

# Primjena funkcionalne keramike u elektrotehnici

---

**Baboselac, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:856312>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-21**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni studij**

**PRIMJENA FUNKCIONALNE KERAMIKE U**  
**ELEKTROTEHNICI**

**Diplomski rad**

**Ivan Baboselac**

Osijek, 2021.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSJEK**Obrazac D1: - Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 30.06.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Ivan Baboselac
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-463-A, 03.10.2012.
<b>OIB studenta:</b>	07261832737
<b>Mentor:</b>	Doc.dr.sc Tomislav Rudec
<b>Sumentor:</b>	Doc.dr.sc Goran Rozing
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	
<b>Član povjerenstva 1:</b>	
<b>Član povjerenstva 2:</b>	
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Primjena funkcionalne keramike u elektrotehnici
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika ( zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U diplomskom radu potrebno je navesti podjelu i svojstva keramike, vrste funkcionalne keramike te opisati na pet primjera iz elektrotehnike. Opisati primjenu funkcionalne keramike.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: Jasnoća pismenog izražavanja: Razina samostalnosti:

Potpis sumentora:

Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba



**FERIT**  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

**Ime i prezime studenta:**

Ivan Baboselac

**Studij :**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-463-A, 03.10.2012.

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:

**Primjena funkcionalne keramike u elektrotehnici**

izrađen pod vodstvom mentora

**Doc.dr.sc Tomislav Rudec**

i sumentora

Doc.dr.sc Goran Rozing

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
2. PODJELA KERAMIKE.....	3
2.1. Podjela keramike prema veličini kristalnog zrna.....	3
2.2. Podjela keramike prema funkcionalnosti.....	3
2.3. Podjela tradicionalne keramike prema namjeni.....	4
2.4. Podjela funkcionalne keramike prema namjeni.....	5
2.5. Podjela keramike prema kemijskom sastavu.....	6
2.5.1 Silikatna keramika .....	7
2.5.2 Oksidna keramika.....	8
2.5.3 Neoksidna keramika.....	9
3. SVOJSTVA KERAMIČKIH MATERIJALA.....	12
3.1. Struktura keramičkih materijala.....	12
3.2. Fizikalna svojstva keramike.....	15
3.3. Postupak proizvodnje keramičkih materijala.....	21
4. PRIMJERI PRIMJENE FUNKCIONALNE KERAMIKE U ELEKTROTEHNICI.....	25
4.1. Keramički izolatori, poluvodiči i supravodiči.....	26
4.2. Keramički ionski vodiči.....	29
4.3. Optičke keramike.....	30
4.4. Keramički dielektrični materijali.....	31
4.5. Piezoelektrični pretvarači i senzori.....	34
5. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40

Popis slika.....	43
Popis tablica.....	44
SAŽETAK.....	45
ABSTRACT.....	46
ŽIVOTOPIS.....	47

## 1. UVOD

Ljudi su kroz povijest tragali za različitim materijalima kako bi pronašli odgovarajući materijal za svoje potrebe. Kao najstariji materijal se javlja drvo, koje se može pronaći posvuda u prirodi. Evolucijom čovjeka i razvojem njegovog fizičkog i mentalnog statusa javljala se potreba za uporabom i drugih materijala. Shodno tome, različita povijesna razdoblja nosila su upravo ime po različitim materijalima koja je čovjek koristio, pa tako postoji kameno doba, brončano doba i željezno doba. Među ranim materijalima koje je čovjek koristio, svakako se nalazi kamen i glina. Glina je materijal koji je podatan kada se navlaži, a kada se osuši postaje tvrd i zadržava zadani oblik. To je omogućilo izradu različitih posuda za npr. transport vode ili čuvanje zrnja i pojavu jednog od prvih zanata, lončarstva, i primjenu keramike za zadovoljavanje ljudskih potreba [1]. Riječ keramika potječe od grčke riječi “*keramikos*“ što označava predmet od gline koju se peče. Razvoj keramike prati se od paleolitika i pojave najstarijih kultura. Iz paleolitskog lončarstva se razvila današnja funkcionalna keramika. Tijekom i nakon industrijske revolucije otkriveni su mnogi novi materijali kao što su funkcionalne keramike, polimeri i u novije doba nanomaterijali koji poboljšavaju svojstva poznatim postojećim materijalima. Danas raspolažemo sa 70 000 vrsta tehničkih materijala koji imaju različite primjene. Među njima keramički materijali zauzimaju vrlo važno mjesto. Značajan razvitak keramičkih materijala dogodio se u drugoj polovici 19. stoljeća kada su razvijani keramički materijali koji se koriste za izradu izolatora. Početkom 1950. godine, keramika ulazi u mnoga tehnološki napredna područja kao npr. istraživanje svemira, energetiku, medicinu, zrakoplovnu industriju, elektroniku itd [2].

Danas se funkcionalna keramika koristi u različitim područjima kao što je građevina, izrada sanitarne opreme, izrada dijelova koji su izloženi intenzivnom trošenju, koroziji, visokoj temperaturi, u elektrotehnici itd.

U ovom radu napravljen je pregled područja razvoja i primjene keramičkih materijala. Dostupna literatura koja je poslužila kao izvor podataka temelji se na stranim i domaćim časopisima te objavljenim radovima različitih autora. Metodom deskripcije opisani su pojedinačni pojmovi i neki primjeri primjene funkcionalne keramike u elektrotehnici. Cilj ovog rada je prikaz spoznaja i primjena znanja o funkcionalnoj keramici u svakodnevnoj praksi.

Sadržaj diplomskog rada podijeljen je u pet poglavlja koja zajedno predstavljaju logički povezanu cjelinu. U uvodnom dijelu rada, analizirani su predmet i cilj diplomskog rada, korištene metode prilikom pisanja rada i sadržaj rada. U drugom poglavlju analizirana je podjela keramičkih materijala s obzirom prema veličini kristalnog zrna, prema funkcionalnosti, prema namjeni i prema kemijskom sastavu. U trećem poglavlju govori se o svojstvima keramike s obzirom na strukturu keramičkih materijala, o postupcima proizvodnje keramičkih materijala, te su prikazane molekulske strukture pojedinih materijala. U četvrtom poglavlju analizirane su vrste funkcionalne keramike. U petom poglavlju prikazani su neki primjeri primjene funkcionalne keramike u elektrotehnici. Analizirana je primjena dielektrika kod kondenzatora, feroelektrika u industriji elektroničkih uređaja (elektromehanički pretvarači), piezoelektrika kod senzora i signalnih uređaja. Također je opisana magnetna keramika koja ima primjenu u telekomunikacijama i zapisu podataka. Kao zadnji primjer, opisana je ionski vodljiva keramika na bazi YSZ (itrijski stabilizirani cirkonij). Šesto poglavlje, zaključak, predstavlja sintezu svega iznesenog u radu, dok kraj rada prikazuje popis relevantne literature koja je korištena prilikom pisanja rada, sažetak, abstract i životopis.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

U diplomskom radu potrebno je navesti podjelu i svojstva keramike, vrste funkcionalne keramike te opisati na pet primjera iz elektrotehnike. Opisati primjenu funkcionalne keramike.



## **2. PODJELA KERAMIKE**

Keramički materijali su anorganski materijali kristalne građe sastavljeni od metalnih i nemetalnih elemenata spojenih ionskim i/ili kovalentnim vezama. Keramiku se može oblikovati i zatim očvrnuti zagrijavanjem na visokim temperaturama. Općenito su takvi predmeti tvrdi i otporni na koroziju, ali krhki i lomljivi. Mnogostruke mogućnosti primjene keramičkih proizvoda temelje se na svojstvima keramičkih materijala poput visoke kemijske postojanosti, te specifičnih električnih i toplinskih svojstava. Riječ keramika potječe od grčke “*keramikos*“ što označava predmete od pečene gline. Izraz „*keramika*“ danas ima prošireno značenje.

### **2.1. Podjela keramike prema veličini kristalnog zrna**

Prema tom kriteriju keramiku se dijeli na:

- grubu keramiku (za industrijsku upotrebu i upotrebu u građevinarstvu – kao što su crijep, opeke, pokrivne ploče, izolacijski materijali itd.) koja ima veličinu zrna od 0,1 do 0,2 mm.
- finu keramiku (za materijale u svakodnevnoj upotrebi i lončarstvu, uključivo i za izradu ukrasnih predmeta, te predmeta koje se koristi u medicini, elektrotehnici itd.) čija je veličina zrna manja od 0,1 mm.

### **2.2. Podjela keramike prema funkcionalnosti**

- tradicionalna keramika: glavni tipovi tradicionalne keramike su zemljano posuđe, stakleno posuđe kamenina i porculan, što se razlikuje prema kemijskom sastavu i temperaturi na kojoj se glineni predmet peče. Zemljano posuđe se peče na temperaturama 1000 do 1150 °C i dobiva se grubo i porozno posuđe. Poroznost se može popraviti glaziranjem i dodatnim zagrijavanjem. Kamenina se peče na 1200 °C, nije porozna pa se u takvom posuđu može pripremljati hrana i držati tekućine. Porculan je keramika načinjena od kaolin gline s primjesama stakla, granita i feldspar minerala, koja se peče na 1200 do 1450 °C. U novije doba porculan se zamjenjuje koštanim

porculanom gdje je u smjesu dodan koštani prah čime se postiže još veća čvrstoća proizvoda.

- funkcionalna keramika: napredna keramika općenito nije bazirana na glini, nego na ili oksidnim ili neoksidnim spojevima ili kombinaciji obaju vrsta spojeva. Odabrani spoj ili smjesu spojeva se najprije dobro samelje u vrlo fini prah, oblikuje se i zatim se peče na temperaturama 1600 do 1800 °C, vrlo često u atmosferi bez kisika. Takav postupak se naziva „sinteriranje“ jer se vrlo fine čestice keramičkih komponenti spajaju i tvore tvrd, žilav i izdržljiv proizvod otporan na koroziju. Razvijeni su mnogi napredni keramički materijali, tzv. funkcionalna keramika, s vrlo posebnim svojstvima i namjenama, npr. u proizvodnji i obradi metala, aeronautici, elektronicima i telekomunikaciji, automobilskoj industriji i transportu, medicini (biokeramika), te obrani i zaštiti osoba.

### **2.3. Podjela tradicionalne keramike prema namjeni**

Prema načinu korištenja, tradicionalnu keramiku se može podijeliti na sljedeći način:

- strukturna: u strukturnu keramiku se uključuje cigle, crjepove, keramičke pločice, tanjure, kipove i sl. Većina ovakvih predmeta je bazirana na glini, najčešće se oblikuje utiskivanjem. Predmeti imaju dobra izolacijska svojstva koja opadaju s povećanjem gustoće. Gustoća se povećava vitrifikacijom, tj. pretvaranjem gline u staklasto stanje. To se postiže uporabom viših temperatura obrade i/ili smanjenom veličinom zrna.
- vatrostalna: vatrosalni predmeti zadržavaju oblik i čvrstoću kada su izloženi visokim temperaturama i temperaturnom stresu. To znači da se mogu koristiti u pećima za taljenje metala, ili npr. kao štit kod poniranja svemirske kapsule u atmosferi. Vatrostalnu keramiku se izrađuje od titanijevog, silicijevog, cinkovog oksida ili smjese nekog od ovih oksida i manje skupih odgovarajućih spojeva.
- abrazivna: abrazivni materijali su vrlo tvrdi, lomljivi i otporni na toplinu, a koristi ih se za brušenje rubova i hrapavih površina pri obradi drveta, kamena, metala i plastike. Postoje dva tipa abrazivnih materijala. Među najvažnije prirodne abrasive ubraja se dijamant, korund, kvarc i smjesa korunda i magnetita ili drugih dodataka primijenjenih

- na brusnom papiru ili kamenu. Sintetički abrazivi su jednako dobri, pa čak i bolji od prirodnih, a proizvodi ih se od silicijevog karbida, borovog karbida, sintetičkih dijamanata i sintetičkog korunda proizvednog od boksitne rude. Sintetički korund osim za izradu korozivnih materijala, koristi se i za proizvodnju sintetičkog dragog kamenja (ametista, topaza, rubina, safira) za izradu nakita.
- cementi različite vrste cementa koristi se kao vezivni materijal za pijesak i šljunak, a za izradu žbuke i betona koristio se cement još u Starom vijeku. Iako se danas gotovo isključivo koristi industrijski proizvedeni, cement se nalazi i u prirodnim nalazištima. Posebno je zanimljivo nalazište pozzolanskog cementa kod grada Pozzuoli ispod Vezuva. Beton s ovim cementom otvrdnjava i pod morem, pa su s njime u Starom vijeku u Sredozemlju građena pristaništa i lukobrani. Cementi su građevinski vezivni materijali dobiveni od vapnenca, lapora i drugih dodataka ovisno o predviđenoj primjeni. Proizvode se dvije skupine cementa. Silikatni cementi se dobivaju mljevenjem vapnenca i lapora a aluminatni cementi se dobivaju pečenjem boksita i vapnenca te se koriste za izradu vatrostalnih betona.

#### **2.4. Podjela funkcionalne keramike prema namjeni**

- strukturna: napredna strukturna keramika koristi se u širokom rasponu primjena. Strukturna keramika je superiorna u odnosu na metalne materijale zbog svoje izdržljivosti na višim temperaturama npr. kod plinskih turbina, nuklearnih reaktora, sapnica raketnih motora i dr. Međutim korištenje ovakve keramike može biti ograničeno zbog moguće pojave napuklina [3].
- bio-keramika: ova visokokvalitetna keramika se primjenjuje u medicini, tj. u ljudskom organizmu kao implantat za kuk, koljeno i sl, pa se može također smatrati strukturnom keramikom.
- elektrokeramika: to su keramički materijali koji se prvenstveno koriste zbog njihovih električnih svojstava. Keramika ovisno o zahtjevima, može biti dobar vodič ili imati visoki otpor i biti dobar izolator. Silicijev karbid npr. ostaje dobar vodič i pri povišenju temperature. U ovaj tip keramike ubraja se dielektrična keramika za kondenzatore, te piezoelektrične i piroelektrične uređaje.

- magnetna keramika: glavna sirovina za izradu magnetske keramike je ferit tj. željezov(III) oksid poznat kao hrđa, te stroncijev karbonat. Ova vrsta keramike je razvijena sredinom XX. stoljeća i uglavnom služi kao jeftina zamjena za magnete na bazi željeza.
- optička keramika: ova vrsta keramike može biti transparentna u vidljivom spektru i korištena kod kućanskih aparata i lampi, a može biti transparentna u infracrvenom i ultravioletnom spektru i npr. korištena kao scintilacijski materijal kod površinskih detektora rentgenskog zračenja, u laserima itd.
- vodljiva keramika: ovaj tip napredne keramike također ima širok spektar korištenja kao npr. vodljiva keramika za protone, keramičke membrane za vođenje iona ili s primjenom kod gorivnih ćelija i generatora kisika itd.
- poluvodička keramika: primjer poluvodičke keramike na bazi cinkovog oksida može biti varistor koji štiti uređaj od naponskog udara.
- keramika kod integriranih krugova: moderna elektronika je bazirana na integriranim krugovima, sklopovima koji sadrže mnoštvo međusobno povezanih elektroničkih komponenata. Da bi takav sustav ispravno radio, mikroskopske elektroničke komponente i njihove veze trebaju biti izrađene na substratu, tj. odgovarajućoj podlozi koja zadovoljava zahtjeve izolacije, vodljivosti i sigurnog pakiranja, što će omogućiti da je uređaj izoliran od okoline i radi kao kompaktna jedinica.
- rezna keramika: zbog specifičnih zahtjeva prema reznom alatu, za proizvodnju rezne keramike razvijene su posebne metode sinteriranja. Npr. pokazalo se da se dodavanjem titanijevog karbida aluminijevom oksidu dobiva izvrstan keramički rezni alat za sve namjene.

## 2.5. Podjela keramike prema kemijskom sastavu

Prema kemijskom sastavu keramiku se dijeli na:

- silikatnu keramiku
- oksidnu keramiku
- neoksidnu keramiku

### 2.5.1. Silikatna keramika

Najstarija vrsta keramike je silikatna keramika. Silikatna keramika je najčešće aluminosilikatni materijal dobiven od prirodnih sirovina. Silikati, kojih ima oko 800, najveća su skupina raznolikih anorganskih spojeva koja tvori značajna rudna ležišta. Zbog velike zastupljenosti silicija od oko 27,5 % mase Zemljine kore, silikati su najzastupljeniji minerali u Zemljinoj kori i zajedno s kvarcem ( $\text{SiO}_2$ ) čine oko 90 % mas. % Zemljane kore. Temeljna strukturna jedinica silikata je  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  tetraedar u čijem se težištu nalazi ion  $\text{Si}^{4+}$ , a na vrhovima ioni  $\text{O}^{2-}$ . U različitim silikatima tetraedri su na različite načine preko zajedničkih kisika međusobno povezani kovaletnim vezama, dok se preostali negativni naboj kompenzira ugradnjom nekog od brojnih kationa. Ovisno o tome kako se tetraedri spajaju preko zajedničkog kisikovog atoma, silikati se dijele u šest skupina koje se strukturno i kemijski vrlo razlikuju. Atomi silicija mogu biti zamijenjeni nekim drugim atomima, najčešće aluminijevim, pa tako nastaju aluminosilikati [4].

Osnovne prirodne sirovine za silikatnu keramiku su glina i kaolin te glinenci (feldšpati) i talk kao nosioci silicija. Ovisno o namjeni, u proizvodnji predmeta silikatne keramike koriste se i magnezijevi aluminosilikati, te druge anorganske tvari. Silikatna keramika je mnogo jeftinija od oksidne ili neoksidne keramike zbog velike dostupnosti jeftinijih prirodnih sirovina, dobre kontrole procesa proizvodnje i relativno niskih temperatura obrade. Zbog toga su predmeti tradicionalne keramike uglavnom silikatnog porijekla.

Osim za proizvodnju predmeta tradicionalne keramike, najčešća upotreba silikatne keramike je u termotehnici, u izradi elektroinstalacija i vatrostalnih proizvoda, te u visokonaponskim i niskonaponskim mrežama gdje se koristi kao izolator, osigurač i za proizvodnju kućišta.

### 2.5.2. Oksidna keramika

Oksidna keramika su anorganski spojevi metala (Al, Zr, Ti, Mg) ili metaloida (Si) s kisikom. Oksidi se mogu spajati s kisikom ili ugljikom, a formiraju se u složenije oksinitridne ili oksikarbidne keramike. Oksidna keramika ima visoku točku taljenja, otpornost na trošenje i širok spektar električnih svojstava. Minerali koji se koriste za izradu keramičkih materijala, drobe se ili melju u fini prah koji je pročišćen dodavanjem u otopinu. Talog se onda odvoji od otopine i grije da se dobije čisti prah.

U oksidnu keramiku ubrajaju se:

- aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- magnezijev oksid (MGO)
- cirkonijevog oksida ( $\text{ZrO}_2$ )
- cinkov oksid ( $\text{ZnO}$ )

Ovi oksidi imaju važne karakteristike:

- otporni su na koroziju pri povišenim temperaturama (vatrootpornost)
- imaju dobru čvrstoću pri visokim temperaturama (vatrostalnost)
- otporni su na trošenje

Zbog tih svojstava oksidna keramika često zamjenjuju metale, jer su prikladni za izradu komponenti u plinskim turbinama, raketnim motorima i motorima s unutarnjim sagorijevanjem, za izradu alata, te u elektrotehnici.

Aluminijev oksid je jedna od najvažnijih industrijski iskorištenih keramika. Aluminijev oksid je najstarija, najraširenija i najjeftinija vrsta tehničke keramike. Bitna svojstva gusto sinteriranog aluminijevog oksida su visoka čvrstoća i tvrdoća, toplinska stabilnost, velika otpornost na trošenje i kemijska postojanost pri povišenim temperaturama [5].

Dodavanjem magnezijevog oksida akuminijevom oksidu postiže se keramika visoke gustće, čvrstoće i tvrdoće. Neki od konkretnih primjera primjene su rezni alati, vatrostalne posude, svjećice motora s unutarnjim izgaranjem, dijelovi mlaznih motora, dijelovi pumpi za agresivne medije, implantati u ljudskom organizmu, u elektronici, izradi izolacijskih dijelova, izgradnji postrojenja za dijelove otporne na trošenje itd.

Najčešće korišteni materijal poslije sinteriranog korunda je keramika na bazi cirkonijevog oksida. U proizvodnji, najvažnija sirovina je mineral cirkonijev pijesak ( $ZrSiO_4$ ). Cirkonijev oksid ima veliku tvrdoću pa se koristi za izradu noževa, zubarskih proteza, vatrostalnih i abrazivnih materijala itd [6].

Industrija keramike koristi značajne količine cinkovog oksida zbog njegove visoke temperaturne stabilnosti. Keramički predmeti od cinkovog oksida imaju izvrsnu kemijsku i korozivsku otpornost, otpornost na trošenje i nisku toplinsku provodljivost. Iako je cinkov oksid poluvodič, dopiranjem može postati vodič. Ugrađivanjem čestica dopiranog oksida u keramički izolator, dobiva se varijabilni otpornik: na niskom naponu materijal jedva da vodi struju, ali na visokom naponu je dobar vodič. Štoviše, granica vodljivosti može biti postavljena prilikom proizvodnje ove funkcionalne keramike. Postavljena granica može biti određena veličinom čestica cinkovog oksida i debljinom izolirajućeg medija.

### 2.5.3. Neoksidna keramika

Grupi neoksidne keramike pripadaju materijali koji se baziraju na spojevima bora, ugljika, dušika i silicija. Najvažniji predstavnici neoksidne keramike su karbidne i nitridne keramike:

- silicijev karbid ( $SiC$ )
- borov karbid ( $B_4C$ )
- volframov karbid ( $WC$ )
- silicijev nitrid ( $Si_3N_4$ )
- aluminijev nitrid ( $AlN$ )

Svojstva keramičkih materijala baziranih na silicijevom karbidu ostaju postojana do temperature iznad 1400 °C. Silicijev karbid otporan je na koroziju, abraziju i eroziju te se koristi u industrijskim postupcima kod kojih se očekuje otpornost na oksidaciju, na koroziju na visokim temperaturama te na trošenje.

Borov karbid ima malu gustoću, a zbog svoje posebno velike tvrdoće ima nadimak „crni dijamant“. Keramika borovog karbida je kemijski vrlo inertna, termički stabilna na povišenim temperaturama i ima izvrsna termo-električna, fizikalna i mehanička svojstva. Ona se odlikuje tvrdoćom, visokim talištem, otpornošću na abraziju i udarce, visokom kemijskom neaktivnošću i velikim kapacitetom absorpcije neutrona. Slično kao silicijev i aluminijski karbid, tako i borov karbid predstavlja odličan keramički materijal koji pruža najvišu razinu balističke zaštite i primjenjuje se kod izrade zaštitnih vozila i helikoptere, te kod plovila protiv direktne vatre, artiljerijskih šrapnela i mina [7].

Silicijev nitrid nudi izvrsnu kombinaciju svojstava materijala. Zbog njegove mikrostrukture, ovakvi keramički predmeti su otporni na toplinske i mehaničke šokove te imaju visoku temperaturnu otpornost [8].

Keramički materijali od silicijevog nitrida su proizvedeni na visokim temperaturama od 1750 °C do 1900 °C u zaštitnoj atmosferi dušika i koriste se za izradu keramičkih reznih alata, cijevi, ventila i sapnica te različitih zahtjevnih predmeta u mehaničkom inženjerstvu.

Razvoj keramičkih materijala na bazi aluminijskog nitrida potaknut je potražnjom za materijalima visoke toplinske vodljivosti koji su ujedno i dobri električni izolatori. Ovakva kombinacija svojstava je povoljna za izradu mikroelektroničkih kućišta i substrata (podloga) kod hibridnih integriranih krugova, pretvarača i mikrovalnih cijevi gdje se prilikom rada generira toplina, te u optoelektronici. Zbog karakteristika kemijske postojanosti, aluminijska nitridna keramika upotrebljava se i za izradu dijelova koji su u direktnom kontaktu s rastaljenim metalima, te dijelova sustava za izmjenu topline.



Transparetnost prema UV zrakama čini ovaj materijal primjenjivim u izradi UV-LED elemenata, praktičnih za primjenu u sterilizaciji pitke vode i materijala osjetljivih na povišene temperature i kemikalije, te u izradi biometrijskih senzora.

### 3. SVOJSTVA KERAMIČKIH MATERIJALA

U ovom poglavlju govori se o strukturi keramičkih materijala te njihovim svojstvima kao što su visoka temperatura taljenja, velika otpornost na koroziju, različita elektromagnetska svojstva i dr. Također je objašnjen postupak proizvodnje keramičkih materijala.

#### 3.1. Struktura keramičkih materijala

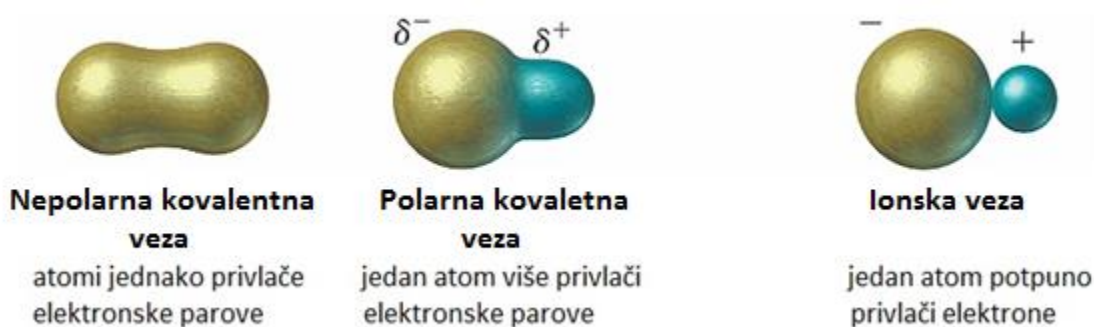
Keramički materijali su složeni kemijski spojevi koji sadrže metale i neorganske elemente. To su vrlo tvrdi ali krhki materijali s niskom žilavošću i duktilnošću, visokog modula elastičnosti, dakle, izrazito su skloni naglom širenju napukline u uvjetima djelovanja mehaničkog opterećenja. Keramike su vrlo otporne na trošenje i općenito imaju različita mehanička i fizikalna svojstva. Većina vrsta keramika su izvrsni električni i toplinski izolatori zbog odsutnosti vodljivih elektrona te male toplinske rastezljivosti.

Pojavljaju se dva tipa keramičkih materijala, jednostavni i složeni materijali. Najčešći tip jednostavne keramike su magnezijev oksid ( $MgO$ ) i aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ). Složeni materijali su npr. forsterit te kordierit. Veze atoma u kovalentnoj i ionskoj vezi jače su nego u metalima. Zbog ionskih i kovalentnih veza koje keramika posjeduje ona je obično kemijski inertna, tvrda, visoke tlačne čvrstoće, niske toplinske te električne vodljivosti, s visokom temperaturom taljenja. Često ta dva načina vezivanja koegzistiraju u istom keramičkom materijalu u nekom stupnju, što kod kemijski različitih keramika dovodi do različitih karakteristika.

Ionska veza se najčešće pojavljuje između metalnih i nemetalnih elemenata koji se uvelike razlikuju u svojoj elektronegativnosti. Atomi imaju različite električne naboje što stvara elektrostatičku privlačnost među njima. To uzrokuje povezivanje između atoma. Ioni se pravilno raspodjeljuju. Ionski vezane strukture često imaju prilično visoke temperature taljenja jer su im veze jake i neusmjerene. Ionska veza se nalazi u mnogim keramičkim strukturama npr. u magnezijevom oksidu i aluminijevom oksidu [9].

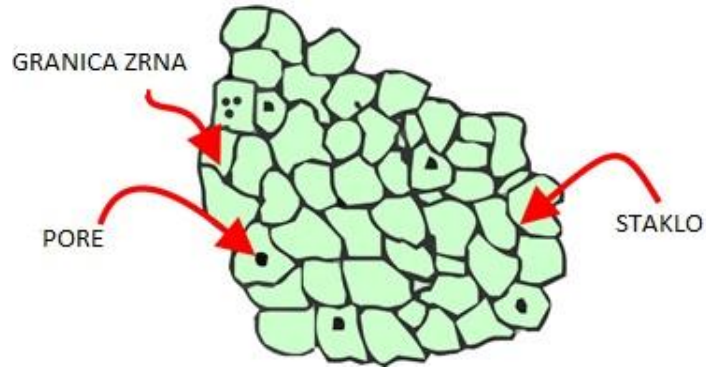
Drugi glavni način vezivanja u keramičkim strukturama je kovalentna veza. Za razliku od ionske veze gdje se prenose elektroni, atomi koji su kovalentno vezani dijele elektrone. Atomi su raspoređeni tako da svaki par najbližih susjednih atoma stvara kemijsku vezu dijeljenjem para elektrona. Obično je to veza između nemetala s malom razlikom u elektronegativnosti. Kovalentno vezivanje je, za razliku od ionskog vezivanja, usmjereno i nalazi se u mnogim keramičkim strukturama kao što su silicijev karbid (SiC) i borov nitrid (BN). Mnogi keramički materijali sadrže i ionsku i kovalentnu vezu. Spojevi koji su uglavnom ionske ili uglavnom kovalentne veze imaju više temperature taljenja od spojeva u kojima ni jedna vrsta veze ne prevladava.

Kada su komponente keramike metal i nemetal, primarna je ionska veza. Kao primjer mogu poslužiti magnezijev oksid (MgO) i barijev titanijev trioksid ili barijev titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) koji je važna piezoelektrična keramika. U spoju metaloida i nemetala kao što su barijev nitrid (BN) i silicijev karbid (SiC), veza unutar njih je prvenstveno kovalentna.



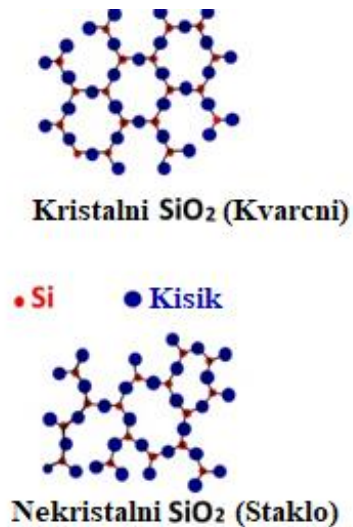
**Sl. 3.1.** Vrste veza u atomu

Keramografija je područje znanosti o keramici unutar kojeg se proučava struktura keramike te razvoj i primjena tehnika i postupaka izrade uzoraka za analizu, a time se dobiva bolji uvid u strukturu i svojstva. Pojam keramografija obuhvaća analizu mikrostrukture keramike reda veličine približno od 0,1 do 100  $\mu\text{m}$ . Mikrostruktura keramike je prikazana na Sl. 3.2. i obuhvaća: kristalna zrna, granice zrna, sekundarne faze, pore i mikropukotine. Mnoga mehanička, optička, toplinska, električna i druga svojstva keramike odraz su te mikrostrukture [10].



**Sl. 3.2.** Mikrostruktura keramike

Osnovno strukturalno svojstvo keramičkih materijala je da keramika može imati kristalnu ili amorfnu molekulska strukturu Sl. 3.3.



**Sl.3.3.** Molekulska struktura keramike [11].

Kao primjer kompleksne strukture keramičkih materijala može poslužiti ferimagnetna keramika. Po kemijskom sastavu ovi keramički materijali sadrže željezov oksid i jedna ili više atoma nekog drugog metala. Ferite se dijeli na „mekane“ i „tvrde“ ferite ovisno o magnetskoj koercitivnosti, tj. o njihovoj otpornosti da budu magnetizirani. Tri su osnovne klase ferita od kojih se izrađuje feritna keramika. Promatrano s aspekta kristalne strukture, to su neke oksidne keramike koje mogu kristalizirati u jednoj od tri osnovne klase ferita. To su spineli, heksagonski feriti i garneti.

Spinel u užem smislu je mineral magnezijev aluminat ( $MgAl_2O_4$ ) koji ima specifičnu kristalnu i molekulsku strukturu. Spinel u širem smislu su spojevi koji imaju isti tip strukture kao spinel. To su složeni oksidi opće formule  $X^{2+}Y^{3+}_2O_4$  u kojima su najčešće  $X = Mg, Fe, Zn, Mn, Ni$  i  $Y = Al, Fe, Cr$ . Zbog svoje specifične kubične strukture bez preferiranog smjera magnetizacije, moguće je relativno lagano mijenjati smjer magnetizacije primjenom vanjskog magnetskog polja. To je razlog zašto spinelni feriti imaju nisku koercitivnost, pa ih se naziva „mekani feriti“ [12].

Slično kao skupina spinela, skupina garneta predstavlja grupu silikatnih minerala koji imaju međusobno slična fizikalna svojstva i kristalne forme, ali se razlikuju u kemijskom sastavu. Opća formula garneta je  $X^{2+}_3Y^{3+}_2(ZO_4)_3$  gdje je  $X = Ca, Mg, Fe, Mn$  i  $Y = Al, Fe, Cr$ , dok je  $Z = Si, Ge, Ga, Al, V, Fe$ . Slično kao spinelni, garnetni feriti također nose naziv „mekani feriti“.

Heksagonalni feriti ili „tvrđi feriti“ imaju kompleksnu heksagonsku kristalnu strukturu i smjer osi magnetizacije kod njih se ne može lako promijeniti. Njihova opća formula je  $X(Fe_{12}O_{19})$  gdje je  $X = Ba, Sr, Pb$ .

### **3.2. Fizikalna svojstva keramike**

Fizikalna svojstva keramičkih materijala koja se bitno razlikuju od fizikalnih svojstava metalnih materijala, odnose se na gustoću, čvrstoću, elastičnost, tvrdoću, te toplinska, električna, magnetna i optička svojstva.

Keramika može izdržati visoke temperature, dobar je toplinski izolator i ne povećava znatno svoj volumen pri zagrijavanju. To keramiku čini izvrsnom toplinskim izolatorom za primjene koje se kreću od oblaganja industrijskih peći do prekrivanja svemirskih letjelica kako bi ih se zaštitilo od visokih temperatura prilikom ulaska u atmosferu. Keramika varira u električnim svojstvima od izvrsnih izolatora do supravodiča. Većina keramičkih materijala su nemagnetski materijali, iako se od ferita (keramika bazirana na željezu) izrađuju izvrsni magneti. Nabrojana svojstva keramiku čini prikladnim konstrukcijskim materijalom za najrazličitije primjene. Jedina značajna mana je

njezina krhkost, ali ovaj problem se rješava spajanjem različitih materijala, odnosno razvojem kompozita.

Keramika se odlikuje sljedećim svojstvima:

- visokom temperaturom taljenja (otpornost na toplinu)
- malom gustoćom u usporedbi s metalima
- umjerenom čvrstoćom
- visokom električnom otpornosti
- visokom tvrdoćom i snagom
- značajnom izdržljivošću (dugotrajnost)
- niskom električnom i toplinskom vodljivosti (dobri izolatori)
- velikom otpornosti na koroziju
- kemijskom inertnosti (ne reagiraju s drugim kemijskim elementima)

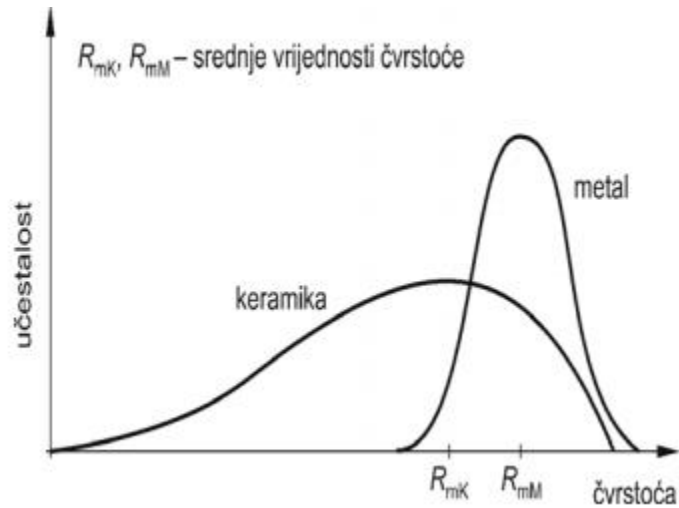
Uz mnoge prednosti u odnosu na druge materijale, keramički materijali imaju i nedostatke:

- mala žilavost – visoka krhkost
- niska otpornost toplinskom umoru (šoku)
- niska vlačna čvrstoća
- visoki troškovi sirovina i postupaka oblikovanja

Gustoća keramičkih materijala iznosi 20 do 70% gustoće koje posjeduje čelik. To znači da postoje velike mogućnosti za smanjenje mase, što je prednost pri izradi pokretnih dijelova u strojarstvu.

Na čvrstoću keramike utječu sastav materijala, njegova mikrostruktura, temperatura pečenja, stanje površine te postupak proizvodnje. Savojna čvrstoća je najvažnija za procjenu općenite čvrstoće materijala i na nju utječu veličina, oblik, površina i nehomogenost strukture koja ovisi o veličini i raspodijeli defekata nastalih u proizvodnji. Greške mogu biti pore, pukotine i druga oštećenja uslijed kojih dolazi do urušavanja konstrukcije keramičkog predmeta u uporabi. Tlačna čvrstoća keramike je od 5 do 10 puta veća od savojne, pa zbog toga keramiku treba prvenstveno tlačno opterećivati. Vlačna čvrstoća keramike je vrlo često i do 20 % manja od savojne. Zbog

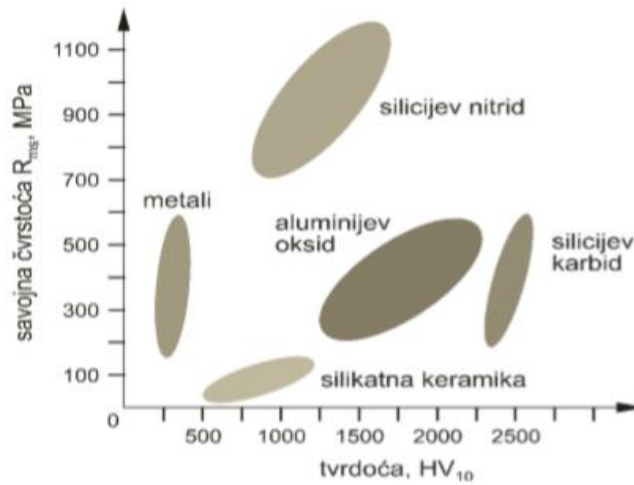
navedenih razloga preporučljivo je izbjegavati ili minimizirati vlačna naprezanja [13]. Na Sl.3.4. je prikaz usporedbe čvrstoće metala i keramike. Iz ovog prikaza vidimo da je čvrstoća keramike gotovo duplo manja od čvrstoće metala [14].



Sl. 3.4. Usporedba čvrstoće metala i keramike

Tvrdoća ukazuje na otpornost materijala prema deformiranju i veća je što je veći modul elastičnosti. Modul elastičnosti je kod gotovo svih vrsta keramike veći nego kod čelika, zahvaljujući jakim međuatomskim vezuama. Pri istom opterećenju kruti i tvrdi keramički dijelovi iskazuju 30-50 % manje deformacija u odnosu na čelik. Najveći modul elastičnosti ima aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ), a najmanji je kod sinteriranog silicijevog nitrida (SSN). Keramika ima izvrsnu otpornost na trošenje zahvaljujući visokoj tvrdoći. Međutim, zbog povećane tvrdoće keramičke materijale se teško plastično oblikuje.

Na Sl. 3.5. prikazan je dijagram tvrdoće u odnosu na savojnu čvrstoću.



Sl. 3.5. Dijagram tvrdoće [15].

Toplinska vodljivost ( $\lambda$ ) keramičkih materijala je uglavnom manja nego kod čelika ili bakra. Keramički materijali se zbog male toplinske vodljivosti ponašaju kao izolacijski materijali.

Toplinska rastezljivost ( $\alpha$ ) je, osim kod cirkonijeva oksida ( $ZrO_2$ ), forsterita ( $MgSiO_4$ ) i magnezijevog oksida ( $MgO$ ), obično manja nego kod čelika.

Otpornost na promjene temperature je kod većine keramičkih materijala slaba, što znači da su osjetljivi na temperaturne šokove. Izuzetci ovome su aluminijev titanat, kvarc i kordijerit. Kod metalnih materijala velika lokalna temperaturna naprezanja za posljedicu imaju malu lokalnu plastičnu deformaciju, dok kod keramike takva naprezanja mogu izazvati rast pukotina. Upravo zbog toga treba kod keramike izbjegavati brze i velike promijene temperatura.

Keramika pokazuje vrlo široki raspon električnih i magnetskih svojstava u usporedbi s drugim vrstama materijala. Elektrokeramički proizvodi koriste se u nizu proizvoda uključujući elektroničke substrate (podloge), dielektrike za kondenzatore, te keramike za piezoelektrične, magnetne, optičke i vodljive uređaje.



Električna i magnetska svojstva keramičkih materijala zavise o međuatomskim vezama i kristalnoj strukturi. Neke fizikalne veličine koje se odnose na električna i magnetska svojstva i o kojima treba voditi računa kod elektroničkih elemenata su:

- permitivnost
- električna provodnost
- piezoelektričnost
- permeabilnost
- magnetna histereza
- koercitivnost i dr.

Kada se izolatori, tj. dielektrični materijali nalaze u električnom polju, oni pokazuju električna svojstva iako sami ne vode elektricitet. Objašnjenje se nalazi u činjenici da se elektroni u atomima izolatora ne kreću slobodno kao kod vodiča, nego se samo malo pomiču u odnosu na pozitivni naboj. Ta se pojava pomicanja pozitivne jezgre u jednom smjeru, a elektrona u suprotnom, naziva polarizacija. Na taj način od neutralnih atoma ili molekula nastaju dipoli. Vrlo važna svojstva dielektrika su susceptibilnost i dielektrična konstanta ili permitivnost, a manifestiraju se kod kondenzatora. Dielektrična konstanta je vrlo važno svojstvo dielektrika, a definira se kao mjera sposobnosti tvari da smanji elektrostatske sile između dva nabijena tijela. Mnoge vrste keramike i stakla imaju relativnu dielektričnu konstantu između 4 i 10, što pokazuje podatci u Tab. 3.1.

**Tab. 3.1.** Vrijednosti relativne dielektrične konstante [16].

Materijal	Relativna dielektrična konstanta
Dijamant	5,5 – 10
SiO <sub>2</sub>	3,7 – 3,9
Tinjac	5,4 – 8,7
Steatit	5,5 – 7,5
Kordijerit	4,5 – 5,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,8
MgO	9,6
BaTiO <sub>3</sub>	3
TiO <sub>2</sub>	14 – 110
Forsterit	6,2
Mulit	6,6

Električna provodnost je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo materijala da provodi električnu struju, a recipročna je električnoj otpornosti. Većina keramičkih materijala su materijali koji imaju vrlo nisku električnu provodnost zbog ionsko-kovaletnih veza koje ne formiraju slobodne elektrone. Električna vodljivost keramike mijenja se ovisno o frekvenciji polja i ovisno o temperaturi. Mehanizmi vodljivosti kod keramičkih materijala su složeni i mogu uključivati kretanje elektrona, šupljina i iona. Vrijednosti električne provodnosti za neke vrste keramike prikazani su u Tab. 3.2.

**Tab. 3.2.** Vrijednost električne provodnosti [17].

Materijal	Električna provodnost, 1/Ωm
Beton	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-9</sup>
Soda-vapno staklo	10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-11</sup>
Porculan	10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-12</sup>
Borosilikatno staklo	~ 10 <sup>-13</sup>
Aluminijev oksid	< 10 <sup>-13</sup>
Silicijev dioksid	< 10 <sup>-18</sup>

Piezoelektrični efekt primjećuje se osim kod nekih kristala i polimera, također i kod nekih keramičkih materijala. Efekt se očituje u pojavi električnog naboja, a time i električnog napona, na površini tijela kojeg se elastično deformira vanjskom silom. Piezoelektrične keramike koriste se pri izradi pretvarača, senzora, oscilatora, zvučnika, sonarnih uređaja, tintnih pisača, uređaja za kompenziranje neželjenih vibracija, upaljača, aktuatora u upravljačkoj i regulacijskoj tehnici itd. Tipična piezoelektrična keramika je barijev titanat i druge keramike koje imaju isti tip molekulske strukture. Uz ovaj tip, u uporabi su također i kompoziti piezoelektričnih keramika s neaktivnim polimerima.

Magnetska ili feritna keramika pokazuje permanentnu magnetizaciju, tj. ferimagnetizam. Primjena ovakvih keramika nalazi se u izradi stalnih magneta i transformatora, što znači u telekomunikacijskim uređajima i uređajima za snimanje informacija. Feritna keramika je tvrda, krhka, sadrži željezo, a po strukturi je polikristalna, tj. načinjena je od velikog broja malih kristala. Primjena je također česta kod kontrole elektronskog snopa u katodnim cijevima, kod ulazno/izlaznih filtera, prekidača, kod visoko-frekventnih transformatora itd [18].

Spinelna feritna keramika ili mekani feriti koriste se za izradu efikasnih feritnih jezgri za visokofrekventne induktore, transformatore i druge mikrovalne komponente. Feritne jezgre su imale vrlo važnu primjenu u računalnim memorijama ranih računala i kod proizvodnje magnetskih sredstava za vanjsko memoriranje podataka (magnetske vrpce i diskovi). Garneti su druga grupa mekih ferita koja je posebno pogodna za aplikaciju u mikrovalnom području [19].

Heksagonalni ili tvrdi feriti imaju visoku koercitivnost. Zato ih se koristi u izradi stalnih magneta pa imaju primjenu kod zvučnika, malih elektromotora i ukrasnih predmeta npr. magneti koji se kao ukras postavljaju na vrata hladnjaka.

### **3.3. Postupak proizvodnje keramičkih materijala**

Keramički materijali se oblikuju pri sobnoj temperaturi od sirove mase a svoja tipična svojstva dostižu nakon postupka pečenja, odnosno sinteriranja, pri visokim temperaturama ili višim

tlakovima. Odabirom sirovine i postupka proizvodnje može se jako utjecati na svojstva keramičkih materijala.

Pored odabira sirovine važna svojstva su i čistoća, veličina zrna, specifična površina i vrsta pomoćnih sredstava tj. aditiva koje se koristi u postupku proizvodnje. Pomoćna sredstva su:

- sredstva za oblikovanje (plastifikatori, očvršćivači, sredstva za tečenje itd.)
- sredstva za sinteriranje (anorganske tvari)

Osnova za proizvodnju keramičkih materijala je prah, koji mora biti visoke čvrstoće. Dobiveni prah se dalje prerađuje u gotovi keramički proizvod kroz nekoliko faza: Sl. 3.6.

- priprema mase (mljevenje, miješanje, filtriranje, granuliranje i sušenje)
- oblikovanje i obrada sirovca (sušenje, mokro prešanje, izostatičko prešanje, ekstrudiranje, suspenzijsko lijevanje, injekcijsko prešanje (lijevanje), obrada u sirovom stanju ( tzv. zelena obrada), obrada u predpečenom stanju (tzv. bijela obrada)
- sinteriranje (reakcijsko sinteriranje u različitim plinskim atmosferama; vruće prešanje / vruće izostatičko prešanje)
- završna obrada (rezanje, lasersko rezanje, bušenje, brušenje, lepanje, honanje, poliranje, čišćenje, spajanje i montaža)
- završno ispitivanje, konačna izrada



Sl. 3.6. Proces proizvodnje keramike [20].

Prva faza u proizvodnji keramičkih materijala je priprema mase za oblikovanje. Pri proizvodnji keramike može se koristiti već pripremljena masa za oblikovanje ili se masa priprema od sirovine i aditiva. U oba slučaja masa može biti pripremljena u obliku:

- suspenzije za lijevanje
- keramičkog tijesta za ekstrudiranje
- praha za prešanje

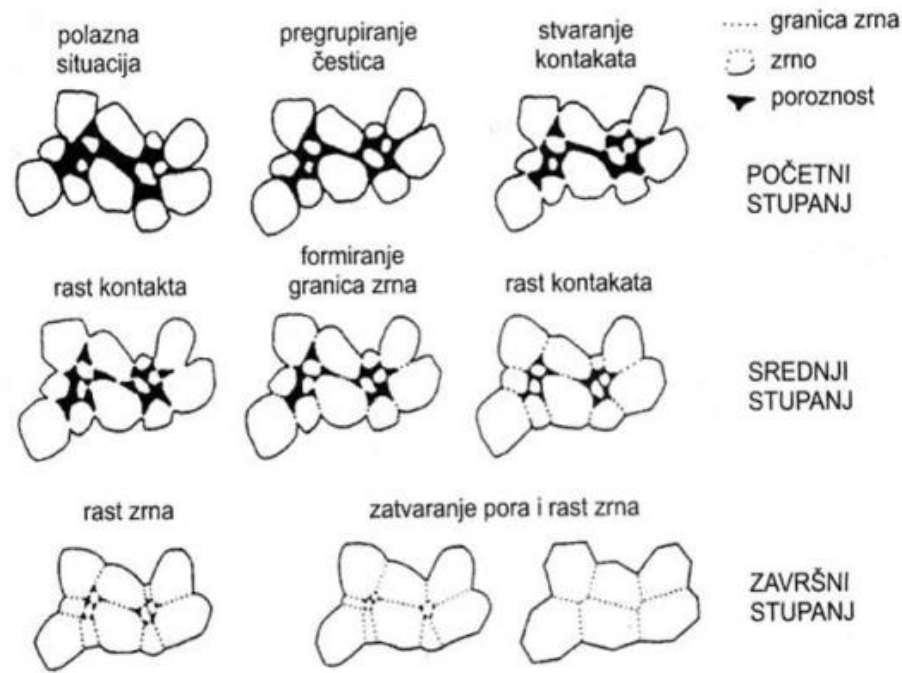
Oblikovanjem se postiže zgušnjavanje mase čime se dobiva dovoljna čvrstoća i oblik koji omogućuje dalju obradu. Pri postupcima oblikovanja važno je da se dobiju sirovci koji imaju jednaku gustoću i teksturu po cijelom presjeku. Izbor postupka oblikovanja zavisi od geometrije i veličine proizvoda, kao i o zahtjevima koji se pred njega postavljaju. Postupci oblikovanja keramike mogu se podijeliti u nekoliko osnovnih skupina prema udjelu vode:

- prešanje (mokro i vlažno) – ugušćivanje oblikovane mase praha (granula), vlažnost 0-15 %
- plastično oblikovanje (ekstrudiranje i injekcijsko prešanje), vlažnost 15-25%
- lijevanje (suspenzijsko lijevanje, zračno lijevanje i lijevanje folija),  
vlažnost > 25%

Nakon postupka oblikovanja kao što su lijevanje, plastično oblikovanje i prešanje proizvedeni sirovci (zeleni izradci), osim smjese keramičkog praha i aditiva, u pravilu sadrže vlagu, pomoćna sredstva za plastificiranje i vezanje, kao i druge pomoćne tvari. Svi sastojci koji bi mogli izgorijeti pri visokim temperaturama moraju se ukloniti iz sirovca prije sinteriranja. Budući da je oblikovana masa vlažna, prvi postupak je uklanjanje vlage sušenjem. Što je veći sadržaj vlage u sirovcu skupljanje će biti veće no to ovisi i o vrsti sirovine, veličini zrna i postupka oblikovanja. Neki keramički materijali prije sinteriranja se podvrgavaju procesu prožarivanja (predpečenja). Prožarivanje se obavlja uz malu brzinu skupljanja čime se povećava čvrstoća.

Sinteriranje je najvažnija faza koja predstavlja spajanje čestica praha u čvrsto stanje pri visokim temperaturama od 1050 °C do 2200 °C. Sinteriranje se definira kao proces spontanog zgušnjavanja poroznog tijela pri visokim temperaturama pri kojima se smanjuje poroznost isprešanog praha uz

istovremeno skupljanje odpresaka i povećanje njegove mehaničke čvrstoće tijekom zagrijavanja  
 Sl. 3.7.



Sl. 3.7. Sinteriranje [21].

Sinteriranje se može odvijati uz ili bez pojave tekuće faze. Ukoliko se sinteriranje odvija bez pojave tekuće faze onda se ono naziva sinteriranje u krutoj fazi, a ukoliko se prilikom sinteriranja pojavi tekuća faza onda se ono naziva sinteriranje u tekućoj fazi.

Kao primjer, može poslužiti postupak proizvodnje ferita zagrijavanjem smjese željezovog ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) i cinkovog oksida ( $\text{ZnO}$ ) da bi se dobilo feritnu keramiku  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ . Kada se dobije ferit, ohlađeni proizvod melje se u čestice veličine manje od  $2 \mu\text{m}$ , tj. dovoljno male da se svaka čestica sastoji od jedinične magnetske domene. Nakon toga se preša u željeni oblik, suši i ponovno sinterira. Ako se želi dobiti preferiranu orijentaciju čestica, moguće je prešanje provesti u magnetskom polju. Odgovarajućim izborom i usklađivanjem veličine čestica i posuđa moguće je tijekom sinteriranja izbjeći sljepljivanje čestica i posude, te površinska oštećenja i kontaminaciju kako peći, tako i pečene keramike.

#### 4. NEKI PRIMJERI PRIMJENE FUNKCIONALNE KERAMIKE U ELEKTROTEHNICI

Keramički elektromaterijali imaju vrlo široku primjenu u elektrotehnici. Primjeri proizvoda napravljenih od keramičkih elektromaterijala su prikazani na Sl. 4.1. Značaj i uloga suvremene funkcionalne keramike u elektrotehnici, a naročito u mikroelektronici je u tome što većina elektroničkih uređaja danas nije zamisliva bez keramičkih materijala u izradi elektroničkih komponenata. Suvremena keramika u elektronici omogućava minijaturizaciju.



Sl. 4.1. Proizvodi od keramički elektromaterijali [22].

Funkcionalna keramika koju se koristi u elektrotehnici ima veliki električni otpor i nije podložna oštećenjima pri visokim temperaturama. Zbog toga keramika ima široku primjenu u izradi keramičkih otpornika bez kojih niti jedan elektronički sklop ne bi bio moguć.

Keramički otpornici imaju veliku primjenu kod visokonaponskih sklopova. U proizvodnji tih elemenata koristi se aluminij-oksida keramika, npr. za izradu izolatora u elektroindustriji, za izolatore svjećica kod sustava paljenja motora itd. Suvremenu keramiku se koristi u prijenosu i distribuciji električne energije kao i u izradi minijturnih integriranih elektroničkih sklopova. Osnovni primjeri primjene keramike u elektrotehnici su poluvodički elementi, kondenzatori, integrirani krugovi, izolatori, pretvarači, piezoelektrični senzori, i optički senzori.

Kod materijala visoke tehnologije, sirovine (silicijev oksid, magnezijev oksid, aluminijski oksid, barijev nitrid, silicijev karbid, itd. ) moraju biti kemijski vrlo čiste, pa ih se često proizvodi u pogonima izoliranim od vanjskih utjecaja. Budući da mikrostruktura keramike ima odlučujuću ulogu u kvaliteti proizvoda, posebnu se pozornost mora posvetiti svakom pojedinom koraku u procesu proizvodnje. Također se strogo mora paziti na strukturu granice zrna. Npr. razdvajanje nečistoća na granicama zrna može štetno utjecati na keramičke poluvodiče i supravodiče. S druge strane, ispravan rad keramičkih kondenzatora i varistora ovisi upravo o barijerama na granicama zrna.

#### **4.1. Keramički izolatori, poluvodiči i supravodiči**

Dielektrični materijali su prema električnim svojstvima izolacijski materijali i imaju široku primjenu. Dielektrični materijali, osim za električnu izolaciju, upotrebljavaju se i kao materijali za optički prijenos signala (optička vlakna i kabeli), podloga za izradu matičnih ploča i integriranih sklopova, u nanotehnologiji, itd. Uz to, mnogi piezoelektrični materijali imaju i dielektrična svojstva.

Izolatori u elektrotehnici su materijali koji ne vode električnu struju, a upotrebljavaju se za izoliranje električnih vodiča, odnosno pojedinih dijelova električnih vodova i uređaja, međusobno ili od tla. Mogućnost primjene izolacijskih materijala u elektrotehnici zavisi od njihovih električnih i mehaničkih svojstava, među kojima su najvažnija električna otpornost, površinska električna otpornost, dielektričnost, faktor dielektričnih gubitaka i dielektrična čvrstoća, mehanička čvrstoća, otpornost na djelovanje ulja i vlage. U elektrotehnici kao izolacijski materijali služe različite anorganske i organske tvari, a među anorganske izolacijske materijale ubrajaju se i keramički materijali. Jedna od najvažnijih prednosti keramičkih materijala, kao izolatora, je njihova sposobnost za rad pri visokoj temperaturi.

Keramički električni izolatori imaju dugi vijek trajanja i otporni su na vanjske utjecaje. Osim toga, keramičke materijale se može oblikovati u različite složene oblike, koji su potrebni za učinkovitu izolaciju i zbog toga se primjenjuju u mnogim područjima. Najčešći keramički materijali koje se

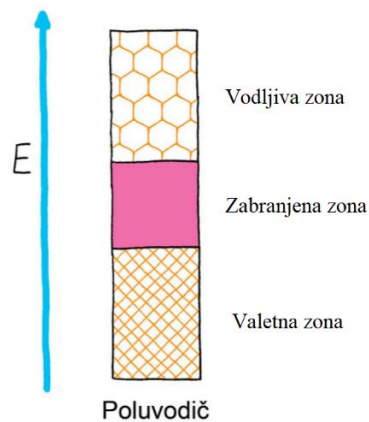


upotrebljava za izolacijske dijelove u elektrotehnici su porculan, steatit, vatrostalna keramika, aluminijev oksid, aluminijev nitrid i drugi. Izgled porculanskih izolatora prikazan je na Sl. 4.2.



**Sl. 4.2.** Porculanski izolatori [23].

Bez poluvodiča svijet bi danas izgledao sasvim drugačije, od svakodnevnog života od industrijske proizvodnje. Bez poluvodiča ne bi bilo stolnih računala ni mobitela, mikrovalnih pećnica, digitalnih satova, suvremenih frižidera, perilica posuđa i rublja, elektronički vođenih strojeva niti robotiziranih industrijskih pogona.



**Sl. 4.3.** Poluvodič

Najčešće korišteni poluvodički materijali su silicij, germanij, spojevi galija, spojevi indija itd. Za razliku od izolatora koji imaju energijski procjep preširok da bi dovoljan broj termičkih elektrona prešao iz valentne u vodljivu zonu, poluvodiči imaju energijski procjep dovoljno mali tako da na sobnoj temperaturi termički elektroni mogu prelaziti iz valentne u vodljivu zonu.

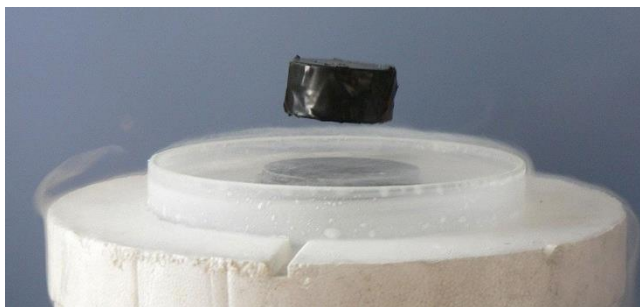
Većina poluvodičke keramike nalazi se među oksidima prijelaznih metala, npr. cinkov oksid (ZnO), cinkov sulfid (ZnS), kadmijev telurid (CdTe) i sulfid (CdS), olovni sulfid (PbS), galijev arsenid (GaAs) itd.

Keramički poluvodiči imaju široku primjenu kao otpornici, zaštitnici od prenapona, termistori, senzori kisika i u konstrukciji integriranih krugova. Varistori su uređaji kod kojih otpor naglo pada na određenom pragu napona. To znači da kada napon preko uređaja dostigne prag, dolazi do naglog pada električnog otpora od nekoliko megaoma na nekoliko stotina oma. Nakon što napon kroz uređaj padne ispod praga, otpor varistora se sam vraća na početnu veliku vrijednost. Zbog ovog svojstva varistori imaju široku primjenu u zaštiti električnih uređaja od udara napona. Npr. varistori zbog svoje izdržljivosti, jeftinog održavanja i brzog odgovora, primijenjeni u električnim podstanicama predstavljaju idealnu zaštitu od prenapona izazvanog munjama.

Druga važna karakteristika keramičkih poluvodiča je da im je otpor promjenjiv i jako ovisan o temperaturi, više nego li kod standardnih otpornika, što omogućava široku primjenu termistora kao temperaturnih senzora kod grijaćih elemenata i kao štitnika od udarne struje.

Neke keramike pokazuju svojstva supravodljivosti, tj. one gube svaki električni otpor kod vlastite kritične temperature. Dok je kod klasičnih metalnih supravodiča ta kritična temperatura u blizini apsolutne nule, obično ispod 20 K, kritična temperatura keramičkih supravodiča je mnogo viša, iznad 30 K. Keramički supravodiči sadrže lantan, itrij ili neki drugi element rijetkih zemalja, ili bizmut, ili talij, a obično barij ili stroncij te bakar i kisik, a mogu biti i drugi elementi, sve dok kritična temperatura ostaje dovoljno visoka. Primjer supravodiča s visokom kritičnom temperaturom od 134 K je  $\text{Hg}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ . Jedno od važnih svojstava keramičkih supravodiča je da zadržavaju supravodljivost čak i uz ekstremno jaka magnetska polja. Primjena supravodiča je vrlo raširena u suvremenoj elektrotehnici najčešće u obliku tankih filmova, uključujući

konstrukciju dijelova za računala kao npr. logičkih uređaja, memorijskih elemenata, prekidača itd. Keramičke supravodiče se također koristi u oscilatorima, pojačalima, akceleratorima čestica, visokoosjetljivim uređajima za mjerenje magnetskog polja, napona ili jakosti struje, magnetima za medicinske dijagnostičke uređaje, magnetskim sustavima za pohranu energije, levitirajućim vlakovima, motorima, generatorima, transformatorima, kabelima i drugim strukturama za prijenos električne energije itd. [24]. Visokotemperaturni supravodič  $YBa_2Cu_3O_{7-k}$  je prikazan na Sl. 4.4.



**Sl. 4.4.** Visokotemperaturni supravodič [25].

## 4.2. Keramički ionski vodiči

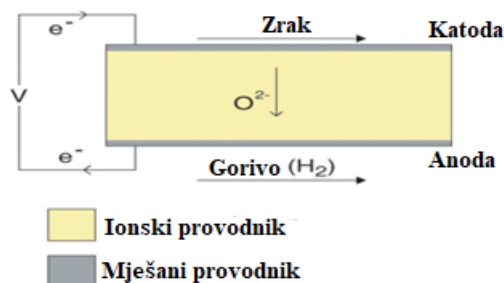
Keramički ionski vodiči su materijali koji pokazuju svojstvo ionske provodnosti i koriste se za baterije, gorivne ćelije, generatore kisika u sustavima za održavanje života (npr. u svemirskoj stanici), služe kao katalizatori u proizvodnji kemikalija, kao senzori za otkrivanje plina, kao keramičke tankoslojne membrane, kao visokotemperaturni elektrokemijski senzori kisika za omjer zrak/gorivo kod motora s unutarnjim sagorijevanjem itd.

Ionska provodnost se sastoji u prelaženju iona s jednog mjesta na drugo u kristalnoj rešetki uz pomoć točkastih grešaka nazvanih šupljine (vakancije). Na sobnoj temperaturi kristal je u relativno niskom energijskom stanju, šupljine su slabo pokretljive, pa se događa vrlo malo ionskih prijelaza. Na višim temperaturama, međutim, šupljine postaju pokretljive i neki keramički materijali pokazuju značajnu ionsku provodnost. Na višim temperaturama ionska provodnost ovakvih kristalnih spojeva usporediva je s provodnošću otopina na sobnoj temperaturi. Na ionsku provodnost utječe koncentracija točkastih defekata. Oksidi kao što su itrijumom stabilizirani cirkonijev dioksid, cerijev i bizmutov oksid dopiran rijetkim zemljama i dopirani lantanijev galat,

predstavljaju materijale s visokom provodnošću kisikovog iona. Kod cirkonijevog dioksida dopandi imaju dvojak uлогу: stabiliziraju visokotemperaturnu kubičnu fazu i generiraju šupljine za prihvat kisikovih iona.

Kao primjer optimizacije gorivne ćelije s kristalnim oksidom može se pokazati primjenom lantanijevog galata ( $\text{LaGaO}_3$ ) dopiranog stroncijem i magnezijem. S ovakvim elektrolitom se reducira radna temperatura ćelije što produžava životni vijek ćelije i smanjuje cijenu koštanja cijelog sustava.

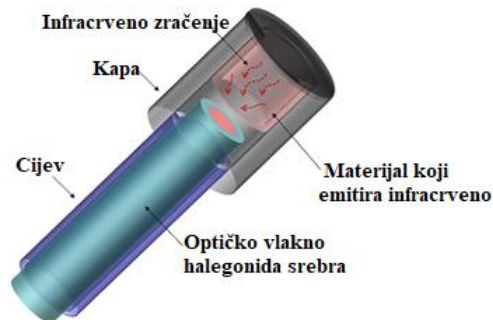
Primjer gorivne ćelije SOFC (solid oxide fuel cell), prikazan je na Sl. 4.5.



Sl. 4.5. Shematski prikaz gorivne ćelije [26].

### 4.3. Optička keramika

Pod pojmom optičke keramike podrazumijeva se keramičke proizvode čija se optička svojstva mogu koristiti za elektroničke i električne namjene. Optičke keramike emitiraju svjetlost kada su pogođene  $\alpha$ - ili  $\beta$ -česticama ili visokoenergijskim fotonima (npr. rentgenskim i  $\gamma$ -zrakama.) U izradi elektroničkih komponenata s optičkim svojstvima koriste se materijali kao što su litijev niobat ( $\text{LiNbO}_3$ ) i litijum tantalat ( $\text{LiTaO}_3$ ). Polikristalni materijali uključuju olovni cirkonat tantalat poznat kao PLZT. Optička keramika je osnova za konstruiranje različitih optičkih uređaja, uključujući prekidače, modulatore i demodule za velike optičke komunikacijske uređaje. Osim toga, optičke keramičke tanke folije mogu biti integrirane sa silicijskim poluvodičima u optoelektroničkim integriranim krugovima (OEICs). Na Sl. 4.6. prikazan je senzor zračenja izrađen od optičke keramike.



**Sl. 4.6.** Senzor zračenja [27].

Optička keramika je providan ili poluprovodan polikristalni feroelektrični materijal. Kao primjer može poslužiti sustav čvrste otopine olovnog cirkonata titanata ( $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ). Pokazalo se da su najkorisniji optički materijali iz ovog sustava modificirani lantanom ( $(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ). Optički efekti ovih keramika korišteni su u brojnim uređajima koji uključuju filtere spektra zračenja, polarizacijske prekidače, uređaje za holografsko memoriranje i memoriranje slika i informacija, te različite tipove zaslona.

Optički materijali omogućuju preciznu kontrolu svjetlosti pomoću električnih signala, što znači da ih se koristi kao optičke prekidače i optičke modulatore, odnosno svjetlosne ventile. To svojstvo dozvoljava veliki napredak u optičkim tehnologijama kao što su laserski sustavi i optičke telekomunikacije. Većina monokristala koji pokazuju optička svojstva imaju ograničenja s obzirom na mikrostrukturni homogeni raspored dopanada. Poboljšanje predstavlja sustav barijevog titanata ( $\text{BaTiO}_3$ ) dopiran cirkonijem i kalcijem, što se pokazalo superiornim prema litijevom niobatu i kvalitetnom feroelektričnom olovnom cirkonat tantalatu, što se tiče elektrooptičkih svojstava ali i odsustva olova u korištenom materijalu [28].

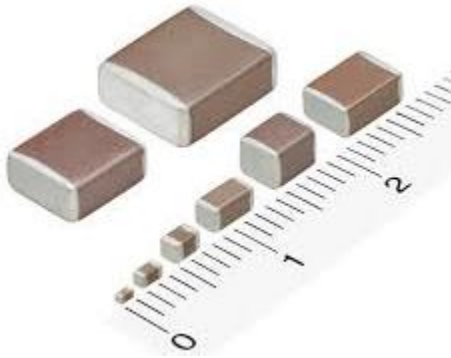
#### **4.4. Keramički dielektrični materijali**

Elektrokeramičke materijale koji imaju nisku dielektričku konstantu stavlja se u podloge za integrirane krugove, a elektrokeramike s visokom dielektričnom konstantom koristi se u kondenzatorima.

Kondenzator je komponenta koja u elektrotehnici služi kao spremnik statičkog elektriciteta i energije električnog polja koje nastaje u prostoru između dva električki vodljiva tijela zbog razdvajanja električnog naboja. U međuprostoru nalazi se dielektrik. Fizikalna veličina kojom se opisuje sposobnost pohranjivanja naboja, a time i energije električnog polja, naziva se električni kapacitet i izražava se u faradima (F). S obzirom da je kapacitet od 1 farada vrlo velik, kondenzatori koje susrećemo u praksi imaju mnogo manje kapacitete, reda veličine 1 pF – 10 mF. Keramički kondenzator je kondenzator fiksne vrijednosti u kome se kao dielektrik nalazi keramički materijal.

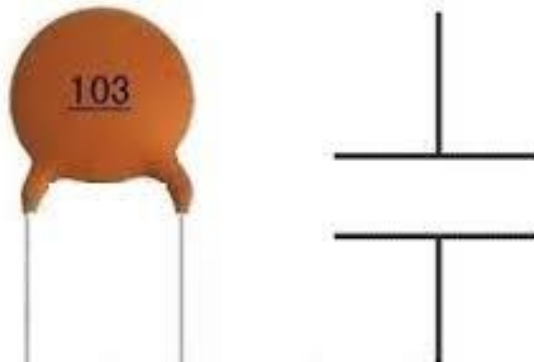
Razvojem poluvodičke keramike konstruirani su keramički višeslojni čip kondenzatori (MLCC) koji su najviše korišteni kondenzatori u elektroničkim uređajima. Ti se kondenzatori sastoje od većeg broja individualnih kondenzatora paralelno povezanih. Početni materijal za izradu čipova MLCC-a je smjesa finih granula veličine 10 nm feroelektričnih materijala modificirana odabranim aditivima. Obradjeni materijal se sinterira na temperaturi 1200 do 1450 °C pa se dobiva konačna uglavnom kristalinična struktura. Željena dielektrička svojstva može se kreirati tijekom sinteriranja. Potom se metaliziraju površine na oba kraja. Kapacitancija MLCC čipa ovisi o dielektriku, veličini i nazivnom naponu, a maksimalna vrijednost ovisi o proizvodnom procesu. Kapacitancija keramičkih kondenzatora se može mijenjati s temperaturom, frekvencijom i primijenjenim naponom, što također ovisi o postupku pripreme keramičkog materijala. Na Sl. 4.7. je prikazan MLCC kondenzator.

Keramički jednoslojni kondenzator po svojoj konstrukciji sličan je višeslojnim keramičkim kondenzatorima, ali ima samo jedan sloj keramičkog dielektrika između krajnjih metalnih slojeva. Jednoslojni kondenzatori nisu polarizirani pa se mogu priključiti kako na pozitivni, tako i na negativni napon. Uz jednaku kapacitanciju, jednoslojni kondenzator je veći od MLCC-a, pa zbog toga nije povoljan za primjenu u minijaturnim sklopovima. Međutim, budući da jednoslojni kondenzator ima veću količinu keramičkog materijala u jednom sloju, dok MLCC ima mnogo tankih slojeva keramike, jednoslojni kondenzator je mehanički otporniji pa se često koristi u robotici.



**Sl. 4.7.** MLCC kondenzator [29].

Keramički disk kondenzatori imaju kapacitivnu vrijednost od 10 pF do 100 mF sa širokim spektrom napona, između 16 V i 15 kV i više. Na Sl. 4.8. je prikazan keramički jednoslojni disk kondenzator.



**Sl. 4.8.** Keramički jednoslojni disk kondenzator [30].

Energetski keramički kondenzatori (Sl. 4.9.) mogu biti kondenzatori velike snage ili kondenzatori velike nazivne vrijednosti napona. Njihova je primjena u elektroenergetskim sustavima, odašiljačima i električnim instalacijama. Standardizacija keramičkih kondenzatora manje snage usmjerena je na električne i mehaničke parametre kao komponente za uporabu u elektroničkoj opremi. Suprotno tome, standardizacija energetskog kondenzatora usmjerena je na zaštitu osoblja i opreme koju daje lokalno regulatorno tijelo. Kako je moderna elektronička oprema stekla sposobnost rukovanja razinama energije koje su prije bile isključiva domena komponenata

"električne energije", razlika između "elektroničke" i "električne" nazivne vrijednosti snage postala je manje izražena.



Sl. 4.9. Prikaz primjene keramike u proizvodnji energetskog kondenzatora [31].

#### 4.5 Piezoelektrični pretvarači i senzori

Piezoelektrični efekt (*grč. piezo - gurati*) je pojava stvaranja električnih naboja na površini nekih čvrstih tvari pod utjecajem mehaničke deformacije, tj. vanjske, mehaničke sile, te se može koristiti za mjerenje tlaka. Takve čvrste tvari se nazivaju piezoelektričnim tvarima ili piezoelektricima. Piezoelektrični učinak otkrila su 1880. godine dva francuska fizičara, braća Pierre i Paul-Jacques Curie, u kristalima kvarca, turmalina i Rochelleove soli (natrij-kalijev tartarat). Naziv za piezoelektricitet predložen je 1881. godine (Hankel) kada je postavljena i pretpostavka o postojanju suprotnog efekta, mehaničke deformacije kristala ako mu se na suprotne krajeve dovede razlika električnog potencijala. Ovo je obrnuti (invertni) piezoelektrični efekt, kojega je otkrio Gabriel Lippmann 1881. godine.

Zbog ovog svojstva se kaže da je piezoelektrični efekt invertni. To znači da materijali koji pokazuju izravan piezoelektrični efekt (stvaranje struje kada se primjenjuje naprezanje) također pokazuju obrnuti piezoelektrični efekt (stvaranje naprezanja kada se primjenjuje električno polje). Padne li ultrazvučni signal na piezoelektrični kristal, zbog tlaka vala i piezoelektričnog efekta između ploha kristala pojavljuje se izmjenični napon, koji se elektroničkim uređajima može



pojačati. Na taj način takav uređaj može služiti kao detektor ultrazvuka. Na Sl.4.10. je prikazan piezoelektrični ultrazvučni keramički pretvarač.



**Sl. 4.10.** Piezoelektrični ultrazvučni keramički pretvarač [32].

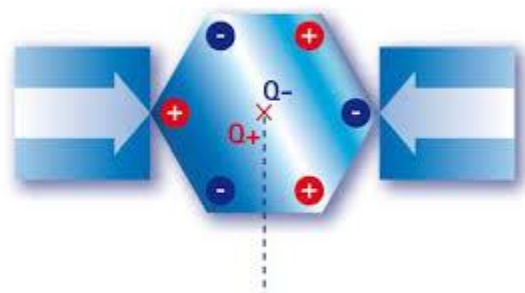
Od značajnijih pretvarača izdvajaju se keramički ultrazvučni pretvarači koji su izrađeni od keramičkih diskova. Pretvarači se koriste kod aparata za ultrazvučno zavarivanje, kod ultrazvučnih strojeva za čišćenje, ultrazvučnih strojeva za rezanje, itd. Oni imaju dobar otpor, mogu se koristiti u širokom rasponu temperature, imaju dugi vijek trajanja i visoke su pouzdanosti.

Piezoelektrične materijale može se koristiti kao pretvarače između mehaničke i električne energije. Na primjer, podmornice se otkriva pomoću ultrazvučnih valova, pri čemu se kao rezultat protoka materijal skuplja i ponovo širi, što se može pretvoriti u električni puls. Najvažnije vrste piezokeramike su: kvarc ( $\text{SiO}_2$ ) s HCP rešetkom, barijev titanat i olovni cirkonat – titanat, Rochelleova sol, amonij dihidrogen-fosfat, kalij dihidrogen-fosfat i etilendiamin-tartarat. Zajednička značajka svih tih kristala je da nemaju centra simetrije. Piezokeramika razvijena je za četiri glavne primjene :

- Stvaranje napona
- Elektromehaničko aktiviranje
- Regulaciju frekvencije
- Generiranje i detektiranje akustične i ultrazvučne energije

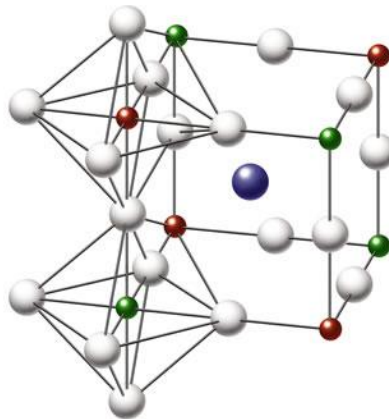
Piezoelektrični efekt je vrlo koristan u mnogim primjenama koje uključuju proizvodnju i detekciju zvuka, generiranje visokih napona, generiranje frekvencija i ultra finog fokusiranja optičkih sklopova. Piezoelektrični efekt (Sl. 4.11.) također ima primjenu i u svakodnevnom životu kao što je upaljač za cigarete, upaljač za plinski štednjak i sl.

Korištenje piezoelektričnosti je rašireno i u automobilskoj industriji (npr. zračni jastuci), računarskoj tehnologiji, zdravstvenoj diagnostici (npr. sonograf) itd.



Sl. 4.11. Piezoelektrični efekt [33].

Piezokeramičke komponente imaju polikristalnu strukturu koja sadrži brojne kristalite (domene) od kojih se svaki sastoji od mnoštva motiva prikazanih na Sl. 4.12. Motiv ove feroelektrične keramike pokazuje kristalnu strukturu perovskita, koja se generalno može opisati strukturnom formulom  $X^{2+}Y^{4+}O^{2-}_3$  gdje može biti  $X = \text{Pb, Ba, Na, Mn, Ce, Sr}$  i  $Y = \text{Zr, Ti, Fe, Nb, La}$ .



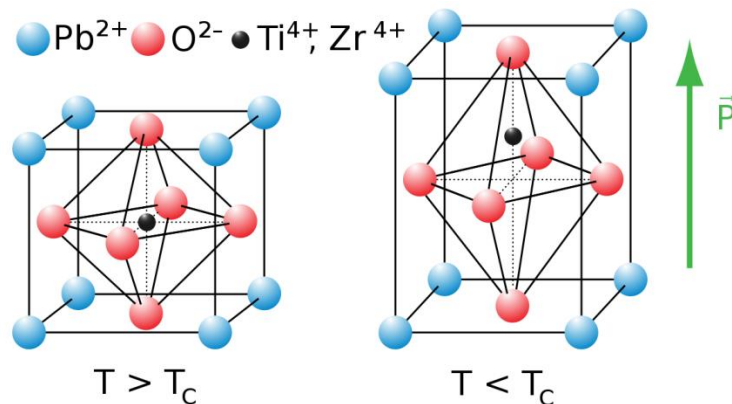
Sl. 4.12. Molekulska struktura piezokeramičke komponente [34].

Jedna od češće korištenih piezoelektričnih keramika je olovni cirkon titanid (PZT). To je čvrsta otopina  $\text{PbZrO}_3$  ( $T_c = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ ) i  $\text{PbTiO}_3$  ( $T_c = 490 \text{ }^\circ\text{C}$ ), prije svega sa sastavom  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}, \text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  ( $T_c = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Specifična svojstva ove keramike ovise o omjeru olovnog cirkonata i olovnog titanata kao i o udjelu dodatnih elemenata. To znači da je moguće proizvesti više modifikacija materijala s različitim specifikacijama [35].

Ovu keramiku prerađuje se u polikristalnom obliku tlačnim lijevanjem i lijevanjem folija. PZT materijali pokazuju veću osjetljivost i imaju višu radnu temperaturu.

PZT se koristi u širokom rasponu primjena. Meki PZT keramički prah se obično koristi kada je važna visoka osjetljivost na punjenje, kao što je kod senzora protoka ili razine, npr. na količinu goriva u spremniku. Primjenjuje se kod ultrazvučnog ispitivanja ili za točne preglede automobilskih, strukturnih ili zrakoplovnih proizvoda.

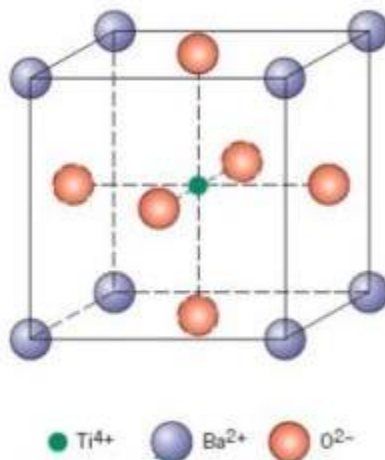
Karakteristike materijala uključuju visoku dielektričnu konstantu, visoku osjetljivost na punjenje, visoku gustoću s finom zrnatom strukturom i čisti frekventni odziv bez šuma. Tvrdi PZT keramički prah se koristi kada je potrebna velika snaga, uključujući primjene kao što su generiranje ultrazvučne ili visokonaponske energije u ultrazvučnim uređajima, sonarskim uređajima, itd. Druge primjene koriste piezo- i piroelektričnost ove keramike (piezoelektrični pretvarači u sensorima, mikrofona i aktuatorima, zvučnicima, piroelektričnim sensorima IR zračenja itd.). Molekulska struktura PZT piezokeramike je prikazana na Sl. 4.13.



Sl. 4.13. Molekulska struktura olovnog cirkontitanid (PZT) [36].

Druga važna piezoelektrična keramika je olovni lantij titanid (PLZT). Ova keramika posjeduje faznu čistoću, dielektrične, piezoelektrične i feroelektrične karakteristike. Mjerenja dielektričnih i piezoelektričnih svojstava pokazuju da PLZT keramika s malim količinama lantanovih iona, tj. 5PLZT, osigurava relativno visoke vrijednosti piezoelektričnog koeficijenta pri temperaturi sinteriranja od 1200 °C.

Kao piezoelektrični keramički materijal primjenjuje se također barijev titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ). Njegova struktura je prikazana na Sl. 4.14. Barijev titanat se primjenjuje za izradu senzora temperature u mjernoj i regulacijskoj tehnici kao i za izradu detektora graničnih vrijednosti (zaštita motora i strojeva). Vrlo je kemijski i mehanički stabilan materijal. Topljiv je u mnogim kiselinama, a netopljiv je u vodi i lužinama. U čistom obliku je električni izolator. Međutim, kada je ojačan s malim količinama metala, postaje poluvodič. Vrijednost njegove dielektrične konstante ovisi o čistoći, gustoći i veličini zrna, frekvenciji, temperaturi i dopiranju.



**Sl. 4.14.** Molekulska struktura barijevog titanata ( $\text{BaTiO}_3$ ) [37].

Olovni titanat ( $\text{PbTiO}_3$ ) također ima kubičnu strukturu perovskita i također je jedan od najvažnijih feroelektričnih i piezoelektričnih keramičkih materijala.

## 5. ZAKLJUČAK

Keramički materijali zauzimaju vrlo važno mjesto u povijesti ljudske civilizacije. Značajan razvitak se dogodio u drugoj polovici 19. stoljeća (keramički materijali za električnu izolaciju). 1950-ih godina keramika ulazi u mnoga tehnološki napredna područja a posljednjih godina nanotehnologija pridonosi razvoju funkcionalne keramike. Silikatna keramika je mnogo jeftinija od oksidne ili neoksidne keramike zbog velike dostupnosti jeftinih prirodnih sirovina. Oksidna keramika ima visoku točku taljenja, otpornost na trošenje i širok spektar električnih svojstava. Aluminijev oksid je jedna od najvažnijih industrijski iskorištenih keramika. Neoksidna keramika su materijali bazirani na spojevima bora, ugljika, dušika i silicija te imaju visoku temperaturnu otpornost. Većina keramičkih materijala su izvrsni električni i toplinski izolatori.

Značajan nedostatak jednostavne keramike je njezina krhkost, a razvojem kompozita, tj. spajanjem različitih materijala poboljšavaju se čvrstoća keramike. Drugi nedostaci keramike očituju se u niskoj otpornosti toplinskom šoku, niskoj vlačnoj čvrstoći, visokim troškovima sirovina i postupku oblikovanja.

Keramika pokazuje vrlo široki raspon električnih i magnetskih svojstava u usporedbi s drugim vrstama materijala. Keramički električni izolatori imaju dugi vijek trajanja i otporni su na vanjske utjecaje. Najčešći keramički materijali koje se upotrebljava za izolacijske dijelove u elektrotehnici su porculan, steatit, vatrostalna keramika, aluminijev oksid, aluminijev nitrid i drugi. Keramički poluvodiči imaju široku primjenu kao otpornici, zaštitnici od prenapona, termistori, senzori kisika i u konstrukciji integriranih krugova. Optička keramika je osnova za konstruiranje različitih optičkih uređaja, uključujući prekidače, modulatore i demodule za velike optičke komunikacijske uređaje

Jedan od mogućih razvoja keramike u elektrotehnici je da se koriste elektromagnetski valovi kako bi se izazvale promjene u keramici na strukturnoj razini. Ako se to uspije, potencijalno bi moglo postići jednaku kvalitetu rezultata kao i trenutne proizvodne metode uz djelić troškova energije. Budućnost suvremene električne keramike vjerojatna je u supervodičima za praktičniju upotrebu u vrhunskim računalima ili magnetno levitacijskim vlakovima. Zatim moguć je daljnji razvoj keramike u nanotehnologiji te složenim operativnim okruženjima s 5G infrastrukturom itd.

## LITERATURA

- [1] The American Ceramic Society - Brief history of ceramics and glass, URL: <https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/brief-history-of-ceramics-and-glass> (10-10-2020)
- [2] Sciencelearn – What are ceramics, URL: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1769-what-are-ceramics> (11-10-2020)
- [3] Sciencedirect – Structural ceramics, URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/structural-ceramics> (23-10-2020)
- [4] D. Slovenec, V. Bermanec, Sistematska mineralogija – mineralogija silikata, Denona, Zagreb, 203, str. 17
- [5] Thomasnet – Types of ceramics, URL: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/types-of-ceramics/> (08-11-2020)
- [6] Matmach – Zirconium dioxide, URL: <https://matmatch.com/learn/material/zirconium-dioxide-zirconia> (08-11-2020)
- [7] Sciencedirekt – Chemical engineering, Boron carbide, URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/boron-carbide> (08-11-2020)
- [8] Ceramtec – Ceramic materials, silicon nitride, URL: <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/silicon-nitride/> (10-11-2020)
- [9] M. Siberberg, Chemistry, The molecular nature of matter and change, WCB McGraw-Hill, Boston, 1996 (str. 324-369)
- [10] Azom – Engineering Ceramic Microstructures and Machining, URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5697> (08-12-2020)
- [11] William D. Calister, Jr. David G. Rethwisch; Materials Science and Engineering an introduction (Poglavlje 3, 79 str.)
- [12] M. Vrkljan, Mineralogija i petrologija, Osnove i primjena, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2001 (str.68)
- [13] Ispitivanje materijala – Savojsna čvrstoća keramike, URL: <https://www.ispitivanje.com/keramika/> (08-12-2020)
- [14] Keramverband – Breviary Tehcnical Ceramics – Strenght, URL: [https://www.keramverband.de/brevier\\_engl/5/3/3/5\\_3\\_3.htm](https://www.keramverband.de/brevier_engl/5/3/3/5_3_3.htm) (12-12-2020)

- [15] Keramverband - – Breviary Tehnical Ceramics – Hardness, URL:  
[https://www.keramverband.de/brevier\\_engl/5/3/5\\_3\\_5.htm](https://www.keramverband.de/brevier_engl/5/3/5_3_5.htm) (12-12-2020)
- [16] Clippercontrols – Dielectric constant values, URL:  
<https://www.clippercontrols.com/pages/Dielectric-Constant-Values.html#M> (14-12-2020)
- [17] Callister's Materials Science and Engineering, 10th Edition, Global Edition; William D. Callister Jr., David G. Rethwisch, 2019. (str 57-73)
- [18] Britannica – Ferrite, iron oxide compound, URL:  
<https://www.britannica.com/science/ferrite-iron-oxide-compound> (22-12-2020)
- [19] Magnetics – Ferrite cores, URL: <https://www.mag-inc.com/Products/Ferrite-Cores> (22-12-2020)
- [20] FSB –Bitni koraci u procesu proizvodnje, URL:  
[https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1429774002-0-kbd\\_2.dio.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1429774002-0-kbd_2.dio.pdf) , 19 str. (07-01-2021)
- [21] Keramverband - Sintering process, URL:  
[https://www.keramverband.de/brevier\\_engl/4/1/4\\_1\\_4.htm](https://www.keramverband.de/brevier_engl/4/1/4_1_4.htm) (07-01-2021)
- [22] Thomasnet - Morgan Advanced Ceramics to Showcase Alumina, Silicon Carbide, and Mullite Ceramic Components at ASM Heat Treating Society Conference & Exposition 2007, URL: <https://news.thomasnet.com/fullstory/morgan-advanced-ceramics-to-showcase-alumina-silicon-carbide-and-mullite-ceramic-components-at-asm-heat-treating-society-conference-and-exposition-2007-527867/> (28-01-2021)
- [23] Elektrotehnički materijali – prezentacija - Doc. Dr Milena Đukanović, URL:  
[https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog\\_41971/objava\\_55350/fajlovi/Uvodna%20prezentacija.pdf](https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_41971/objava_55350/fajlovi/Uvodna%20prezentacija.pdf)  
(01-02-2021)
- [24] Britannica – Higher temperature Superconductivity, URL:  
<https://www.britannica.com/science/superconductivity/Higher-temperature-superconductivity>  
(06-02-2021)
- [25] The Wire – Undre enormous pressure, a new superconductor star is born, URL:  
<https://thewire.in/the-sciences/under-enormous-pressure-a-new-superconductor-star-is-born>  
(06-02-2021)
- [26] Sciencedirect – Oxygen ion conductors, URL:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702103003328> (07-02-2021)
- [27] Semantic scholar - Development of a 2-Channel Embedded Infrared Fiber-Optic Temperature Sensor Using Silver Halide Optical Fibers, URL:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-a-2-Channel-Embedded-Infrared-Sensor-Yoo-Jang/4937ca33923f217da2fb788efa9807578b684028> (08-02-2021)

[28] UC Riverside University of California – Processing and Properties of High Performance Lead Free Electro-Optic Ceramics, URL: <https://escholarship.org/uc/item/4mk449zj> (09-02-2021)

[29] TDK – Multilayer ceramic chip capacitors, URL: [https://www.tdk.com/corp/en/news\\_center/press/201404241179.htm](https://www.tdk.com/corp/en/news_center/press/201404241179.htm) (10-02-2021)

[30] Watelectrical – What is Ceramic Capacitor: Construction & Its Working, URL: <https://www.watelectrical.com/what-is-ceramic-capacitor-construction-its-working/> (10-02-2021)

[31] Passive components – Power Capacitor, URL: <https://passive-components.eu/power-capacitor-markets-expect-slow-and-steady-market-growth-in-2020/> (11-02-2021)

[32] Piezoelektrični keramički ultrazvučni pretvarač, URL: <http://ba.ultrasonicmachiningtool.com/ultrasonic-welding-transducer-tinna/six-ceramics-ultrasonic-transducer-for.html> (12-02-2021)

[33] Senzori i pretvarači, URL: <http://docplayer.rs/195162627-Senzori-rastojanja-na-bazi-ultrazvuka-senzori-i-pretvarači.html> (14-02-2021)

[34] Ceramtec – Piezo-ceramics, basics, URL: <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/> (15-02-2021)

[35] Moulson, A. J. ; Herbert, J. M. Electroceramics. Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2003. URL: <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/generators.html> (15-02-2021)

[36] Wikipedia – Lead Zirconate Titanate, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lead\\_zirconate\\_titanate](https://en.wikipedia.org/wiki/Lead_zirconate_titanate) (15-02-2021)

[37] Smartway2 - BaTiO<sub>3</sub>, URL: <https://smartway2study.blogspot.com/2016/03/> (16-02-2021)



## **Popis slika**

Sl. 3.1. Vrste veza u atomu

Sl. 3.2. Mikrostruktura keramike [10].

Sl. 3.3. Molekulska struktura keramike [11].

Sl. 3.4. Usporedba čvrstoće metala i keramike [14].

Sl. 3.5. Dijagram tvrdoće [15].

Sl. 3.6. Proces proizvodnje keramike [20].

Sl. 3.7. Sinteriranje [21].

Sl. 4.1. Proizvodi od keramički elektromaterijali [22].

Sl. 4.2. Porculanski izolatori [23].

Sl. 4.3. Poluvodič

Sl. 4.4. Visokotemperaturni supravodič [25].

Sl. 4.5. Shematski prikaz gorivne ćelije [26].

Sl. 4.6. Senzor zračenja [27].

Sl. 4.7. MLCC kondenzator [29].

Sl. 4.8. Keramički jednoslojni disk kondenzator [30].

Sl. 4.9. Prikaz primjene keramike u proizvodnji energetskog kondenzatora [31].

Sl. 4.10. Piezoelektrični ultrazvučni keramički pretvarač [32].

Sl. 4.11. Piezoelektrični efekt [33].

Sl. 4.12. Molekulska struktura piezokeramičke komponente [34].

Sl. 4.13. Molekulska struktura olovnog cirkontitanid (PZT) [36].

Sl. 4.14. Molekulska struktura barijevog titanata ( $\text{BaTiO}_3$ ) [37].

## **Popis tablica**

Tab. 3.1. Vrijednosti relativne dielektrične konstante [16].

Tab. 3.2. Vrijednost električne provodnosti [17].

## SAŽETAK

Tema diplomskog rada je primjena funkcionalne keramike u elektrotehnici. U uvodu su opisani sami početci pojave keramike pa sve do današnje tehnologije. Drugo poglavlje bazirano je na podjelu keramike.

U trećem poglavlju se govori o strukturi keramičkih materijala te o vrstama veze među atomima, zatim o fizikalnim svojstvima keramike, te o postupcima proizvodnje keramičkih materijala.

U četvrtom poglavlju objašnjena je primjena funkcionalne keramike u elektrotehnici na pet primjera. U prvom primjeru objašnjeni su keramički izolatori, poluvodiči i supravodiči. U drugom primjeru objašnjeno je što su to keramički ionski vodiči. U trećem primjeru stavljen je naglasak na optičku keramiku, te njezinu primjenu u elektrotehnici. U četvrtom primjeru opisani su keramički dielektrični materijali koji se koristi za izradu i proizvodnju različitih tipova kondenzatora. U zadnjem primjeru objašnjen je piezoelektrični efekt, zbog čega je vrlo koristan, gdje se koriste piezoelektrični materijali, najvažnije vrste piezokeramike te piezokeramičke strukture i komponente.

*Ključne riječi:* keramika; funkcionalna keramika; svojstva; izolator; optička keramika; piezoelektrik; dielektrik

## ABSTRACT

The topic of the thesis is the application of functional ceramics in electrical engineering. The introduction describes the very beginnings of the appearance of ceramics all the way to today's technology. The second chapter is based on the division of ceramics. The third chapter discusses the structure of ceramic materials and the types of bond among the atoms, the physical properties of ceramic as well as production methods of ceramic materials.

The fourth chapter represents a review of application of functional ceramics in electrical engineering through five examples. Ceramic insulators, semiconductors and superconductors are clarified in the first example. Ceramic ionic conductors are described in the second example. An emphasis on electro-optical ceramics and the electro-optical materials is given in the third example. The fourth example characterizes ceramic dielectric materials and various types of capacitors made of. The last example of functional ceramics defines the piezoelectric effect and piezoelectric materials as well as piezo-ceramic components used in electrical engineering.

**Keywords:** ceramics; functional ceramics; properties; insulators; optical ceramics; piezoelectric; dielectric

## **ŽIVOTOPIS**

Ivan Baboselac, rođen je 29. studenog 1987. u Vinkovcima. Osnovnu školu završio je u Gradištu. Tehničku školu završio u Županji 2005. godine a 2006. godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku. 2010. godine stekao je naziv inženjera elektrotehnike-elektroenergetike. Doc.dr.sc. Željko Hederić bio je mentor završnog rada pod nazivom „Modeliranje i izrada indukcijskih magnetometara za laboratorij iz osnova elektrotehnike“. Veliki je ljubitelj meteorologije, jedan je od administratora popularne web stranice crometeo.hr. Radio je na Osječkoj televiziji kao snimatelj. Fotograf je za portal osijek031.com. Trenutno radi u “DHMZ”-u kao motritelj i u sustavu obrane od tuče protugradnim raketama. Aktivan sportaš u tzv. “Street workout-u”.