnih segmenata. Neka je I interval $[0,1]$. Brisanjem otvorene srednje trećine $[1/3, 2/3]$ iz intervala $[0,1]$, ostaju dva segmenta linije $[0, 1/3] \cup [2/3, 1]$. Zatim se briše otvorena srednja trećina svakog od segmenata, posle čega ostaju četiri linearna segmenta $[0, 1/9] \cup [2/9, 1/3] \cup [2/3, 7/9] \cup [8/9, 1]$. Ovaj proces se nastavlja do beskonačnosti. Na bilo kojoj n -toj iteraciji, ovakav skup je moguće pokriti uvođenjem 2^n intervala prečnika $1/2^n$. Procena gornje granice α - dimenzionalne Hausdorfove dimenzije C za pokrivanje intervala širine (prečnika) $w_a(1)$ se dobija iz:

$$\sum_{k=1}^{2^n} \left(w_a \left(\frac{1}{3^n} \right) \right)^\alpha = \frac{2^n (w_a(1))^\alpha}{3^{n\alpha}}, \quad (4)$$

Za dobijenu vrednost gornje granice broja iteracija skupa neophodno je prodiskutovati moguća rešenja. Iz (4) je jasno da će za $n \rightarrow \infty$ ovaj razlomak biti konačan i različit od nule ukoliko je $\alpha = \ln 2 / \ln 3$, što znači da je $\alpha = \ln 2 / \ln 3$ tražena vrednost gornje granice iteracije. Iz principa raspodele mase moguće je zaključiti da je ovo i donja granica iteracije datog skupa. Dakle, Kantorova dimenzija C je kartezijanski proizvod sa samim sobom, što znači da mora biti posmatran kao deo vektorskog proizvoda vektor-tenzor [1-6].

Na identičan način je moguće obuhvatiti 4^n krugova dijametara $2^{0.5}/3^n$. U tom slučaju će procenjena gornja granica α - dimenzionalne Hausdorfove dimenzije C za pokrivanje intervala širine (prečnika) $w_a(\sqrt{2})$:

$$\sum_{k=1}^{4^n} \left(w_a \left(\frac{\sqrt{2}}{3^n} \right) \right)^\alpha = \frac{4^n (w_a(\sqrt{2}))^\alpha}{3^{n\alpha}}, \quad (5)$$

biti konačna i različita od nule kada $n \rightarrow \infty$ za $\alpha = \ln 4 / \ln 3$, tako da Kantorov prah ima fraktalnu dimenziju $\alpha = \frac{\ln 2^2}{\ln 3} = \frac{2 \ln 2}{\ln 3}$. Isto bi važilo za bilo koji kompaktni skup tačaka na jedničnom intervalu.

III. PRIMERI PRIMENE FRAKTALNOG RAČUNA ZA IZRAČUNAVANJE ILI KOREKCIJU NEKIH FIZIČKIH PARAMETARA

Na postavkama datim u prethodnom delu ovog rada u najkraćim mogućim crtama, razvijen je veliki broj matematičkih metoda, koje se primenjuju u svim sferama

života i u svetovima u opsegu dimenzija od nanočestica do svemirskih objekata ili njihovih skupova.

A. Braunovo kretanje

Za oblast kojom se bavi fizička elektronika i fizika savremenih materijala za elektroniku veliki izazov je mogućnost predviđanja i modelovanja Braunovog kretanja elektrona u kristalnim materijalima. Sa druge strane, osnove Braunovog kretanja bi trebalo da budu iste i u biomolekulima. Povezivanje biofizičkih i sistema kondenzovane materije je od velikog značaja zbog potrebe za novim pristupom u mikroelektronskim biouređajima, biokompjuterima ili biočipovima. S obzirom na to da su submikronske čestice živog i neživog sistema identične, moguće je uspostaviti dvoznačno korespondentnu vezu ova dva sistema čestica čije je integrativno svojstvo biomimetička korelacija zasnovana na sličnostima fraktalne prirode Braunovog kretanja.

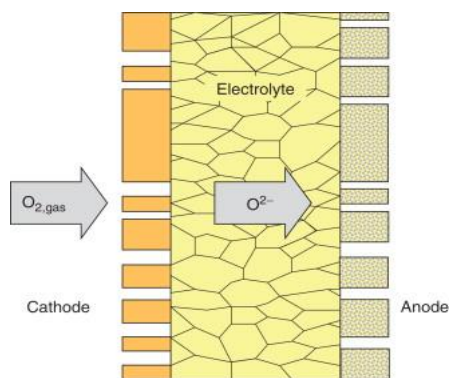
U jednom od istraživanja koja je sprovedla grupa naučnika, dobijeni su eksperimentalni rezultati kretanja bakterija pod uticajem energetske impulsa, kao što je muzika. Da bi bilo moguće definisati odnos između biofizičkih i fizičkih sistema čestica, uvođenjem matematičke analitičke forme i primenom karakterizacije fraktalne prirode Braunovskog kretanja fraktalnom interpolacijom, bilo je potrebno imati i eksperimentalne rezultate praćenja kretanja nekih biomolekula. Ova napredna istraživanja uključuju i proučavanja fizičkih sistema čestica u čvrstom stanju kao deo neorganskih sistema.

Dimenzije i obrasci kretanja bakterija i virusa ukazuju na biomimetičke sličnosti sa kretanjem čestica kondenzovane materije. Obrasci kretanja bakterija pokazuju stohastičke, a samim tim i nepredvidive karakteristike, jer se ovi mikroorganizmi suaraju kako međusobno, tako i sa okolnim molekulima, naglo menjaju pravce kretanja, kreću se rotaciono ili u cik-cak linijama, što je osnovna karakteristika Braunovog kretanja. Putanja i brzina njihovog kretanja su specifične za svaku bakterijsku vrstu, ali im je zajedničko to što na sve njih značajno utiču faktori okoline (temperatura, osvetljenost, "hranljive materije", energetske impulsi...). Budući pravci istraživanja moraju uključiti stvaranje matematičkih analitičkih jednačina, generisanje 3D interpolacionih dijagrama, kao i dizajniranje 3D fraktalnog interpolacionog dijagrama kretanja bakterija i biomolekula primenom metoda fraktalne interpolacije.

B. Materijali za alternativne izvore energije

Sa porastom svetske energetske krize, istraživanja novih, obnovljivih i alternativnih izvora energije su u porastu. Fokus je na istraživačkim oblastima, ponekad od manjeg značaja u aplikacijama, gde su različite metode sinteze i optimizacija svojstava mikrostrukture izvršile značajno poboljšanje elektrofizičkih svojstava izlaznih materijala i komponenti. Ovo je posebno značajno za veću energetske efikasnost u proizvodnji električne energije, pa je velika potreba za poboljšanjem performansi baterije i sistemi baterija, gorivnih ćelija, uređaja za eksploataciju energije vodonika, tj. za poboljšanjem kapaciteta rezervoara za tako proizvedenu

energiju, što je jedno od najvažnijih razvojnih pitanja u energetskoj sferi. Imajući u vidu postignute rezultate u oblasti elektrohemijskih izvora energije, posebno razvoja elektrolita, istraženi su doprinosi pojedinih elemenata ili materijala primenom fraktalne analize prirode materijala. Elektrohemija se bavi proučavanjem hemijskih reakcija koje se odigravaju na granici između elektroda (čvrsti metali ili poluprovodnici) i elektrolita, odnosno jonskog provodnika, preko kojih se vrši razmena naelektrisanja između elektroda i elektrolita. Sa tačke gledišta fizike i energetike, to znači da se, ustvari, traži veza između električne energije i hemijskih reakcija. Pri tome, elektrokataliza ima sve veći značaj u gorivim ćelijama, jer uključuje supstance koje povećavaju brzinu hemijskih reakcija, posebno na površinama umetnutih elektroda, naročito kada se koriste mešoviti jonsko-elektronski provodljivi oksidi. Tipični primeri su elektrode u gorivim ćelijama sa čvrstim oksidom (SOFC) ili membrane za izdvajanje kiseonika iz okolnog vazduha. Kako je za inkorporaciju kiseonika neophodno formiranje jona kiseonika, u sistemu moraju postojati slobodni elektroni, a to je moguće ili povezivanjem elektroda ili, još bolje, korišćenjem mešavine poluprovodnika i metala u čvrstom stanju (MIEC), kao što su oksidi sa perovskitnom kristalnom strukturom. Jedan od primera takve analize je istraživanje uticaja parametara mikrostrukture u oblasti elektrohemije (npr. uticaj koncentracije Ho_2O_3 (od 0,01 tež% do 1 tež%) i temperature sinterovanja (od 1320°C do 1380°C), kao parametara konsolidacije. Samim tim su otvorena vrata fraktalizacije elektrohemijske funkcije i u osnovnim termodinamičkim parametrima je uvedena fraktalna korekcija. Sa velikim interesovanjem se istražuje i zavisnost fraktalne dimenzije od koncentracije aditiva [1-6].



Sl. 7. Jedinična ćelija koja se sastoji od dve elektorde razdvojene elektrolitom.

Mnogobrojna novija proučavanja alternativnih izvora energije danas su u fokusu većine projekata iz oblasti energetike. Kako se svet suočava sa ozbiljnim energetskim izazovima, razvoj i implementacija tehnologija obnovljivih izvora energije postaju sve važniji. U ovom trenutku se, u tu svrhu, koriste svi raspoloživi izvori alternativne, kao i izvori energije bazirani na fosilnim gorivima. Međutim, najintenzivnije se proučavaju načini korišćenja energije Sunca. Procesi tokom kojih dolazi do pretaranja "energije"

Sunca u neki drugi oblik energije (prvenstveno hemijsku) su mnogobrojni i mogu biti fotokatalitički, fotoelektrohemijski, procesi fotosinteze... Na osnovu njih se razvijaju i odgovarajuće tehnologije, poznate kao tehnologije solarnih ćelija (fotonaponske i fototermalne). Iz navedenih referenci se jasno vidi da suštinu rešenja dela problema predstavlja upotreba materijala kao što je TiO_2 , ZnO , CoS i da se svi oni nanose u što tanjim (nanoslojevima, kao nanoprevlake za nanonožice...).

C. Feromagnetni i elektromagnetni materijali

Međutim, bez informatičke revolucije, bez mogućnosti prenosa informacija između nano-i makroobjekata, ništa od ovoga ne bi bilo moguće. Telekomunikacioni uređaji, tj. uređaji i oprema za obradu, prenos i prijem signala korišćenjem žičanih, radio, optičkih i dugih elektromagnetskih urežaja, takođe zahtevaju minijaturizaciju i optimizaciju brzine prenosa informacija, sa što manjim utroškom i gubicima sopstvene energije.

Za sve, gore navedene, primene i potrebe, neophodno je obezbediti rekonstrukciju i projektovanje strukturne jedinice (zrna i pore), da bi se postigla što viša minijaturizacija morfologije. Elektromagnetni, feroelektrični i srodni magnetni materijali se sve više koriste za ovakve pametne i multifunkcionalne namene. U tom smislu su zanimljiva istraživanja posvećena feroelektričnim materijalima, posebno jednofaznim kristalnim materijalima u tehnologiji tankog filma. Materijali sa strukturom perovskita imaju pravilan atomski red, tako da u tim mrežama postoje varijacije i promene koje se kao šabloni ponavljaju i prave domene atoma sa pravilnim promenama u određenom pravcu u materijalu, kao i polarizaciju u datoj tački. Difuzioni fazni prelaz utiče na feromagnetna svojstva materijala, jer se pod uticajem temperature javljaju mikrostrukturne promene u vidu promene rasporeda atoma i pojave faznih prelaza u mikro i nano skali. Zbog toga se menja i Kirijeva temperatura i trenutak početka polarizacije. Ovakvi fazni prelazi su dominantni kada čvrsti rastvor dobije homogenu strukturu. U ovoj fazi za analizu različitih površina zrna i pora, i definisanje njihovih geometrijskih karakteristika nije dovoljno koristiti euklidsku geometriju. Zato se skoro uvek uključuje elektronska mikroskopija, koja omogućava posmatranje objekata sa nekoliko nivoa uvećanja. Najzastupljeniji u eksperimentalnim procedurama u električnom i magnetnom smislu su BaTiO_3 i NZT ($\text{Nd}(\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$) materijali, dobijeni tokom standardnih metoda u kojima se odigravaju reakcije za dobijanje čvrstog stanja.

U ovim procesima je veoma bitno poznavanje morfologije keramičkih zrna, jer se realne međuzrnaste kontaktne površine, kao izrazito nepravilni oblici, mogu optimisati na adekvatan način samo korišćenjem fraktalnih modela. Model intergranularnog kapaciteta omogućava izračunavanje veličine zrna određivanjem vrednosti fraktalne dimenzije korišćenjem fraktalne korekcije. Pri tome je naročito važna uloga dielektrične i magnetne konstante materijala, čije vrednosti je moguće korigovati na osnovu fraktalne prirode intergranularne morfologije, a koja dovodi do korekcije u

Heyvangovom modelu i Curie – Veissovom zakonu.

Neka početna istraživanja inergranularnih kontakata BaTiO₃ keramike pokazuju da ona mogu imati jako veliki uticaj na električna i magnetna svojstva u celoj zapremini materijala. Inergranularni kontakti se formiraju tokom procesa sinterovanja. Tokom sinterovanja, dve čestice praha formiraju kontakt, dok međuatomske sile počinju da formiraju vrat čestice u kontaktnoj oblasti, što uzrokuje povećanje gustine materijala. Glavni mehanizam za povećanje gustine je smanjenje slobodne površinske energije sistema. U daljem procesu sinterovanja vrat počinje da raste. Kontrola tog procesa se vrši različitim difuzionim mehanizmima (rešetkasta difuzija, difuzija na granici zrna...), čije su brzine određene ukupnim fluksom atoma koji dolaze do vrata.

Karakterizacija datih procesa se može raditi simulacijom rasta vrata u vremenskom domenu, kombinovanjem rezultata za vrednosti kontaktnih površina sa kinetikom firmiranja tri ili više kontaktnih površina ili modelom tri ili više zrna, koji omogućavaju uspostavljanje ekvivalentnog modela klastera takvih zrna. To znači da se uzorak BaTiO₃ keramike može modelovati u električnom smislu kao impedansa koja sadrži dva kondenzatora, kalem i otpornik. Kako se uzorak keramike sastoji od velikog broja zrna organizovanih u klaster različitih veličina, moglo bi se pretpostaviti da svaki klaster, pa čak inergranularni kontakt unutar klastera, pokazuje slično ponašanje. Dominantni doprinos ekvivalentnoj impedansi u širokom frekventnom opsegu dolazi od kapacitivnosti, pa se svaki i inergranularni kontakt može posmatrati kao inergranularni mikrokondenzator. Na osnovu ovih razmatranja mogu biti formirani ekvivalentni električni modeli tri ili četiri klastera zrna, zasnovani na računarskom modeliranju i simulacijama [1-6].

IV. ZAKLJUČAK

Primena fraktalne analize na fundamentalno kretanje virusa, bakterija, ali i atoma, molekula, klastera i elektrona u svim strukturama poznato kao Braunovo kretanje je jedna od osnovnih ideja koja bi povezal aživu i neživu prirodu. Ali, i sve oblasti inženjerskih nauka, sa posebnim osvrtom na fizičku elektrotehniku, nauku o materijalima i savremenim materijalima u oblasti alternativnih izvora energije i telekomunikacija je u povoju. Povezivanje nanotehnologija sa biomimetikom i korekcijom svih ostalih do sada poznatih fizičkih i hemijskih jednačina klasičnim matematičkim aparatom bi trebalo korigovati uzimanjem u obzir parametara spoljašnje sredine i njihovog uticaja na ponašanje gradivnih elemenata živog i ili neživog mikrosveta.

ZAHVALNICA

Zahvalnost za otvaranje vrata za ulazak u oblast primene fraktalne analize u granama nauka koje su obuhvatile čitav spektar osnovnih, ali i preimenjenih nauka obuhvaćenih pojmom Nanotehnologije, sa strane svih potpisnika ovog rada

upućena je profesoru doktoru Vojislavu Mitiću sa Elektronskog fakulteta u NIŠu, koji je jedan od idejnih tvoraca ovog koncepta i sigurno čovek bez čije upornosti i istrajnosti, sagorevanja i vizije, mnogo toga ne bi bilo započeto.

LITERATURA

- [1] S. Aleksić, B.Markovic, V.V.Mitic, D Milosevic, M.Milosevic, M.Sokolovic, B.Vlahovic, Interpolation Methods Applied on Biomolecules and Condensed Matter Brownian Motion, Journal of Circuits, Systems and Computers Vol. 31, No. 04, 2250074 (2022).
- [2] Ribar, S., Neural Networks from Biophysical Applications in Microelectronics Parameters Measurements, in: Bioceramics, Biomimetic and other Compatible Materials Features for Medical Applications, (Eds. Najman S., et al.), Springer Nature, Cham, Switzerland, 2021.
- [3] Raj, B., et al., Nanotechnology for Energy Sustainability, Wiley-VCH, New York, USA, 2017.
- [4] J Mitić, V. V., et al., The Fractal Nature Materials micro-structure Influence on Electrochemical Energy Sources, Science of Sintering, 47, 2, pp. 195-204, 2015.
- [5] Mitić, V. V., et al., Fractal Nature Structure Reconstruction Method in Designing Micro-Structure Properties, Materials Research Bulletin, 101, May, pp. 175-183, 2018.
- [6] V. Mitić 1,2, V. Paunović, S. Janković, V. Pavlović, I. Antolović, D. Rančić, Electronic Ceramic Structure within the Voronoi Cells Model and Microstructure Fractals Contacts Surfaces New Frontier Applications, Science of Sintering, 45, pp. 223-232, 2013. doi: 10.2298/SOS1302223M.

ABSTRACT

This paper provides an overview of new methods for collecting, processing and analyzing materials that are used or are in the research phase for use in modern devices for wide or specific, dedicated production. The development of biophysics, electrochemistry, progress in the production of alternative energy sources, biomolecules, but also all other fields of science, is briefly explained by the connection under nanotechnology, as an interdisciplinary science of the future and new mathematical methods and approaches that allow analysis of grains, pores and their interactions. The aim of obtained results is to connect the electrical, physical and chemical properties of materials with their output parameters (temperature, density, electrical and magnetic conductivity ...) and, accordingly, to reach new ones or introduce corrections to existing mathematical ones and physical theories and equations, in order to obtain as realistic and accurate results as possible for the characterization of the devices in which they are used. One of the elementary conditions for improving the characteristics of the material is the optimization of the sintering process and the electro-physical properties of the material, which is also analyzed in this paper.

Application of fractal analysis for characterization of new materials examples

Sanja Alekšić, Branislav Randjelović, Aleksandar Pantić, Neda Stanojević, Member, IEEE, Dusan Milosević