

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА	
ПРИЈАВ	16 09 2014
Организација	
Година	2015
Место	

**НАСТАВНО – НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ**

**Предмет:** Извештај Комисије за оцену писаног дела и усмену одбрану докторске дисертације Сузана Филиповић, дипл. физ. хем.-мастер.

Одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку, бр. 32-1073/4 од 16. јула 2014. год именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Сузана Филиповић, дипл. физ. хем.- мастер, под насловом:

**“Утицај механичке активације на својства  $MgO-TiO_2$   
електрокерамике“**

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја о подобности кандидаткиње и теме за докторску дисертацију, која је одобрена за израду Одлуком Факултета техничких наука у Чачку бр. 25-272/4 од 05. марта 2014. год., на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи:

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области**

Докторска дисертација кандидаткиње Сузана Филиповић, , дипл. физ. хем.- мастер, под називом “УТИЦАЈ МЕХАНИЧКЕ АКТИВАЦИЈЕ НА СВОЈСТВА  $MgO-TiO_2$  ЕЛЕКТРОКЕРАМИКЕ“ представља резултат научно-истраживачког рада кандидата у области савремених електротехничких материјала, прецизније електрокерамичких материјала.

Развој савремених микроталасних диелектрика који имају широку примену у електроници, почев од мобилних телефона, сателитских антена, резонатора, филтера, последњих година је изузетно интензиван. Услови који ови материјали треба да задовоље су првенствено што ниже вредности диелектричних губитака ( $tg \delta$ ) и високе вредности диелектричне константе ( $\epsilon$ ). Наведена својства електрокерамике зависе првенствено од услова и начина припреме полазних компоненти. У бинарном систему  $MgO-TiO_2$ , након спроведених термичких третмана, развијају се две стабилне фазе  $MgTiO_3$  и  $Mg_2TiO_4$  при чему обе својим својствима испуњавају напред наведене захтеве савремене технике.

Добијање магнезијум титанатне керамике је могуће спровести коришћењем више метода као што су: сол-гел метода, термална декомпозиција из пероксидних прекурсора, метода таложења из метал-органичких раствора, метода хидротермалног механо-хемијског комплексирања, хемијска копреципитација, итд... Свака од наведених метода има своје специфичне разлоге које је чине погодним за производњу. Реакције у чврстој фази које се одигравају у систему током механичке активације и накнадног синтеровања су често коришћене технике за добијање керамика строго дефинисаних својстава и то пре свега због своје једноставности и релативно ниских трошкова производње.

На међународном истраживачком плану константно се улаже у развој што оптималнијих услова производње електронских материјала чија је примена широко распрострањена. Велики је број истраживања који се односи на реакције у чврстој фази и на механичку активацију као једну од метода за њихову реализацију. При овим истраживањима најбитније је утврдити оптималне параметре млевења, као што су однос кугли и праха, брзину ротације посуда, време механичке активације, моларни однос компоненти у смеси који ће довести до формирања жељених једињења. Истовремено велика пажња се посвећује поједностављењу и смањењу трошкова процеса производње.

## **1. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

Докторска дисертација Сузане Филиповић, под називом “УТИЦАЈ МЕХАНИЧКЕ АКТИВАЦИЈЕ НА СВОЈСТВА  $MgO-TiO_2$  ЕЛЕКТРОКЕРАМИКЕ“ представља резултат оригиналног научног рада кандидаткиње. Тема докторске дисертације је веома актуелна а нарочито је значајна за развој науке о материјалима у области електрокерамика.

У оквиру докторске дисертације детаљно је испитан утицај механичке активације, као методе модификације физичко-хемијских својстава материјала, на синтезу, структуру и својства магнезијум титанатне керамике добијене накнадним синтеровањем. Имајући у виду примене испитиваног материјала, проучавана су електрична својства добијених керамика у широком опсегу фреквенција од 10 kHz до 1 MHz.

Смеша полазних оксида  $MgO$  и  $TiO_2$ , је механички активирана у високоенергетском планетарном млину у трајању од 5, 10, 20, 40, 80 и 120 минута. Морфологија честица полазних оксида и активираних прахова, анализирана је скенирајућом електронском микроскопијом, анализом расподеле величина честица, као и адсорпционо десорпционом анализом. Микроструктурна анализа полазних прахова  $MgO$  и  $TiO_2$  указује да постоји значајна разлика како у хомогености, тако и у облику и величинама честица. Микроструктуре млевених прахова указују на уситњавање полазних честица као и на формирање агломерата. Након 10 минута активације почињу да се формирају меки агломерати, као тежња уситњеног материјала да смањи своју површинску енергију. Након 40 минута млевења у праху су присутни чврсти агломерати које није могуће разбити третманом у ултразвучном купатилу.

Резултати адсорпционо десорпционе анализе показали су да специфична површина има тренд опадања при почетним временима активације а након 40 минута почиње повећање, што је узроковано формирањем меких агломерата на почетку процеса, као и нарушавањем морфологије услед дробљења честица и реорганизовања уситњених делова.

Праћењем расподела величине пора утврђено је да су оне доминантно у области мезопора и да се са продужетком третмана добијају веће вредности, што је последица затварања ситнијих пора.

Фазни састав и структурне промене праћене су методама рендгенске дифракције и Раманске спектроскопије.

Анализом дифрактограма утврђено је да се полазни систем састоји од MgO, TiO<sub>2</sub> и мале количине Mg(OH)<sub>2</sub>. У самом почетку процеса (до 10 минута активације) суштинске промене се дешавају на магнезијум хидроксиду који се разлаже на оксид и воду. Након тога доминира разарање кристалне структуре титанијум диоксида. Процес деформисања честица као последице млевења праћен је настанком великог броја дефеката унутар кристалне решетке. Опажено је знатно повећање густине дислокација и микронапрезања. Такође је детектована фазна трансформација титанијум диоксида из анатаса у рутил преко интермедијарне фазе високих притисака TiO<sub>2</sub> II.

На основу резултата Раманске спектроскопије утврђено је да је анатас претрпео најзначајније промене а доминантан је процес формирања кисеоничних ваканција. Појавом нових модова у Раманским спектрима активираних прахова потврђено је постојање фазе високих притисака TiO<sub>2</sub> II. Деконволуција свих опажених модова у спектру показала је благи хипсохромни ефекат за неке модове што је последица варијација у положајима атома кисеоника, као и пораста нестехиометрије и напрезања решетке. Раст ширине на полувисини мода E<sub>g(1)</sub> који потиче од анатаса као и смањење интензитета и ширење свих пикова анатаса објашњен је фрагментацијом честица анатаса и уношењем дефеката током третмана.

Диференцијалном термијском анализом одређене су температуре реакција које се дешавају у посматраном систему оксида. На температури од 380 °C дешава се разлагање Mg(OH)<sub>2</sub> на магнезијум оксид и воду, док на 835 °C започиње реакција формирања MgTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и MgTiO<sub>3</sub> а уједно и фазна трансформација анатаса у рутил. На основу тих података као и резултата добијених рендгенском дифракцијом и Раманском спектроскопијом установљено је да се механизам формирања магнезијум титаната из полазних оксида одвија преко интермедијерног једињења MgTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Изотермско синтеровање на температурама 1100 °C , 1200 °C , 1300 °C и 1400 °C у току два сата је примењено на све активирание смеше. Промене густина ових узорака показале су да се добијају компактне керамике са вредностима теоријске густине преко 90 % за узорке синтероване на температурама од 1300 и 1400 °C. На основу микрографија синтерованих керамика закључено је да се на температури 1300 °C достиже завршни стадијум синтеровања, обзиром да је регистрована доминантна затворена порозност и сфероидизација пора.

Рендгеноструктурна анализа синтерованих испресака показала је присуство Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> и MgTiO<sub>3</sub> фазе у испитиваном систему, а у појединим узорцима запажено је и присуство MgO. На температури од 1300 °C постоје само фазе магнезијум титаната па су из тог разлога ови узорци одабрани за даља испитивања.

Детаљном анализом Раманских спектра испресака синтерованих на 1300 °C и фитовањем спектра установљено је да са повећањем времена активације до 80 минута и накнадним термичким третманом долази до значајног уређења кристалне структуре ове

електрокерамике. Ови резултати су у потпуности у корелацији са вредностима промене фактора добротe у функцији времена активације, где је уочено да је највећа вредност достигнута управо за узорак активиран 80 минута. Овакв тренд промене фактора добротe указује да се механичком активацијом од 80 минута при синтеровању на температури 1300 °C постиже највећи степен уређења кристалне структуре.

Мерења промене релативне диелектричне пропустљивости -  $\epsilon_r$ , спроведена на узорцима синтерованим на 1300 °C, показала су да су вредности  $\epsilon_r$  стабилне у посматраном фреквентном опсегу од 10 kHz до 1 MHz, што је од посебног значаја за примену овог материјала за пројектовање разних електронских компоненти. Такође је утврђено да промене релативне диелектричне пропустљивости у потпуности прате тренд промене густине са временом активације, што доказује директну корелацију ових двају величина. Добијене вредности релативне диелектричне пропустљивости су у интервалу од 29 до 33,4 у зависности од времена активације, а највећу вредност диелектричне пропустљивости има узорак активиран 120 минута и синтерован на температури 1300 °C у току два сата.

Праћењем промена вредности фактора добротe и тангенса угла губитака установљено је да највеће вредности фактора добротe, односно најниже вредности диелектричних губитака има узорак активиран 80 минута, а као последица најизраженије стабилизација кристалне структуре услед анихилације дефеката током синтеровања. Вредности фактора добротe овог узорка су фреквентно зависне и износе око 200 на 10 kHz и око 120 на 1 MHz. Поређењем вредности тангенса угла диелектричних губитака за неактивиран узорак и узорак активиран 80 минута, запажене су побољшане вредности код активираниог узорка и то за око 22 % ниже на фреквенцији 10 kHz и око 15 % на 1 MHz.

Испитана је фреквентна зависност специфичне електричне отпорности за све механички активирание узорке синтероване на 1300 °C. Са повећањем фреквенције специфична електрична отпорност се смањује и то са око  $6 \cdot 10^9 \Omega \text{cm}$  на 10 kHz на око  $4 \cdot 10^6 \Omega \text{cm}$  на 1 MHz. Са повећањем времена активације долази до пораста вредности специфичне електричне отпорности при чему је запажено највеће повећање код узорка активираних током 40 минута и износи око 43 % на 10 kHz, док на фреквенцији од 1 MHz повећање износи око 25% .

## 2. Преглед остварених резултата кандидата у одређеној научној области

**Сузана Филиповић**, девојачко Стевановић, дипломирала је на Факултету за физичку хемију Универзитета у Београду 2006. год. са просечном оценом 8,67, и темом "Утицај механичке активације на Раманове спектре  $\text{BaTiO}_3$ " чиме је стекла стручно звање дипломирани физико-хемикар. Исте године уписала је мастер студије на Факултету за физичку хемију и завршила их 2007. год. одбравивши мастер рад под називом "Промена специфичне површине порозног ZnO током синтеровања".

Сузана Филиповић је запослена у Институту техничких наука Српске академије наука и уметности од 2006. год., као истраживач приправник, на пројекту ресорног министарства науке, чији је руководилац био Академик Момчило М. Ристић. У звање истраживач сарадник изабрана је 2010. год. у Институту за нуклеарне науке Винча. Тренутно је ангажована као сарадник на пројекту *Усмерена синтеза, структура и својства мултифункционалних материјала – ОН 172057*.

Школске 2009/10 године уписала је докторске студије на Факултету техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу, студијски програм Електротехничко и рачунарско инжењерство, модул Савремени материјали и технологије у електротехници. Положила је све испите у складу са акредитованим студијским програмом са просечном оценом 9,75.

Члан је Српског керамичког друштва од 2011. године.

У досадашњем раду, као аутор или коаутор објавила је 22 научна рада у међународним часописима и 3 рада у домаћим часописима:

#### **Радови штампани у часописима међународног значаја M21**

1. V. P. Pavlović, J. Krstić, M. J. Šćepanović, J. Dojčilović, D. M. Minić, J. Blanuša, **S. Stevanović**, V. Mitić, V. B. Pavlović, "Structural investigation of mechanically activated nanocrystalline BaTiO<sub>3</sub>", *Ceramics International*, Vol. 37, (2011) p. 2513-2518, ISSN 0272-8842.
2. N. Obradović, **S. Filipović**, V. Pavlović, M. Mitrić, S. Marković, V. Mitić, N. Đorđević and M. M. Ristić, "Isothermal sintering of barium-zinc-titanate ceramics", *Ceramics International*, Vol. 37, (2011) p. 21-27, ISSN 0272-8842.
3. N. Obradović, N. Đorđević, **S. Filipović**, N. Nikolić, D. Kosanović, M. Mitrić, S. Marković, V. Pavlović, "Influence of mechanical activation on the sintering of cordierite ceramics in the presence of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a functional additive", *Powder Technology*, Vol. 218, (2012) p. 157-161, ISSN 0032-5910.
4. **S. Filipović**, N. Obradović, J. Krstić, M. Šćepanović, V. Pavlović, V. Paunović, M. M. Ristić, "Structural characterization and electrical properties of sintered magnesium-titanate ceramics", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 555, (2013) p. 39-44, ISSN 0925-8388
5. V. P. Pavlovic, M. V. Nikolic, V.B. Pavlovic, J. Blanusa, **S. Stevanovic**, V. V. Mitic, M. Scepanovic, B. Vlahovic, "Raman Responses in Mechanically Activated BaTiO<sub>3</sub>", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 97, (2014) p. 601-608, ISSN 1551-2916.

#### **Радови штампани у часописима међународног значаја M22**

6. N. Obradovic, N. Labus, T. Sreckovic, **S. Stevanović**, „Reaction Sintering of the 2ZnO-TiO<sub>2</sub> System“, *Science of Sintering*, Vol. 39, (2007) p. 127-132, ISSN 0350-820X.
7. N. Obradovic, **S. Stevanović**, M. Mitric, M. V. Nikolic, M. M. Ristic, "Analysis of isothermal sintering of zinc-titanate doped with MgO", *Science of Sintering*, Vol. 39, (2007) p. 241-248, ISSN 0350-820X.
8. **S. Stevanović**, V. Zeljkovic, N. Obradovic, N. Labus, "Investigation of sintering kinetics of ZnO by observing reduction of the specific surface area", *Science of Sintering*, Vol. 39, (2007) p. 259-265, ISSN 0350-820X.
9. **S. Filipović**, N. Obradovic, V. Petrovic, "Influence of mechanical activation on structural and electrical properties of sintered MgTiO<sub>3</sub> ceramics", *Science of Sintering*, Vol. 41, (2009) p. 117-123, ISSN 0350-820X.

#### **Радови штампани у часописима међународног значаја M23**

10. N. Labus, **S. Stevanović**, M.M. Ristic, "Sintering of mechanically activated ZnO-TiO<sub>2</sub> powders", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 47, (2008) p. 40-46, ISSN 1068-1302.

11. N. Obradovic, **S. Stevanović**, M.M. Ristic, "Analysis of nonisothermal sintering of zinc-titanate ceramics doped with MgO", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 47, (2008) p. 63-69, ISSN 1068-1302.
12. N. Obradovic, **S. Stevanović**, V. Zeljkovic, M.M. Ristic, "Influence of ZnO specific surface area on its sintering kinetics", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 48, (2009) p. 182-185, ISSN 1068-1302.
13. M.M. Ristic, N. Obradovic, **S. Filipović**, A.I. Bykov, M.A. Vasil'kovskaya, L.A. Klochkov, I.I. Timofeeva, "Formation of magnesium titanates", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 48, (2009) p. 371-374, ISSN 1068-1302.
14. **S. Filipović**, N. Obradović, V.B. Pavlović, S. Marković, M. Mitrić, M.M. Ristić, "Influence of mechanical activation on microstructure and crystal structure of sintered MgO-TiO<sub>2</sub> system", *Science of Sintering*, Vol. 42, (2010) p. 143-151, ISSN 0350-820X.
15. N. Obradović, **S. Filipović**, V. Pavlović, V. Paunović, M. Mitrić, M.M. Ristić, "Structural and Electrical Properties of Sintered Barium-Zinc-Titanate Ceramics", *Acta Physica Polonica A*, Vol. 120 (2), (2011) p. 322-325, ISSN 1898-794X.
16. N. Obradović, A. Terzić, Lj. Pavlović, **S. Filipović**, V. Pavlović, "Dehydration investigations of a refractory concrete using DTA method", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 110, (2012) p. 37-41, ISSN 1388-6150.
17. N. Obradović, **S. Filipović**, V.B. Pavlović, A. Maričić, N. Mitrović, I. Balać, M.M. Ristić, "Sintering of mechanically activated magnesium-titanate and barium-zinc-titanate ceramics", *Science of Sintering*, Vol. 43, (2011) p. 145-151, ISSN 0350-820X.
18. N. Obradovic, **S. Filipović**, M. Mitric, V. Pavlovic, V. Paunovic, D. Kosanovic, I. Balac, M. M. Ristic, "Influence of mechanical activation on electrical properties of barium-zinc-titanate ceramics sintered at 1100°C", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 50, (2012) p. 714-718, ISSN 1068-1302.
19. N.G. Djordjevic, N.Obradovic, **S. Filipović**, "Electrical properties of mechanically activated cordierite ceramics", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 51, (2012) p. 83-86, ISSN 1068-1302.
20. D. Kosanović, N. Obradović, J. Živojinović, **S. Filipović**, A. Maričić, V. Pavlović, Y. Tang, M.M.Ristić, "Mechanical-Chemical Synthesis Ba<sub>0.77</sub>Sr<sub>0.23</sub>TiO<sub>3</sub>", *Science of Sintering*, Vol. 44, (2012) p. 47-55, ISSN 0350-820X.
21. N. Obradovic, M.V. Nikolic, N. Nikolic, **S. Filipović**, M. Mitric, V. Pavlovic, P. M. Nikolic, A. R. Djordjevic, M. M. Ristic, "Synthesis of barium-zinc-titanate ceramic", *Science of Sintering*, Vol. 44, (2012) p. 65-71, ISSN 0350-820X.
22. **S. Filipović**, N. Obradović, D. Kosanović, V. Pavlović, A. Đorđević, "Sintering of mechanically activated MgO-TiO<sub>2</sub> system", *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 14, 1 (2013) p. 31-34, ISSN 1229-9162.

#### **Радови штампани у часопису националног значаја M52**

23. Н. Г. Ђорђевић, Н. Н. Обрадовић, **С. Ж. Филиповић**, "Кинетика механохемијске синтезе баријум-титаната", *Техника-Нови материјали*, 20, (2011) стр. 367-371, ISSN 0354-2300.
24. Н. Ђорђевић, Н.Обрaдовић, **С.Филиповић**, Ј.Žивојиновић, М. Mitrić, S. Marković, "Influence of Mechanical Activation on the Constituents of the MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO-TiO<sub>2</sub> System", *Tehnika –Novi materijali*, Vol. 21, (2012) p. 329-333, ISSN 0354-2300 .

25. Косановић Д., Филиповић С., Обрадовић Н., Павловић В., Ристић М., "Еволуција микроструктуре и кинетике синтеровања ZnO", Истраживања и пројектовања за привреду, 9(2), (2011) стр. 317-322, (ISSN 1451-4117)

### **3. Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему**

Докторска дисертација кандидаткиње Сузане Филиповић, под називом "УТИЦАЈ МЕХАНИЧКЕ АКТИВАЦИЈЕ НА СВОЈСТВА MgO-TiO<sub>2</sub> ЕЛЕКТРОКЕРАМИКЕ" одговара по садржају прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку и Стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу. По квалитету и обиму истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за докторску дисертацију.

Докторска дисертација је написана на 146 страна и подељена је у 5 поглавља. Рад садржи 67 слика, 11 табела, а цитирано је 141 библиографских наслова. Резултати су изложени у оквиру пет поглавља и то:

1. ТЕОРИЈСКИ ДЕО
2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО
3. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА
4. ЗАКЉУЧАК
5. ЛИТЕРАТУРА

У **уводном** делу истакнут је значај развоја нових материјала а нарочито електрокерамика са посебним освртом на магнезијум титанат, како са становишта њене примене тако и са становишта добијања. Такође, указано је на одређене предности и недостатке најчешће коришћених техника добијања испитиваног материјала. Поред тога, наведене су и технике које су коришћене у овој докторској дисертацији као и циљеви рада.

У оквиру **Теоријског дела** приказане су теоријске основе процеса механичке активације и синтеровања, као и њихова повезаност. Објашњено је генерисање дефеката кристалне структуре током механичке активације и њихов утицај на реактивност материјала. Затим су изнети основни појмови о електрокерамичким материјалима са посебним освртом на диелектрике и њихова својства. На крају поглавља приказан је фазни дијаграм система MgO-TiO<sub>2</sub>, као и кристалне структуре и својства свих фаза које се јављају у овом систему.

У делу који приказује **Експерименталне резултате** најпре су изложени услови механичке активације и добијање механички активираних смеша прахова, а затим њихово пресовање. Затим су приказани резултати анализе микроструктуре и то морфологије честица добијене снимањем СЕМ микрографија, одређивањем расподеле величина и средње величине честица, као и специфичне површине и расподеле величина пора адсорпционо-десорпционом анализом. Кристална структура механички активираних прахова испитана је дифракцијом X-зрака и снимањем Раманских спектра. Термијске промене које се дешавају у испитиваном систему праћене су диференцијално термијском и термогравиметријском анализом. Потом су приказани резултати изотермског синтеровања на различитим температурама као и детаљна карактеризација синтерованих испресака СЕМ, рендгенско-



дифракционом анализом и Раманском спектроскопијом. На крају су приказани резултати мерења електричних својстава синтерованих узорака у фреквентном опсегу од 10 kHz до 1 MHz.

У глави **Дискусија резултата истраживања** акценат је дат на објашњењу утицаја механичке активације на структуру добијених прахова, и на структуру и електрична својства керамике добијене накнадним процесом синтеровања. Детаљно је продискутована промена у морфологији прахова као последице механичког третмана, а затим је установљена веза између времена механичке активације и трансформација насталих у кристалној структури прахова. У наставку је дискутован утицај механичке активације на морфолошке промене узорака синтерованих на 1300 °C, као и промене у кристалној структури. На крају су анализирани резултати добијени мерењем електричних својстава ових керамика у фреквентном опсегу од 10 kHz до 1 MHz. Приказане су и објашњене промене вредности релативне диелектричне пропустљивости на 1 MHz. Упоређене су вредности фактора добротe тј. тангенса угла диелектричних губитака на фреквенцијама од 10 kHz, 100 kHz, 400 kHz и 1 MHz за сва времена активације, као и вредности специфичне електричне отпорности и електричног отпора испитиване електрокерамике на поменутиим фреквенцијама.

У **закључку** су сумирани резултати докторске дисертације, дефинисани су оптимални услови синтезе под којима се добија електрокерамика са најуређенијом кристалном структуром и најоптималнијим вредностима фактора добротe и релативне диелектричне пропустљивости. Посебно је истакнут утицај времена активације и фреквенције на промене специфичне електричне отпорности. Изнети су планови даљих истраживања која се односе на мерења у фреквентном опсегу до области микроталаса (GHz), испитивања утицаја допаната на структуру и својстава магнезијум титанатне керамике, као и утицај различитог стехиометријског састава полазних компоненти. Интересантно поглавље у даљим истраживањима чини и утицај различитих метода синтеровања (двостепено синтеровање, ласерско синтеровање, синтеровање под притиском...) на крајња својства ове електрокерамике.

#### **4. Научни резултати докторске дисертације**

Темељним теоријско-експерименталним истраживачким радом на докторској дисертацији, кандидаткиња Сузана Филоповић је дошла до низа значајних резултата.

Методама скенирајуће електронске микроскопије, одређивањем расподеле величина честица и адсорпционо-десорпционе анализе праћене су промене у морфологији, облику и величини честица и пора. Резултати добијени овим анализама указују на јасан закључак да је до 40 минута активације доминантан процес лома честица и формирање меких агломерата. Након овог времена примећено је формирање чврстих агломерата, затварање ситнијих пора и померање расподеле ка већим вредностима, односно доминирају крупне поре.

Рендгеноструктурном анализом смеша прахова утврђено је да током третмана не долази до механохемијске синтезе магнезијум титаната али је у систем унета довољна количина енергије тако да је систем у ексцитованом стању и на повишеној температури. При овим условима хемијска реакција се веома лако одиграва, а као резултат у синтерованим узорцима присутан је готово чист магнезијум титанат.



Утврђено је да се повећањем времена млевења знатно повећава густина дислокација и микронапрезања унутар кристалне решетке што је потврђено и праћењем динамике решетке мерењем Раманских спектра. Повећањем времена млевења побољшава се и кристаличност синтерованих узорака.

Најоучљивији ефекти активације су запажени код узорака праха који је активиран 80 минута и синтерован на 1300 °C у току два сата. Код ових узорака утврђено је да се формирала најуређенија структура као последица анихилације кисеоничних ваканција, насталих током процеса млевења на повишеној температури. Ово је доказано детаљном анализом карактеристичних модова у Раманским спектрима синтерованих узорака.

Са гледишта електричних својстава, такође је утврђено да је време од 80 минута активације најоптималније. Вредности диелектричних губитака, односно тангенса угла диелектричних губитака у потпуности су у корелацији са степеном уређења кристалне решетке. Најуређенија структура постигнута код узорака активираних 80 минута и синтерованих на 1300 °C има најниже вредности тангенса угла диелектричних губитака. У поређењу са неактивираним узорком смањење вредности диелектричних губитака је од око 22% на нижим фреквенцијама до око 15% на 1 MHz.

Највећу вредност релативне диелектричне пропустљивости од 33,4 достиже узорак активиран 120 минута и синтерован на 1300 °C два сата. Вредности специфичне електричне отпорности на испитиваним фреквенцијама (10 kHz, 100 kHz, 400 kHz и 1 MHz) су у интервалу од  $6 \cdot 10^9$  до  $4 \cdot 10^6$   $\Omega \text{cm}$ . Са повећањем фреквенције вредности специфичне електричне отпорности опадају. Пораст специфичне електричне отпорности са временом активације је последица микроструктуре која је еволуирала током процеса активације и накнадног синтеровања.

Веома битна чињеница коју треба истаћи је да је погодним одабиром услова млевења и синтеровања избегнуто формирање фазе  $\text{MgTi}_2\text{O}_5$  која веома неповољно утиче на електрична својства магнезијум титанатне керамике.

На основу приказаних резултата истраживања може се закључити да су оптимални услови припреме: време механичке активације од 80 минута и температура синтеровања 1300 °C / 2h. Под овим условима добија се керамика са најуређенијом кристалном структуром и најоптималнијим вредностима фактора добротe и релативне диелектричне пропустљивости.

## **5. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси**

Докторска дисертација кандидаткиње Сузанае Филиповић, под називом “УТИЦАЈ МЕХАНИЧКЕ АКТИВАЦИЈЕ НА СВОЈСТВА  $\text{MgO-TiO}_2$  ЕЛЕКТРОКЕРАМИКЕ“ даје низ резултата који се односе на пројектовање и развој нових електронских компоненти које се користе за израду микроталасних фреквентних резонатора и антена, за филтере и осцилаторе у комуникационим системима, актуаторе, интегрисана кола,...

Кандидаткиња је систематски дефинисала оптималне параметре механичке активације смеше полазних прахова и режима синтеровања. Детаљно је извршила анализу структурних промена на свим хијерархијским нивоима, које су настале током механичке активације полазних прахова а које условљавају добијање електрокерамике одговарајућих својстава.

Имајући у виду потенцијалну примену магнезијум титаната добијене стабилне вредности релативне диелектричне пропустљивости и фактора добротe у функцији фреквенције су од посебног интереса.

## **6. Начин презентирања резултата научној јавности**

Као резултат рада на овој докторској дисертацији кандидаткиња је публиковала четири рада у међународним научним часописима: **1** рад ранга **M21** и **3** рада ранга **M23**.

Комисија сматра да истраживања и резултати докторске дисертације пружају обиман и користан материјал за даљу презентацију на међународним и домаћим научним скуповима и објављивање радова у рефрентним научним часописима који се баве проблемима развоја савремених електрокерамичких материјала.

На основу увида у резултате истраживања приказане у докторској дисертацији, Комисија доноси следећи

## **ЗАКЉУЧАК**

1. Докторска дисертација кандидаткиње Сузана Филиповић, дипл. физ. хем.- мастер, под називом “УТИЦАЈ МЕХАНИЧКЕ АКТИВАЦИЈЕ НА СВОЈСТВА  $MgO-TiO_2$  ЕЛЕКТРОКЕРАМИКЕ“ одговара прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку.
2. У оквиру докторске дисертације кандидаткиња је кроз свеобухватан теоријско-експериментални рад дошла до низа оригиналних научних резултата који се односе на зависност синтезе, структуре и својстава магнезијум титанатне електрокерамике.
3. Докторска дисертација је резултат самосталног рада и по квалитету, обиму и приказаним резултатима истраживања у потпуности задовољава законске услове и универзитетске нормe прописане за израду докторске дисертације.

Дакле, докторанткиња Сузана Филиповић, дипл. физ. хем. - мастер, и поднета докторска дисертација испуњавају све потребне услове, који се у поступку оцене писаног дела докторске дисертације захтевају Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета техничких наука у Чачку.

На основу претходно изнетог предлажемо Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку и Стручном већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да прихвати докторску дисертацију кандидаткиње Сузана Филиповић, под насловом

### **“УТИЦАЈ МЕХАНИЧКЕ АКТИВАЦИЈЕ НА СВОЈСТВА $MgO-TiO_2$ ЕЛЕКТРОКЕРАМИКЕ“**

као успешно урађену и да кандидаткињу позове на усмену јавну одбрану дисертације.

У Чачку и Београду, септембра 2014. године

Чланови комисије

1. 

**Др Алекса Маричић**, професор емеритус, председник  
Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу  
Научна област: ФИЗИКА

2. 

**Проф. др Небојца Митровић**, редовни професор, ментор  
Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу  
Научна област: ФИЗИКА

3. 

**Проф. др Владимир Павловић**, редовни професор,  
Пољопривредни факултет Београд, Универзитет у Београду  
научни саветник, Институт техничких наука САНУ  
Научна област: НАУКА О МАТЕРИЈАЛИМА

4. 

**Проф. др Слободан Ђукић**, редовни професор,  
Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу  
Научна област: ЕЛЕКТРОНИКА

5. 

**Др Нина Обрадовић**, виши научни сарадник,  
Институт техничких наука САНУ Београд  
Научна област: НАУКА О МАТЕРИЈАЛИМА