

# RAZVOJ I PRIMJENA KERAMIKE U ELEKTROTEHNICI

---

Župan, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

*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:200:298760>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**RAZVOJ I PRIMJENA KERAMIKE U  
ELEKTROTEHNICI**

**Završni rad**

**Lucija Župan**

**Osijek, 2019.**

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| <b>1. UVOD</b> .....  | 1  |
| <b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....                     | 1  |
| <b>2. PREGLED I SVOJSTVA KERAMIČKIH MATERIJALA</b> .....    | 2  |
| <b>2.1. Vrste keramike</b> .....                            | 2  |
| <b>2.2. Svojstva keramičkih materijala</b> .....            | 5  |
| <b>3. KERAMIČKI MATERIJALI U ELEKTROTEHNICI</b> .....       | 11 |
| <b>3.1. Elektrokeramika</b> .....                           | 11 |
| <b>3.2. Magnetna keramka</b> .....                          | 19 |
| <b>3.3. Ionski vodljiva keramika</b> .....                  | 21 |
| <b>3.4. Poluvodička keramika</b> .....                      | 22 |
| <b>4. PRIMJERI PRIMJENE KERAMIKE U ELEKTROTEHNICI</b> ..... | 24 |
| <b>4.1. Keramički kondenzator</b> .....                     | 24 |
| <b>4.2. Keramički PTC termistori</b> .....                  | 28 |
| <b>4.3. SOFC</b> .....                                      | 32 |
| <b>4.4. Piezoelektrični generatori</b> .....                | 34 |
| <b>5. ZAKLJUČAK</b> .....                                   | 37 |
| <b>LITERATURA</b> .....                                     | 38 |
| <b>SAŽETAK</b> .....  | 40 |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                       | 40 |

## **1. UVOD**

Keramički materijal jedan je od najstarijih poznatih materijala. Iako često neprimjetna, keramika se uvukla u mnoga područja čovjekova života. Najstariji poznati keramički artefakt datira 2800 godina prije Krista, kasni Paleolitik.

Tijekom Neolitika keramika se počinje koristiti u obliku posuda za vodu i hranu i za umjetničke predmete. Izumom kotača 3500 godina prije Krista uvode se nove tehnike oblikovanja keramičkih predmeta. Tijekom Srednjeg vijeka trgovina putem svile omogućila je širenje porculana prvo u islamske zemlje, a kasnije i u Europu. Od tada je keramička industrija prešla veliku transformaciju. Ne samo da su predmeti od tradicionalne keramike postali sveprisutni, nego su se tijekom godina razvili novi proizvodi koji iskorištavaju jedinstvene svojstva keramike, kao što su toplinska i električna vodljivost, kemijska otpornost i visoka temperatura taljenja. Od 1850. godine uvedeni su prvi porculanski električni izolatori koji su započeli eru tehničke keramike.

Nakon Drugog svjetskog rata keramika je doprinjela razvoju mnogih tehnološki naprednih područja, uključujući elektroniku, optoelektorniku, medicinu, energetiku, automobilsku industriju i istraživanje svemira. Osim toga, inovacije u tehnikama obrade keramike omogućile su stvaranje materijala s prilagođenim svojstvima koja zadovoljavaju zahtjeve

Elektrokeramika je napredni keramički materijal koji se koristi u širokom spektru električnih, optičkih i magnetskih primjena. Prvom upotrebom keramike u elektroindustriji iskoristila se njena velika električna otpornost. Međutim, kasnije je postalo očito da je mogući raspon svojstava izuzetno širok [1].

### **1.1. Zadatak završnog rada**

Općenito prikazati pregled i svojstva keramičkih materijala. Opisati njihovu primjenu te na četiri primjera detaljnije prikazati njihovu ulogu u elektrotehnici.

## **2. PREGLED I SVOJSTVA KERAMIČKIH MATERIJALA**

Keramički materijal se može definirati kao anorganski materijal, sastavljen od metala i nemetala. Keramika može biti kristalna ili djelomično kristalna. Nastaje djelovanjem topline i naknadnim hlađenjem [2].

### **2.1. Vrste keramike**

Podjela keramike prema namjeni:

- Keramika izrađena od tradicionalne gline
- Cigle, pločice, zemljane keramičke cijevi
- Gruboizrnatni vatrostalni materijali
- Cement i beton
- Staklo i stakleni emajli
- Tehnička keramika

Podjela keramike prema kemijskom sastavu:

- Oksidna
- Neoksidna
- Silikatna

Funkcionalna podjela elektrotehničke keramike:

- Elektrokemika (piezoelektrici, dielektrici, feroelektrici i piroelektrici)
- Magnetna keramika
- Ionski vodljiva keramika
- Poluvodička keramika

#### **2.1.1. Oksidna keramika**

Oksidnom keramikom se smatraju anorganski spojevi metalnih (npr. Al, Zr, Ti, Mg) ili metaloidnih (Si) elemenata s kisikom. Oksidi se mogu kombinirati s dušikom ili ugljikom kako bi se dobila složenija oksinitridna ili oksikarbidna keramika [3].

Oksidna keramika ima visoku temperaturu tališta, malu otpornost na trošenje i širok raspon električnih svojstava. Većina keramičkih oksida su električni izolatori čija je elektronička

vodljivost vrlo slaba (jedina iznimka su supravodiči), ali čija ionska vodljivost može biti značajna (na primjer, cirkonij). Često se nalazi u električnoj i elektroničkoj industriji, a često i kao strukturalna keramika, tj. za neelektrične primjene. Aluminijski oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) je najistaknutiji osnovni spoj „tehničke keramike“ (slika 2.1.).



**Sl.2.1.** Prikaz proizvoda od oksidne keramike- $\text{Al}_2\text{O}_3$

Silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) je također jedan od osnovnih spojeva, kako za keramičare tako i za proizvođače stakla. Magnezijev oksid ( $\text{MgO}$ ) i magnezijev aluminat ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) primarno se koriste kao vatrostalni materijal u industriji željeza i čelika. Cirkonijev dioksid ( $\text{ZrO}_2$ ) koristi se u keramičkim bojama, ali i za ionsku vodljivost, u mehaničke svrhe ili u nakitu. Uranijev oksid ( $\text{UO}_2$ ) je osnovni sastojak nuklearnog goriva. Barijev titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) je dielektrik ili poluvodič, on je osnovni materijal u industriji keramičkih kondenzatora.

Gotovo svi metalni oksidi se koriste u keramici, primjerice itrijev oksid ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) berijev oksid ( $\text{BeO}$ ), cinkov oksid ( $\text{ZnO}$ ), kositrov oksid ( $\text{SnO}_2$ ), supravodljivi kuprati kao  $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  i drugi.

### **2.1.2. Neoksidna keramika**

Neoksidna keramika je ona koja ne sadrži kisik u svojoj kristalnoj strukturi. Izraz neoksidna se općenito odnosi na karbide, nitrade ili oksinitride. Ova keramika pokazuje niz izvrsnih svojstava, uključujući tvrdoću, otpornost na koroziju i toplinu, vlačnu čvrstoću itd. U proizvodnji neoksidne keramike toplinska obrada je bitan korak u ukupnom procesu nastajanja. Određuje kvalitetu proizvoda, ali i povećava troškove proizvodnje [3].

Karbidi čine glavnu skupinu neoksida, od kojih je najvažniji silicijev karbid ( $\text{SiC}$ ) koji je poluvodič i volframov karbid ( $\text{WC}$ ). Volframov karbid je glavni industrijski materijal u klasi neoksidne keramike.

Nitridi prvenstveno uključuju silicijev nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) i oksinitrid aluminijski i silicija, nitrid  $\text{AlN}$  i razne metalne nitride kao što su  $\text{TiN}$  (slika 2.2).



*Sl.2.2. Prikaz proizvoda od neoksidne keramike-  $\text{Si}_3\text{N}_4$*

Neki boridi imaju industrijsku primjenu, na primjer titanijev diborid ( $\text{TiB}_2$ ) ili lantanov heksaborid ( $\text{LaB}_6$ ). Još neki od bitnih spojeva s borom su borov karbid ( $\text{B}_4\text{C}$ ) i borov nitrid ( $\text{BN}$ ).

Dok su oksidi uglavnom električni izolatori, neoksidi jednako uključuju izolatore (na primjer,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i  $\text{AlN}$ ), poluvodiče ( $\text{SiC}$ ) i vodiče (metalni karbidi, boridi i ugljikovi proizvodi koji nisu dijamant, od kojih je grafit najvažniji).

### **2.1.3. Silikatna keramika**

Silikatna keramika je najčešće aluminijski-silikatni materijal dobiven iz prirodnih sirovina. Ona pokazuje niz temeljnih svojstava kao što su kemijska inertnost, toplinska stabilnost i mehanička čvrstoća. Često se koristi u građevinskim proizvodima (sanitarni proizvodi, podne i zidne pločice, cigle) i domaćinskim predmetima (posuđe, ukrasni predmeti) [3].

Često su to složeni materijali čija upotrebna svojstva ovise jednako o njihovoj mikrostrukturi kao i o sastavu. Silikatna keramika je mnogo jeftinija od oksidne ili neoksidne keramike zbog relativno niskih temperatura sinteriranja dok druge zahtjevaju skupi sintetski prah i visoke temperature sinteriranja.

Za razlikovanje silikata od tehničke keramike korisno je klasificirati te proizvode kao tradicionalnu keramiku. To su proizvodi od terakote, zemljane posude, porculan i staklasti porculan. Tehnički porculan, pod kojim se podrazumijeva materijal iz skupine „alkalijski aluminijski silikatni porculan“, pronalazi primjenu u elektronici.

Steatit je keramički materijal na bazi prirodnih sirovi i sastoji se uglavnom od talka i magnezijevih silikata, uz dodatak gline i barijevog karbonata.

Kordijeritni materijal i drugi na njemu temeljeni jesu magnezijevi aluminosilikati proizvedeni sinteriranjem talka s dodatkom gline, kaolina, šamota i korunda. Pojednostavljena aproksimacija sastava čistih kordijerita iznosi cca. 14 % MgO, 35 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 51 % SiO<sub>2</sub>. Primjenu nalaze u toplinskom inženjstvu.

Variranjem kemijskog i mineraloškog sastava sustava Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> mogu se postići specifične modifikacije svojstava mulitne keramike. Čisti mulit (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2SiO<sub>2</sub>) sastoji se od 82,7% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mase i 17,3% SiO<sub>2</sub>.

## 2.2. Svojstva keramičkih materijala

Keramika može izdržati visoke temperature, dobar je toplinski izolator i ne povećava uvelike svoj volumen pri zagrijavanju. To keramiku čini izvrsnom toplinskom barijerom za primjene koje se kreću od oblaganja industrijskih peći do prekrivanja svemirskih letjelica kako bi ih se zaštitile od visokih temperatura ulaska u atmosferu.

Keramika je jaka, tvrda i izdrživa. To ju čini prikladnim konstrukcijskim materijalom. Jedina značajna mana je njezina krhkost, ali ovaj problem se rješava razvojem materijala kao što su kompoziti.

Keramika varira u električnim svojstvima od izvrsnih izolatora do supravodiča.

Najvažnije opće svojstvo keramike je njezina otpornost: to su grubi materijali koji će se nositi s velikim količinama vanjskog utjecaja u najobičnijim i izvanrednim situacijama [4].

Kada bi uočili svojstva keramike, možemo reći da keramika ima:

- Visoku temperaturu taljenja (otpornost na toplinu)
- Malu gustoću u usporedbi s drugim metalima
- Umjerenu čvrstoću
- Visoku električnu otpornost
- Visoku tvrdoću i snagu
- Značajnu izdržljivost (dugotrajnost)
- Malu žilavost
- Nisku električnu i toplinsku vodljivost (dobri izolatori)
- Veliku otpornost na koroziju
- Kemijsku inertnost (ne reagiraju s drugim kemijskim elementima)

Većina keramičkih materijala su također nemagnetski materijali, iako feriti (keramika bazirana na željezu) stvaraju izvrsne magnete (zbog željeza).



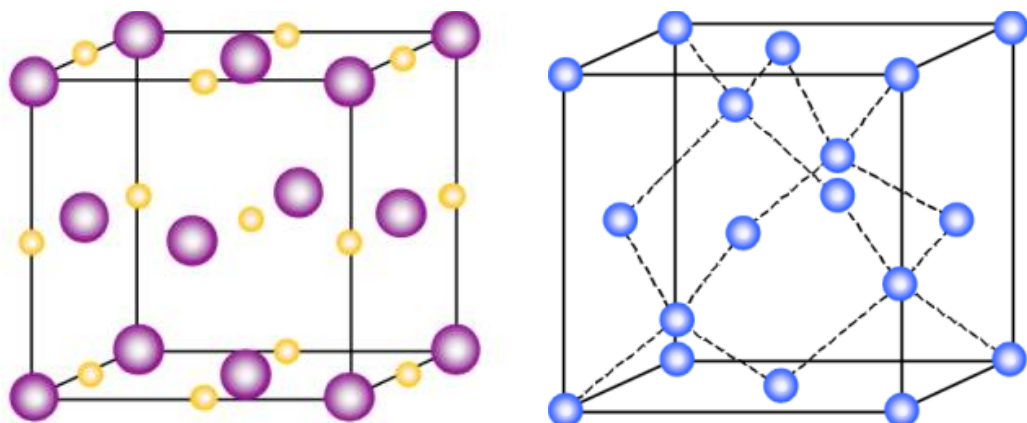
Gledajući na tradicionalnije tipove keramike kao što su staklo ili porculan, može se primjetiti kontradiktornost s gore navedenim svojstvima. Ti materijali mogu biti krhki i lomljivi, razbit će se ili slomiti, također brzo mijenjaju temperaturu.

### 2.2.1. Struktura i atomsko vezivanje keramike

Pojavljaju se dva tipa kemijskog keramičkih materijala, ionska i kovalentna veza. Često ta dva načina vezivanja koegzistiraju u istom keramičkom materijalu. Svaka vrsta veze 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 velike temperature taljenja jer su im veze jake i neusmjerene. Ionska veza se nalazi u mnogim keramičkim strukturama kao što su MgO i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

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 susjeda stvara kemijsku vezu dijeljenjem para elektrona. Obično je to veza između nemetala i gdje postoje male razlike u elektronegativnosti. Kovalentno vezivanje je usmjereno i kao rezultat toga u mnogim kovalentno vezanim keramikama raspoređeni su simetrično. Nalazi se u mnogim keramičkim strukturama kao što su SiC i BN [2].



Sl.2.3. Usporedba atomske strukture ionske (a) i kovalentne (b) veze [2]

**Tab. 2.1.** Usporedba utjecaja udjela kovalentne i ionske veze na temperaturu taljenja nekoliko keramičkih spojeva

| Keramički spoj    | Temperatura taljenja (°C) | Udio kovalentne veze (%) | Udio ionske veze (%) |
|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| Magnezijev oksid  | 2798                      | 27%                      | 73%                  |
| Aluminijev oksid  | 2050                      | 37%                      | 63%                  |
| Silicijev dioksid | 1715                      | 49%                      | 51%                  |
| Silicijev nitrid  | 1900                      | 70%                      | 30%                  |
| Silicijev carbid  | 2500                      | 89%                      | 11%                  |

Mnogi keramički materijali sadrže i ionsku i kovalentnu vezu. Ukupna svojstva ovih materijala ovise o dominantnoj vezi. Spojevi koji su uglavnom ionske ili uglavnom kovalentne veze imaju više temperature taljenja od spojeva u kojima ni jedna vrsta veze ne prevladava (tablica 2.1.).

### 2.2.2. Fizikalna svojstva

Fizikalna svojstva su određena kristalnom strukturom i kemijskim sastavom. Općenito, fizikalna svojstva su određena jednostavnim svojstvima kao što su boja, miris i fizički oblik materijala (krutina, tekućina, plin). Ostala fizikalna svojstva keramike jesu:

- Volumen
- Gustoća
- Temperatura taljenja
- Vrelište
- Indeks refleksije
- Prozirnost

Ovo su vrlo bitna svojstva keramičkih materijala.

Gustoća keramike je između polimera i metala. Kristalni materijali imaju visoku gustoću za razliku od nekristalnih materijala. Općenito, keramičke čestice mogu biti fine i grube. Gore navedena svojstva su određena veličinom čestica materijala. Fine čestice se nalaze u određenoj keramici te se u takvoj keramici nalazi manje praznog prostora. Stoga je i gustoća veća, isto tako je i refleksija bolja. Kod grubih čestica je obrnuto. U takvim materijalima postoji više praznog prostora tako da

će gustoća tada biti manja. Prozirnost je manja u keramici koja sadrži fine čestice u usporedbi s onom koja sadrži grube [4].

### **2.2.3. Mehanička svojstva**

Mehanička svojstva opisuju čvrstoću materijala. To je važno za građevinske materijale. Keramika je općenito krhka ili duktilna. Ako primijenimo opterećenje, materijal će se promijeniti svoj oblik. Prestankom djelovanja sila materijal se ili vraća u prvobitni oblik (elastična deformacija), ili ostaje u deformiranom obliku (neelastična). Iznad toga se lomi. U duktilnom materijalu, kada se primjenjuje opterećenje, materijal se vraća u prvobitni oblik [4].

Neka mehanička svojstva keramike su:

- Vlačna čvrstoća
- Žilavost
- Elastičnost ili plastičnost
- Rastezljivost
- Tvrdoća

### **2.2.4. Kemijska svojstva**

Kao što je već spomenuto, keramika se veže ionskom ili kovalentnom vezom. U osnovi, ove veze rezultiraju dobrom kemijskom otpornošću, ali imaju nisku toplinsku ekspanziju, visoku temperaturu taljenja i tvrdoću. Keramika je općenito:

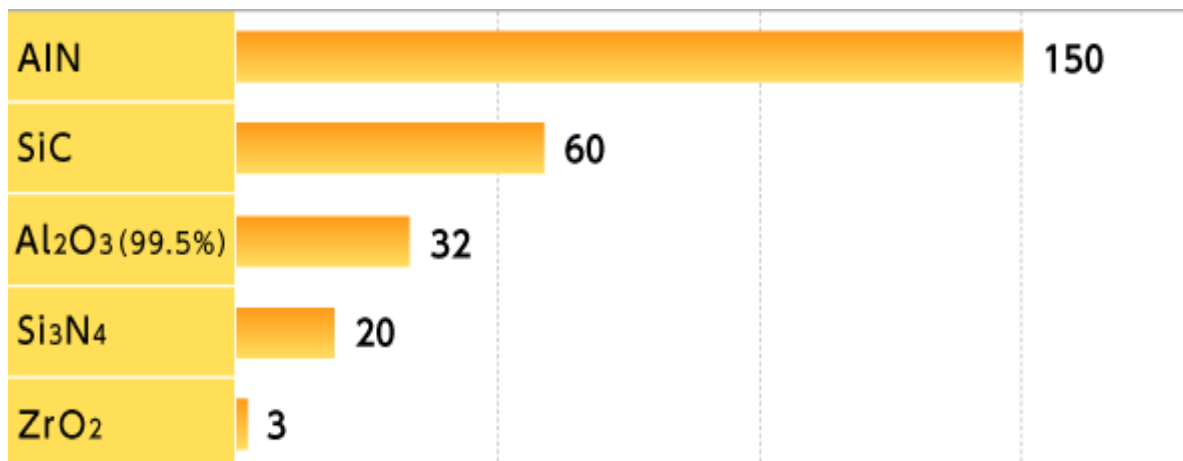
- Otporna na kiseline
- Otporna na koroziju
- Otporna na lužine

Ako je podvrgnuti materijal kemijski topljiv, tada se koristi u ograničenom rasponu primjena. Kemikalije mogu nagrizati materijale, čak je i voda korozivna za mnoge metale. Kako bi se provjerilo je li materijal kemijski otporan ili ne, materijal treba utopiti u kemikaliju (npr. klorovodična kiselina, fluorovodična, sumporna ili dušična kiselina). Materijal otporan na kemikalije nebi trebao korodirati ili se topiti u njima. Kako bi se povećala otpornost na kemikalije u keramici, treba dodati silikat [4].

### 2.2.5. Toplinska svojstva

Pri zagrijavanju keramika se širi, što je općenito poznato kao toplinsko širenje. Toplinsko širenje nastaje zbog provođenja topline. Iz toga znamo da keramika provodi toplinu, ali i da podnosi visoke temperature. Glavna toplinska svojstva keramike su:

- Izolacijska svojstva
- Poluvodička svojstva
- Toplinska vodljivost
- Toplinsko širenje
- Otpornost na toplinski udar



SI.2.3. Toplinska vodljivost (W/mK) nekih materijala pri sobnoj temperaturi [4]

Toplinska vodljivost varira zbog određenih faktora. Ti faktori su unutarnja prozirnost, granice zrna i nečistoće. Kontroliranjem ovih faktora možemo povećati ili smanjiti toplinsku vodljivost. Vodljivost je posljedica kretanja elektrona, ako su granice zrna i prozirnost manje, onda će vodljivost biti visoka [4].

### 2.2.6. Električna svojstva

Keramika je u pravilu loš vodič električne energije. Fina keramika i porculan su izolatori koji ne provode električnu energiju. Poluvodička keramika se može razviti za provođenje električne energije ovisne o primijenjenom naponu i njezinoj temperaturi. Neki keramički materijali su dobri vodiči električne energije. U keramici, ionske veze čvrsto vežu molekule, stoga ne dopuštaju protok elektrona. Ako postoji protok slobodnih elektrona, materijal može provoditi struju [4].

Neka bitna električna svojstva keramičkih materijala su:

- Dielektrična čvrstoća
- Električna vodljivost
- Izolacijska svojstva
- Poluvodička svojstva
- Supravodljiva svojstva
- Dielektrična konstanta

### 3. KERAMIČKI MATERIJALI U ELEKTROTEHNICI

Pojam elektrokemike se odnosi na vrstu keramičkih materijala koji se koriste u raznim električnim, optičkim i magnetskim primjenama. Svojstva elektrokemike, kao i mnogih drugih materijala, ovise o sastavu i mikrostrukturi. Ono što je također od velikog interesa je da svojstva mnogih elektrokemičkih materijala mogu biti „podešena“ ili promijenjena utjecajem vanjskog poticaja kao što je temperatura, okolina, tlak, itd. Zbog toga se mnogi elektrokemički materijali smatraju aktivnima ili materijalima koji se mogu kontrolirati. Elektrokemika je također korisna za pasivne uređaje kao i za primjenu u senzorima i aktuatorima. Svojstva elektrokemika koja bi bila važna u različitim primjenama su [5]:

- otpornost ( $\rho$ ) ili vodljivost ( $\sigma$ )
- dielektrična konstanta ( $k$ )
- dielektrični gubici ( $\tan\delta$ )
- ovisnost temperature i frekvencije o dielektričnoj konstanti
- piezoelektrični, piroelektrični i elektrooptički koeficijent
- promjena vodljivosti/otpornosti kao funkcija okolne atmosfere ili kemikalija absorbiranih na površini
- dielektrična probojna čvrstoća

Elektrokemika se koristi za pripremu vodiča, induktora, otpornika, kondenzatora, mikrovalnih dielektričnih rezonatora, piezoelektričnih pretvarača i drugih uređaja. Za uređaje izrađene od elektrokemičkih materijala, važno je dosljedno i ekonomično postići neka od gore navedenih svojstava.

#### 3.1. Elektrokemika

##### 3.1.1. Piezoelektrici

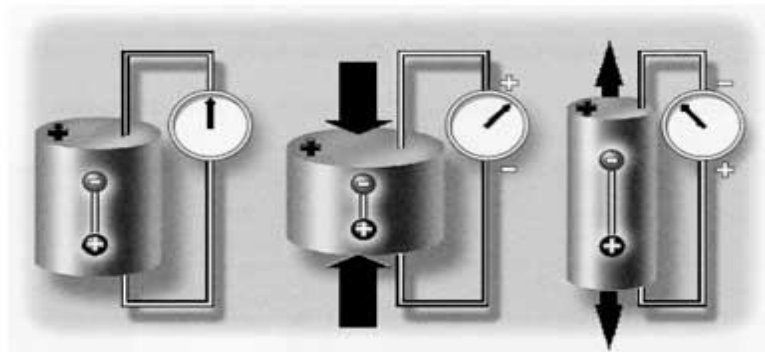
Određeni materijali na svojoj površini proizvode električni naboj kao posljedicu mehaničkog naprezanja. Inducirani naboj je proporcionalan mehaničkom naprezanju. Piezoelektrični učinak otkrila su 1880. godine dva francuska fizičara, braća Pierre i Paul-Jacques Curie, u kristalima kvarca, turmalina i Rochelleove soli (natrij-kalijev tartarat). Uzeli su ime „piezein“ iz grčkog, što znači „pritisnuti“ [6].

Piezokeramika razvijena je za četiri glavne primjene:

- 1.) Stvaranje napona
- 2.) Elektromehaničko aktiviranje (aktuaciju)
- 3.) Regulaciju frekvencije
- 4.) Generiranje i detektiranje akustične i ultrazvučne energije

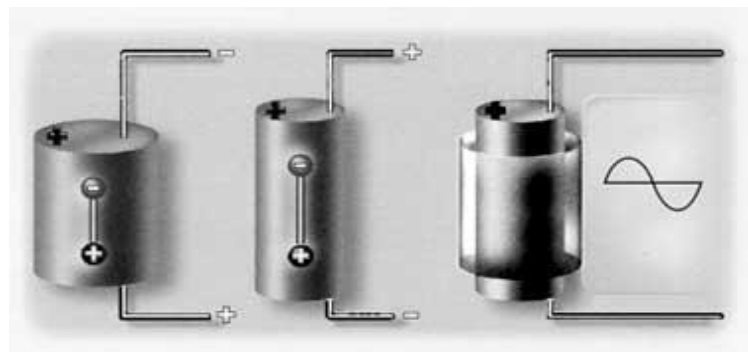
### 3.1.1.1. Piezoelektrični efekt

Kao što je već navedeno, piezoelektrični efekt je sposobnost određenih materijala da generiraju električni naboj kao odgovor na primijenjivanje mehaničkog stlačivanja ili rastezanja. Polaritet električnog naboja ovisi o smjeru vanjske sile kao što je prikazano na slici 3.1.



Sl. 3.1. Piezoelektrični efekt

Jedna od jedinstvenih karakteristika piezoelektričnog efekta je to da je inverzan. 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). Na slici 3.2. vidimo da dimenzije uzorka variraju s promjenom napona.



Sl.3.2. Inverzni piezoelektrični efekt

Kada se piezoelektrični materijal stavi pod mehanički pritisak, dolazi do pomicanja centra pozitivnog i negativnog naboja u materijalu, što rezultira vanjskim električnim poljem. Kada je obrnuto, vanjsko električno polje ili rasteže ili komprimira piezoelektrični materijal.

Piezoelektrični efekt je vrlo koristan u mnogim primjenama koje uključuju proizvodnju i detekciju zvuka, generiranja visokih napona, generiranja frekvencija i ultra finog fokusiranja optičkih sklopova. Piezoelektrični efekt također ima svoju primjenu i u svakodnevnom životu kao što je djelovanje kao izvor paljenja upaljača za cigarete [5].

### **3.1.1.2. PZT**

PZT, olovni cirkonat-titanat, jedan je od najčešće korištenih piezoelektričnih keramičkih materijala. Piezo keramika je preferiran izbor jer je čvrsta, kemijski inertna i relativno jeftina za proizvodnju. Osim toga, može se lako prilagoditi zahtjevima određene namjene. PZT keramika je cijenjena jer ima još veću osjetljivost i veću radnu temperaturu od ostale piezo keramike.

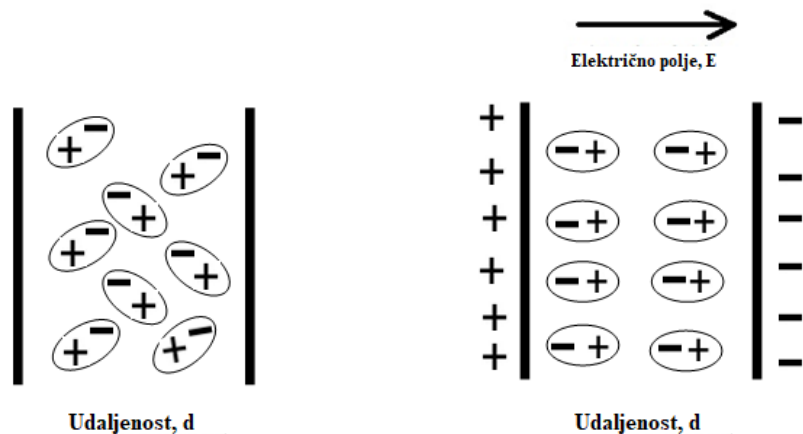
PZT materijali i piezoelektrični materijali općenito pokazuju jedinstveni raspon svojstava. U usporedbi s prethodno otkrivenim piezoelektričnim materijalima na bazi metalnog oksida kao što su barijev titanat, PZT materijali pokazuju veću osjetljivost i imaju višu radnu temperaturu.

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. Primjenjuje se kod ultrazvučnog ispitivanja ili za točne preglede automobilskih, strukturnih ili zrakoplovnih proizvoda. Karakteristike materija uključuju visoku dielektričnu konstantu, visoku osjetljivost na punjenje, visoku gustoću s finom zrnatom strukturom i čisti frekventni odziv bez buke. 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 [5].

### **3.1.2. Dielektrici**

Dielektrični materijal je električni izolator koji se polarizira jedino primjenom električnog polja (slika 3.3.). Primjer dielektrika je postavljanje keramičkog materijala između metalnih ploča kondenzatora. Izraz dielektrik koristi se za označavanje kapaciteta skladištenja energije. Ako napon na dielektričnom materijalu postane prevelik ili ako elektrostatičko polje postane prejako, materijal će iznenada početi provoditi struju.





**Sl.3.3.** *Polarne molekule u dielektriku bez električnog polja i polarne molekule u dielektriku s primjenom električnog polja*

Proučavanje dielektričnih svojstava odnosi se na skladištenje i disipaciju električne i magnetske energije u materijalima. Dielektrici su važni za objašnjavanje različitih pojava u elektrotehnici, optici i fizici.

**3.1.2.1. Dielektrični keramički materijali**

Neki dielektrični keramički materijali su:

- Aluminijev oksid
- Aluminijev nitrid
- Aluminijev silikat
- Barijev tantalat
- Barijev titanat (BT)
- Kalcijev titanat
- Kalcij magnezij titanat (CMT)
- Magnezijev silikat
- Olovni magnezij niobat (PMN)
- Olovni cinkov niobat (PZN)
- Litij niobat (LN)
- Magnezijev titanat
- Cirkonij

Cinkov niobat je poznat kao korisni mikrovalni dielektrični materijal dok je  $(\text{Mg}, \text{Ca})\text{TiO}_3$  vrlo koristan dielektrični materijal za visokofrekventne antene

Barijev stroncij titanat (BST) je od posebnog interesa za mikrovalne uređaje koji se mogu podesiti jer ima visoku dielektričnu konstantu.

### 3.1.2.2. Parametri dielektrične keramika

- Dielektrična čvrstoća
- Relativna dielektrična permitivnost
- Dielektrični gubitak
- Električni otpor
- Radna frekvencija

Dielektrična čvrstoća je polje maksimalnog napona koje keramika ili materijal može izdržati prije nego što dođe do električnog proboja. Kada je dielektrik podvrgnut sve većem električnom polju, u nekom trenutku u njemu dolazi do kratkog spoja. Dielektrični proboj se definira kao gradijent napona ili električno polje dovoljno da uzrokuje kratki spoj. Ovaj fenomen ovisi o mnogim faktorima, kao što su debljina uzorka, temperatura, sastav i oblik elektrode te prozirnost. U keramici postoje dvije osnovne vrste proboja:

- Unutrašnji: u ovom mehanizmu elektroni u vodljivom pojasu ubrzavaju do te mjere da počinju ionizirati ione. Kako se ionizira sve više iona i povećava broj slobodnih elektrona, stvara se lavinski efekt. Što je više električno polje primjenjeno, brže će elektroni ubrzati i vjerojatnije je da će doći do proboja.
- Toplinski: kriterij je da brzina stvaranja topline u dielektriku mora biti veća od brzine uklanjanja topline iz uzorka. Kad god se to dogodi, dielektrik će se zagrijati, što će opet povećati njegovu vodljivost, što uzrokuje daljnje zagrijavanje, itd. To se naziva toplinski proboj [7].

**Tab.3.1.** Dielektrična čvrstoća keramičkih i nekih plastičnih materijala

| Vrsta materijala                          | Dielektrična čvrstoća (kV/cm) |
|---|-------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (keramika) | 82                            |
| MgO-SiO <sub>2</sub> (keramika)           | 9.1                           |
| Najlon (plastika)                         | 214                           |
| PET-P (plastika)                          | 150                           |
| Acetal (plastika)                         | 148                           |
| Lexan (plastika)                          | 336                           |

Relativna dielektrična permitivnost je propusnost materijala u odnosu na propusnost vakuuma ili slobodnog prostora. Mala dielektrična permitivnost materijala znači da materijal ima nisku sposobnost polarizacije i zadržavanja naboja. Visoko dielektrični materijal dobar je u zadržavanju naboja, stoga je preferirani dielektrik za elektronske kondenzatore.

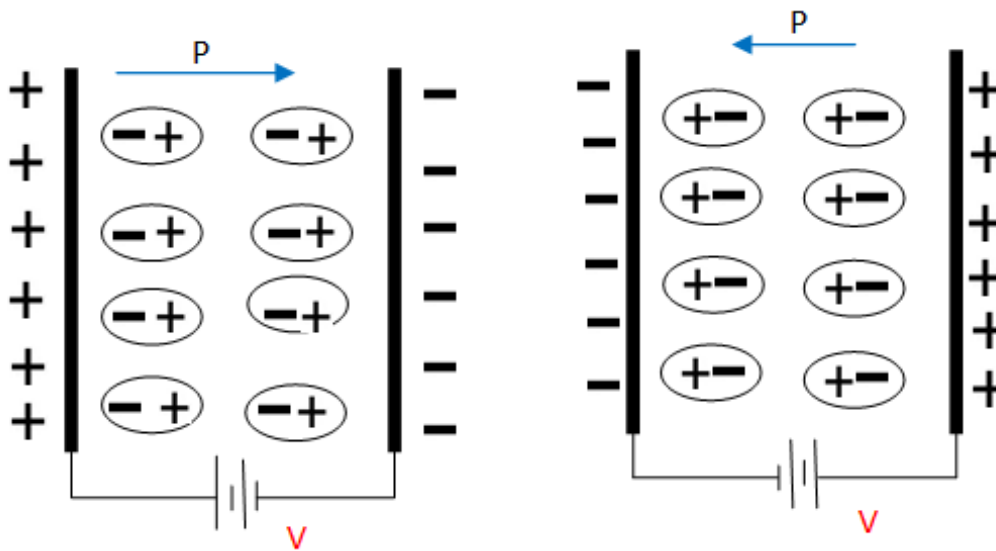
Dielektrični gubitak materijala označava kvantitativno rasipanje električne energije zbog različitih fizičkih svojstava kao što su električna vodljivost, dielektrična relaksacija i dielektrična rezonancija. Podrijetlo dielektričnih gubitaka može se smatrati povezanim s kašnjenjem između električnog polja i vektora električnog pomaka [6].

### 3.1.3. Feroelektrici

Feroelektricitet je pojava kod kojeg dolazi do spontane električne polarizacije materijala. Obrnuta električna polarizacija je moguća primjenom električnog polja (slika 3.4.). Feroelektričnost je dobila naziv zbog analogije s feromagnetizmom koji se pojavljuje u materijalima kao što je željezo.

Feroelektricitet je otkriven 1920. godine kada je kalijev natrijev tartarat (Rochelleova sol) prvi put pokazao svojstva iznenadne električne polarizacije. Od tog otkrića su osmišljene različite primjene za feroelektrične elemente. Danas se materijali koji pokazuju ovo svojstvo nazivaju feroelektrični materijali i uobičajno se koriste u elektronici. Iznenadujuće, niti feroelektričnost, niti feroelektrični materijali nemaju nikakve veze sa željezom (feritom).

Električna svojstva feroelektrika u mnogim su aspektima slična magnetskim svojstvima feromagneta. Danas je poznato nekoliko stotina feroelektrika. Barijev titanat, Rochelleova sol, triglicin sulfat, kalijev dihidrogenfosfat, olovov titanat (PT), titanatni cirkonat olova (PZT) su među najčešće i najšire korištenim i temeljno istraženim feroelektricima.



Sl. 3.4. Ilustracija promjene smjera polarizacije mijenjanjem smijena napona

Feroelektrični materijali pokazuju jedinstvena dielektrična, piroelektrična, piezoelektrična i elektro-optička svojstva koja se koriste za razne primjene kao što su: kondenzatori, dielektrični rezonatori, senzori, pretvarači, aktuatori, displeji, minijturni mehanički i elektro-mehanički elementi (tj. uređaji i strukture).

### 3.1.3.1. Feroelektrična keramika

Velika većina feroelektričnih materijala koja se komercijalno koristi, koristi se u obliku polikristalne keramike. Tijekom godina razvijeno je mnogo različitih feroelektričnih tehnologija izrade keramike.

Reprezentativni feroelektrični materijali uključuju: barijev titanat  $\text{BaTiO}_3$ , olovni cirkonat titanat  $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$  ili PZT, olovni titanat ( $\text{PbTiO}_3$ ), olovno lantan cirkonat titanat (PLZT) i feroelektrike poput olovnog magnezijevog niobata (PMN). Općenito, ovi materijali imaju visoku dielektričnu permitivnost i karakterizira ih veliki piezoelektrični, piroelektrični i elektro-optički efekt. Na

temelju tih jedinstvenih svojstava, feroelektrični materijali su našli primjenu u mnogim aktivnim elementima različitih uređaja.

Barijev titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) bio je prvi feroelektrični keramički materijal koji je otkriven i pokazao se kao izvrsna primjena zbog svojih izvrsnih dielektričnih, feroelektričnih i piezoelektričnih svojstava.  $\text{BaTiO}_3$  se u velikoj mjeri koristi u kondenzatorima s visokom dielektričnom konstantom, višeslojnim keramičkim kondenzatorima i uređajima za pohranu energije [8].

#### **3.1.4. Piroelektrici**

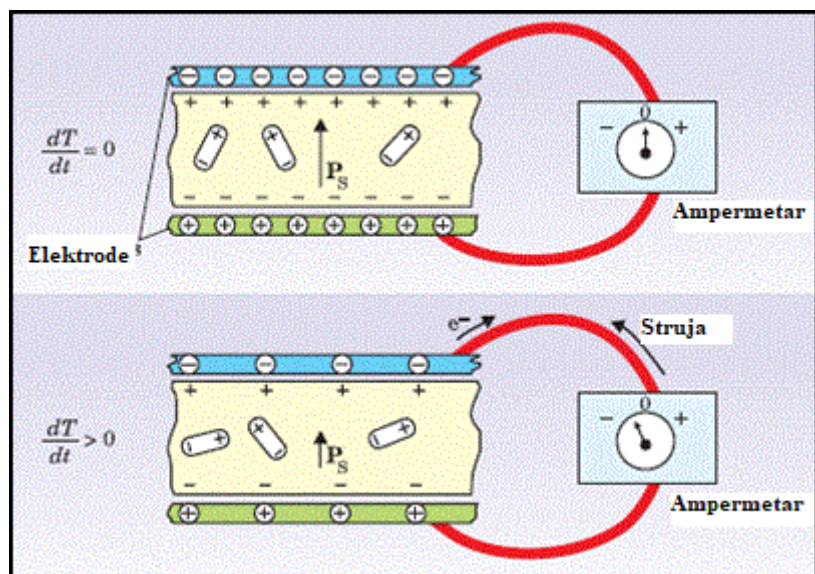
Piroelektričnost, sama po sebi, je sposobnost materijala da generira napon kad se zagrije ili ohladi [9].

Piroelektričnost je prvi put primjetio grčki filozof Theophrastus 314. godina prije Krista. On je utvrdio da turmalin privlači male komade slame i pepela kada se zagrijava. Prvi znanstveni opis ovog fenomena opisao je Louis Lemery 1717. godine. Linney je 1747. prvi put ovu pojavu povezo s električnom energijom, iako to nije dokazao sve dok Franz Ulrich Theodor Aepinus nije to učinio 1756. godine.

Kao i kod piezoelektričnih materijala, najvažniji piroelektrični materijali su keramika, sintetski polimeri i keramičko-polimerni kompoziti. Postoje dvije vrste piroelektričnih materijala: jedna je feroelektrična, a druga nije. Keramika na bazi olovnog cirkonata (PZ), kao što je PZT i PLZT, ima visoku vrijednost piroelektričnog koeficijenta, ali i dielektrične permitivnosti.

##### **3.1.4.1. Piroelektrični efekt**

Piroelektrični efekt je svojstvo određenih kristala da proizvede električnu energiju promjenom temperature. Određeni dielektrički (električno nevodljivi) kristali su razvili električnu polarizaciju kad se podvrgnu jednoličnoj promjeni temperature. Ako je temperatura konstantna, tada piroelektrični napon postupno nestaje zbog curenja struje. Promjena polarizacije na površini uzorka može se izmjeriti kao inducirana struja (slika 3.5.).



Sl.3.5. Piroelektrični efekt

Za piroelektrične kristale može se smatrati da imaju ugrađenu ili trajnu električnu polarizaciju. Kada se kristal održava na konstantnoj temperaturi ta se polarizacija ne manifestira. Međutim kada se temperatura kristala podigne ili spusti, trajna polarizacija se mijenja, a ta se promjena očituje kao piroelektričnost.





Veličina piroelektričnog učinka ovisi o tome je li toplinsko širenje kristala mehanički ograničen ili neograničen. U mehanički ograničenom kristalu opažen je primarni piroelektrični efekt, dok je u slobodnom kristalu sekundarni efekt nadređen primarnom učinku. Sekundarnim efektom može se smatrati piezoelektrična polarizacija koja proizlazi iz toplinskog širenja i općenito je mnogo veća od primarnog učinka.

Piroelektrici imaju širok spektar potencijalnih znanstvenih i tehničkih primjena. Mogu se koristiti za mjerenje generirane snage iz izvora zračenja (u radiometriji) ili temperature udaljenog vrućeg tijela (u pirometriji) [11].

### 3.2. Magnetna keramika

Magnetna keramika je oksidni materijal koji pokazuje određenu vrstu trajne magnetizacije zvane ferimagnetizam. Ferimagnetizam je vrsta trajnog magnetizma koji se javlja u krutim tvarima u kojima se magnetska polja povezana s pojedinim atomima spontano poravnavaju, neka paralelno ili u istom smjeru (kao kod feromagnetizma), a druga antiparalelno ili uparena u suprotnim

smjerovima. Spontano poravnavanje koje proizvodi feromagnetizam u potpunosti je poremećeno iznad temperature koja se naziva Curiejeva točka ( $T_c$ ), karakteristična za svaki ferimagnetski materijal. Kad se temperatura materijala dovede ispod točke Curie, ferimagnetizam se ponovno događa [12].

|  |  |
|--|--|
| <b>Feromagnetizam</b><br>     | Ispod $T_c$ , spinovi su poredani paralelno u magnetskoj domeni        |
| <b>Antiferomagnetizam</b><br> | Ispod $T_c$ , spinovi su poredani antiparalelno u magnetskoj domeni    |
| <b>Ferimagnetizam</b><br>     | Ispod $T_c$ , spinovi su poredani antiparalelno, ali se ne poništavaju |
| <b>Paramagnetizam</b><br>   | Spinovi su nasumično orijentirani                                      |

**Sl. 3.6.** Prikaz redosljeda vrtnje u feromagnetizmu, antimagnetizmu, ferimagnetizmu i paramagnetizmu [12]

Magnetska keramika sastoji se od željezovog oksida i stroncijevog karbonata. Komercijalno pripremljena magnetska keramika koristi se u raznim primjenama kao što je trajni magnet, transformator, u telekomunikacijama i snimanju informacija.

### 3.2.1. Feriti

Magnetska keramika izrađena je od ferita, kristalnog minerala sastavljenog od željezovog oksida u kombinaciji s drugim metalima. Magnetsko ponašanje koje pokazuju feriti naziva se ferimagnetizam, koje se sasvim razlikuje od magnetiziranja (zvanog feromagnetizam) [12].

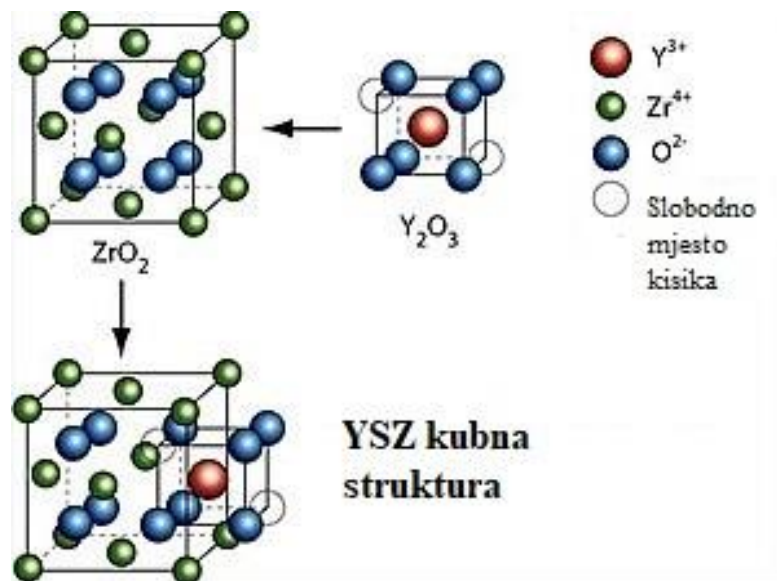
Tri osnovne klase ferita se pretvaraju u magnetske keramičke proizvode. U skladu s njihovom kristalnom strukturom to su spinel, šesterokutni ferit i granat.

### 3.3. Ionski vodljiva keramika

Ionska vodljivost uključuje „skakanje“ s zauzetog na prazno mjesto u rešetki. Pri visokim temperaturama, ionska vodljivost krutih materijala se može usporediti s vodljivošću vodene otopine u sobnim uvjetima. Primjerice, na 1000°C ionska vodljivost itriastabiliziranog cirkonija (YSZ) je 0,1 S/cm, a u stvari postoje brojni oksidi koji imaju znatno veću vodljivost pri nižim temperaturama. Visoka vodljivost ovih materijala može se pripisati visokoj koncentraciji slobodnih mjesta za kisik, međuprostorima kisika, elektrona i elektronskih rupa [13].

#### 3.3.1. YSZ

Itrijski stabilizirani cirkonij (YSZ) je keramika na bazi cirkonijskog oksida u kojoj je posebna kristalna struktura cirkonijskog oksida stabilna na sobnoj temperaturi dodatkom itrijskog oksida.



Sl.3.7. Prikaz strukture YSZ-a [13]

YSZ se proizvodi dopingom  $ZrO_2$  s akceptorom  $Y_2O_3$ . Jedna od glavnih primjena YSZ-a je u tehnologiji ćelija s čvrstim gorivima gdje se koristi kao elektrolitni materijal zbog svoje provodnosti iona kisika, visoke kemijske i kristalografske stabilnosti i niske elektroničke vodljivosti. Koristi se u proizvodnji gorive ćelije s čvrstim oksidom (SOFC). YSZ se koristi kao kruti elektrolit koji omogućava provođenje iona kisika dok blokira elektronsku vodljivost. Da bi

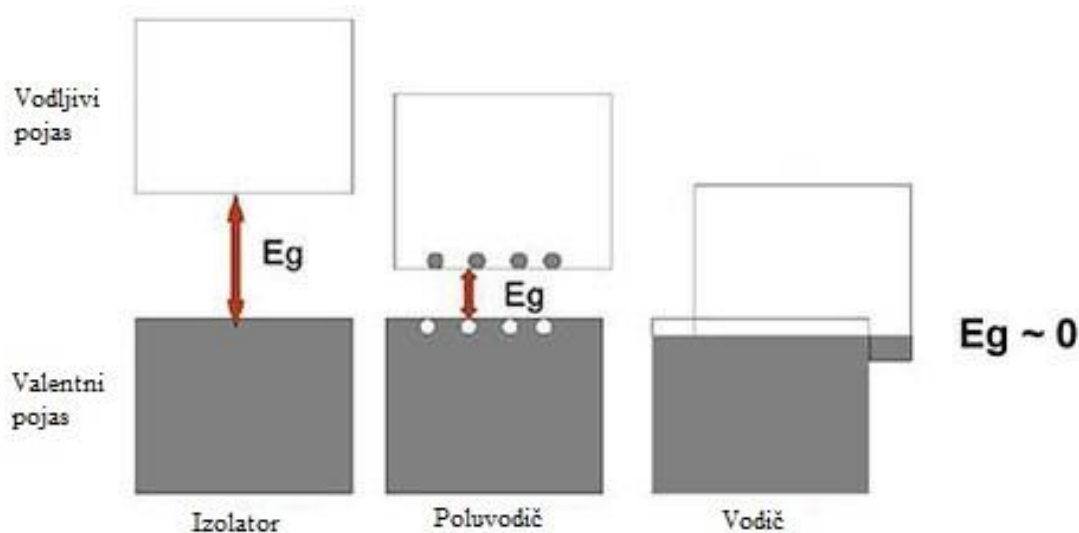


se postigla dovoljna vodljivost iona, SOFC se mora proizvoditi na visokim temperaturama (800-1000°C). Visoka gustoća YSZ-a također je potrebna kako bi se plinovito gorivo fizički odvojilo od kisika, inače elektrokemijski sustav nebi proizveo električnu energiju. YSZ transportira kisik kroz svoju rešetku i može se, na primjer, koristiti za detekciju kisika i neizravno za NO<sub>x</sub> plinove.

### 3.4. Poluvodička keramika

Keramički materijali pokazuju i izolacijska, i vodljiva svojstva. Do razvoja keramike je došlo zbog njenih izolacijskih svojstava. Keramika ima dobru električnu vodljivost, a neki keramički materijali imaju svojstva supravodiča.

Razmaka elektrona između metala, poluvodiča i izolatora prikazan je na slici 3.8. Poluvodiči spadaju u skupinu čiji je razmak između 0,02 do 2,5 eV. Kada se energija šupljine kreće prema donjem dijelu energetskog pojasa, značajna količina elektrona se nalazi u provodnom pojasu.



Sl. 3.8. Struktura elektronskih vrpca izolatora, poluvodiča i vodiča

Za razumijevanje osnovnih principa poluvodiča, energiju vezanja pojasa možemo povezati s načinom nastajanja elektrona i šupljina u keramičkim materijalima. Nekoliko se stanja može dogoditi za poluvodiče:

- Unutarnja svojstva-elektroni koji se kreću kroz praznine između pojaseva
- Vanjska svojstva-dodaci ili nečistoće
- Nestihiometrijska svojstva-stvaranje nedostataka za dobivanje potrebnih svojstava

Keramika na bazi ZnO može posjedovati poluvodička svojstva ako je odgovarajući dopirana.

Poluvodička keramika obično se priprema sinteriranjem u tekućoj fazi s kontrolom granične strukture zrna.

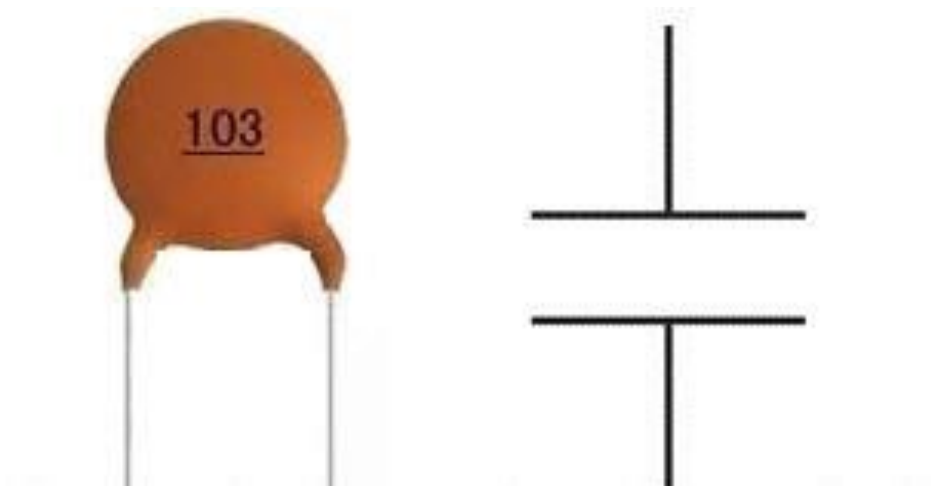
Poluvodička keramika se koristi za izradu varistora i otpornika s pozitivnim temperaturnim koeficijentom (PTC) [14].

## 4. PRIMJERI PRIMJENE KERAMIKE U ELEKTROTEHNICI

Keramika se u elektrotehnici koristi za proizvodnju vodiča, induktora, otpornika, kondenzatora, piezoelektričnih pretvarača i drugih uređaja. U posljednje vrijeme sve je veća potražnja za elektrokeramikom s boljom funkcionalnošću i performansama. Ovaj zahtjev ubrzao je razvoj tehnike sinteriranja. Budući da se učinkovitost elektrokeramike često određuje karakteristikama prahova, fizikalna i kemijska svojstva praha moraju biti dobro definirana kontrolom čistoće, homogenosti, veličine čestica, oblika čestica i kemijske stehiometrije. Stoga su razvijene razne tehnike kemijskih otopina kao alternativa uobičajnim metodama sinteriranja reakcijskog praška u čvrstom stanju. Jedna od glavnih prednosti kemijske sinteze je visoki stupanj kemijske homogenosti koji se postiže složenim sastavima. Pored toga, metode kemijske sinteze omogućuju kontrolu nad veličinom keramičkih čestica, a zatim proizvode elektrokeramiku koja je kritična za sinteriranje na niskim temperaturama.

### 4.1. Keramički kondenzator

Keramički kondenzatori se najčešće nalaze u svakom električnom uređaju, a koriste keramički materijali kao dielektrik. Na slici 4.1. prikazan je keramički kondenzator i njegov simbol [15].



**Sl.4.1.** Keramički kondenzatori i njegova oznaka

Postoje različite izvedbe keramičkih kondenzatora (diskovi, cijevi i višeslojni kondenzatori) među kojima višeslojni kondenzatori dominiraju u svjetskoj proizvodnji.

Otkako je prvi višeslojni keramički kondenzator (MLCC) uveden u ranom dijelu Drugog svjetskog rata, postojala su dva glavna pravca razvoja. Jedan prema manjim dimenzijama i većim vrijednostima kapacitivnosti, što znači maksimiziranje volumetrijske učinkovitosti, dok je drugi usmjeren prema smanjenju troškova. Te razvojne rezultate pratilo je poboljšanje pouzdanosti koje je od sve veće važnosti jer broj kondenzatora u određenim uređajima, kao što su računala ili mobilni telefoni, neprestano raste [10].

#### **4.1.1. Klase dielektrika**

Keramički dielektrici i izolatori pokrivaju širok raspon svojstava, od steatita s relativnom permitivnosti 6 do složenih feroelektričnih sastava s relativnom permitivnosti većom od 20000 [10].

Dielektrici I. klase uključuju keramiku niske i srednje permitivnosti s faktorom disipacije manjim od 0,003. Srednja permitivnost pokriva raspon  $\epsilon_r$  od 15 do 500.

Dielektrici II./III. klase sastoje se od keramike visoke permitivnosti na osnovi feroelektrika. Imaju vrijednost  $\epsilon_r$  između 2000 do 20000 i svojstva koja se razlikuju po temperaturi, jačini polja i frekvenciji od dielektrika I. klase. Njihov faktor disipacije obično je ispod 0,03, ali može preći tu razinu u nekim temperaturnim rasponima i u mnogim slučajevima postati veći. Njihova glavna vrijednost nalazi se u njihovoj visokoj volumetrijskoj učinkovitosti.

Dielektrici IV. klase sadrže vrlo jednostavne strukture poput malih diskova i cijevi s dvije paralelne elektrode koje mogu dati kapacitet veći od 1 $\mu$ F. Nedostaci su niski radni naponi, uglavnom između 2 i 25 V i visoki gubici.

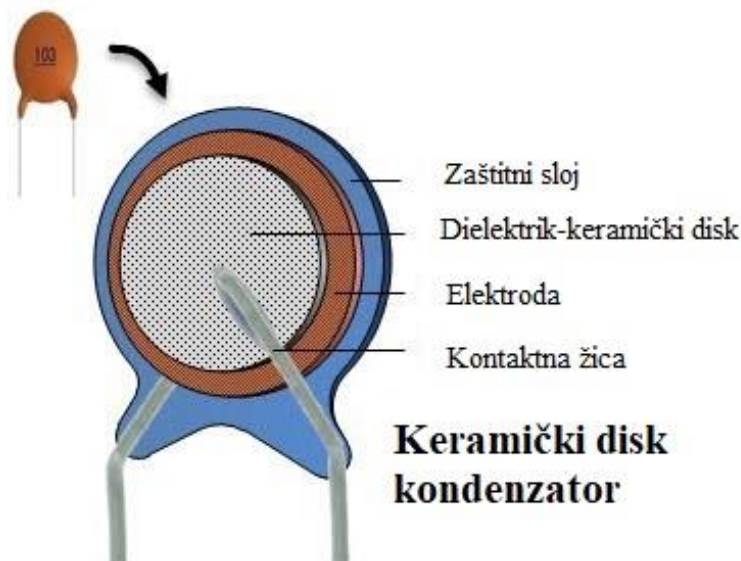
#### **4.1.2. Različite izvedbe i izrada keramičkih kondenzatora**

Keramički kondenzatori su dostupni u različitim izvedbama:

- Disk izvedba
- Cijevna izvedba
- Višeslojni keramički kondenzator (MLCC)

#### 4.1.2.1. Kondenzatori u obliku diskova i cijevi

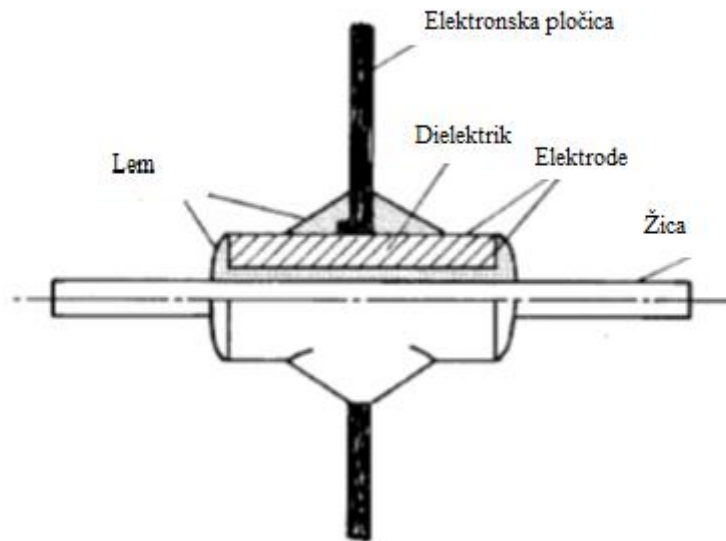
Diskovi se mogu oblikovati suhim prešanjem kalciniranog i mljevenog praha koji sadrži 5 do 10 vol.% organskog veziva. Atmosfera peći mora biti u potpunosti oksidativna za sastave (osim klase IV) koji sadrže  $\text{TiO}_2$  i pri najvišoj temperaturi, i tijekom hlađenja. Nakon pečenja, srebrna boja se nanosi na površinu, a diskovi se nakratko ponovno slažu u jedan sloj na temperaturi od 600-800°C [10].



Sl. 4.2. Premazivanje diska kondenzatora [15]

Sljedeće faze su u potpunosti automatizirane. Prvo se zagrijavaju iznad grijane kupke za lemljenje koja se zatim nakratko podigne kako bi se diskovi uronili i premazali lemom. Preliminarno zagrijavanje umanjuje toplinski šok uranjanja u lem. Vrijeme uranjanja mora biti kratko jer se srebro brzo rastapa u rastaljenom metalu. Nakon toga se jedinice oblože polimerom, obično epoksidnom smolom, zatim se peku radi učvršćivanja smole i ispituje kapacitivnost te probojni naboj.

Cijevna izvedba prikladna je za proizvodnju kondenzatora za napajanje. Shematski dijagram presjeka takvog kondenzatora prikazan je na slici 4.3. Koriste se kao kondenzatori u televizijskim i FM prijemnicima.

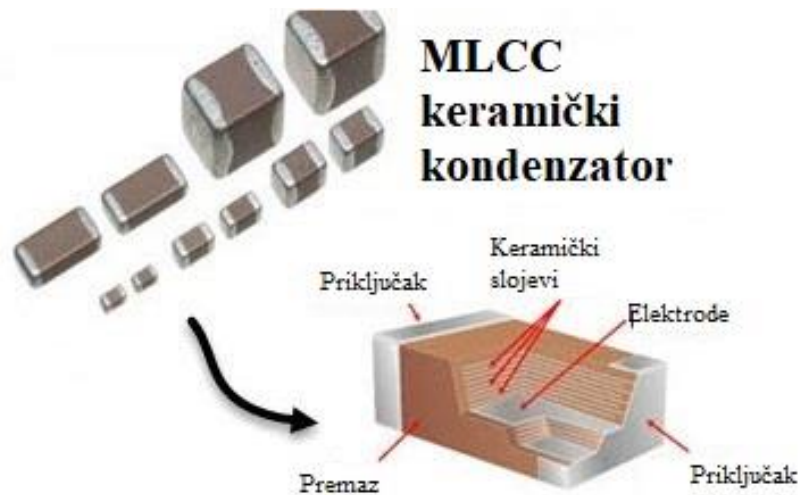


**Sl.4.3.** *Prikaz presjeka cjevastog kondenzatora*

Izvedbe u obliku diska i cijevi koristi se za sve klase dielektričnih kondenzatora jer su najniži u cijeni. Koristeći dielektrike I. klase, oni pokrivaju raspon od 0,1-1000 pF, II./III. klasa pokriva 1000-10000 pF, a IV. klasa pokriva 0,1-2  $\mu$ F. Osim za IV. klasu, sigurni radni napon obično je najmanje 100 V, iako se u elektroničkim krugovima vjerojatno neće susresti primjenjeni naponi veći od 10 V. Dielektrici su debljine od 50  $\mu$ m do 2 mm. Raspon promjera diskova je od 2 do 30 mm, a cijevi mogu biti od 5 do 60 mm dužine i 1 do 10 mm promjera.

#### **4.1.2.2. Višeslojni kondenzatori**

Kritični korak u proizvodnji višeslojnih kondenzatora su početni prah na bazi barijevog titanata. Višeslojna struktura (slika 4.4.) omogućava maksimalni dostupan kapacitet iz tankog dielektrika u mehanički robusnom obliku i minimalnom prostoru [10].



SI.4.4. Višeslojni keramički kondenzator

Nastali kondenzator u osnovi se sastoji od puno manjih paralelno spojenih kondenzatora što dovodi do povećanja kapaciteta [15].

## 4.2. Keramički PTC termistori

PTC (eng. *Positive Temperature Coefficient*) termistori su keramičke komponente čiji se električni otpor brzo povećava kada se prekorači određena temperatura.

Kada je temperatura komponente ispod Curieve temperature ( $T_c$ ), visoka dielektrična konstanta sprječava stvaranje potencijalnih barijera na kristalnim zrnima i dovodi do slabog otpora. Kada je temperatura komponente iznad Curieve temperature ( $T_c$ ), dielektrična konstanta dramatično opada što omogućava stvaranje potencijalnih barijera na granicama zrna, a otpor se naglo povećava. Ako je temperatura viša, komponenta pokazuje NTC (eng. *Negative Temperature Coefficient*) ponašanje [16].

Prednosti PTC termistora:

- Visoki temperaturni koeficijent otpora termistora
- Otpor između 0,1 do 10 K $\Omega$
- Radni napon od 6V do 1000V
- Niski troškovi

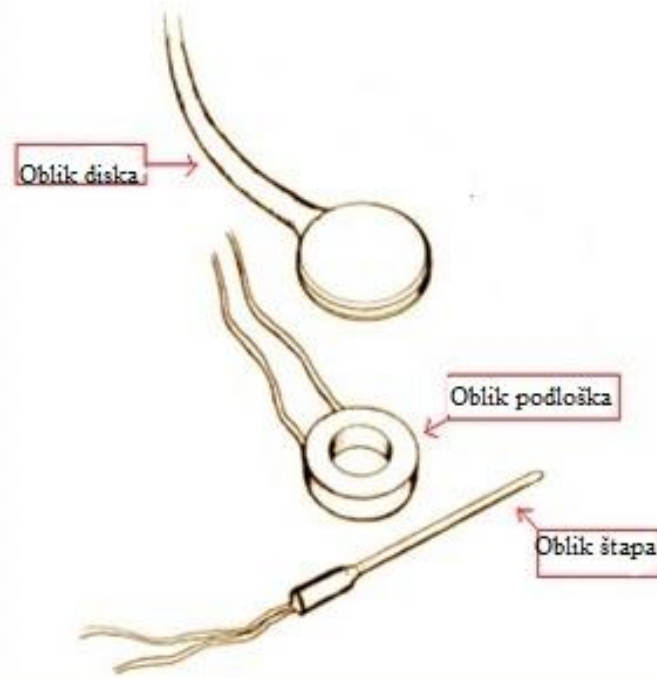
#### 4.2.1. Tehnologija proizvodnje termistora

Osnovni sastav PTC termistora se obično dobiva iz oksida ili karbonata (npr  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  itd) koji se miješaju u mlinu od polietilena. Alternativno, i ako je ekonomski održivo, mješavina se može sintetizirati iz organskih metalnih spojeva, obično u kombinaciji s topljivim anorganskim solima [10].

Smjesa se osuši i kalcinira (na približno  $1000^\circ\text{C}$ ). U ovoj fazi se mogu dodati i druge vezivne tvari, npr.  $\text{MnSO}_4$ , ili se mješavina može miješati s  $\text{PbTiO}_3$ . Zatim se smjesa granulira te je spremna za prešanje u diskove.

Sinteriranje na zraku na oko  $1350^\circ\text{C}$  i sljedeće faze hlađenja moraju se pažljivo kontrolirati jer se tada uspostavljaju svojstva graničnih slojeva. Uvjeti moraju biti takvi da omogućuju stvaranje graničnog sloja optimalne debljine ( $0,1\text{-}1\ \mu\text{m}$ ). Nakon faze sinteriranja smjesa se pažljivo opskrbljuje priključnim elementima te se na kraju premazuje.

Smjesa barijevog karbonata, titanijevog oksida i drugih materijala čiji sastav daje željene električna i toplinska svojstva se komprimira u diskove, podloške, šipke, ploče ili cjevaste oblike kao što je prikazano na slici 4.5.



Sl. 4.5. Vrste termistora

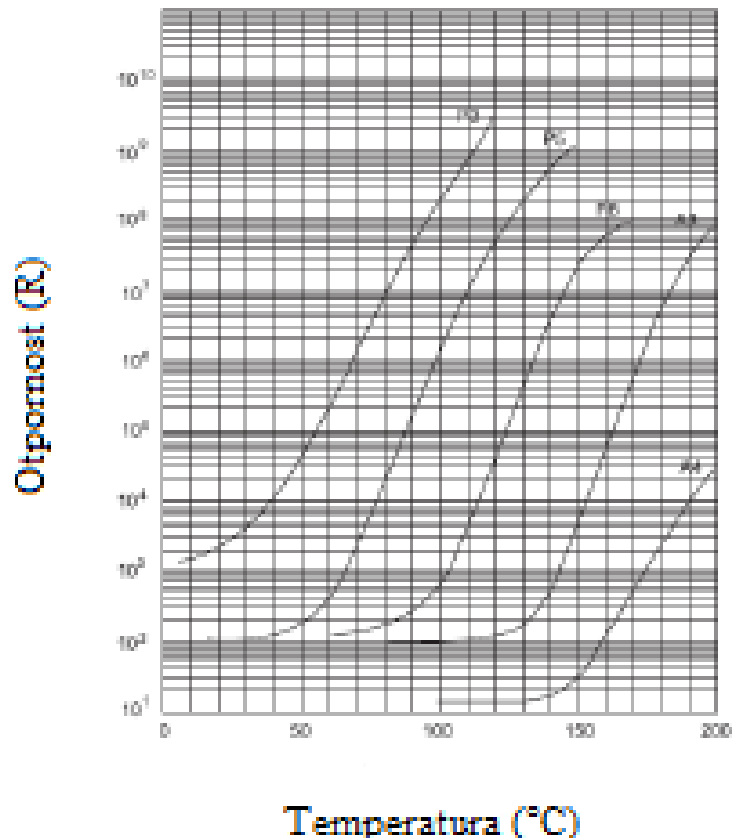


#### 4.2.2. Karakteristike PTC termistora

Glavne električne karakteristike keramičkog PTC termistora su otpornost-temperatura (R-T), struja-vrijeme (I-T) i karakteristika napon-struja (V-I) [16].

##### 4.2.2.1. Karakteristika otpora i temperature (R-T krivulja)

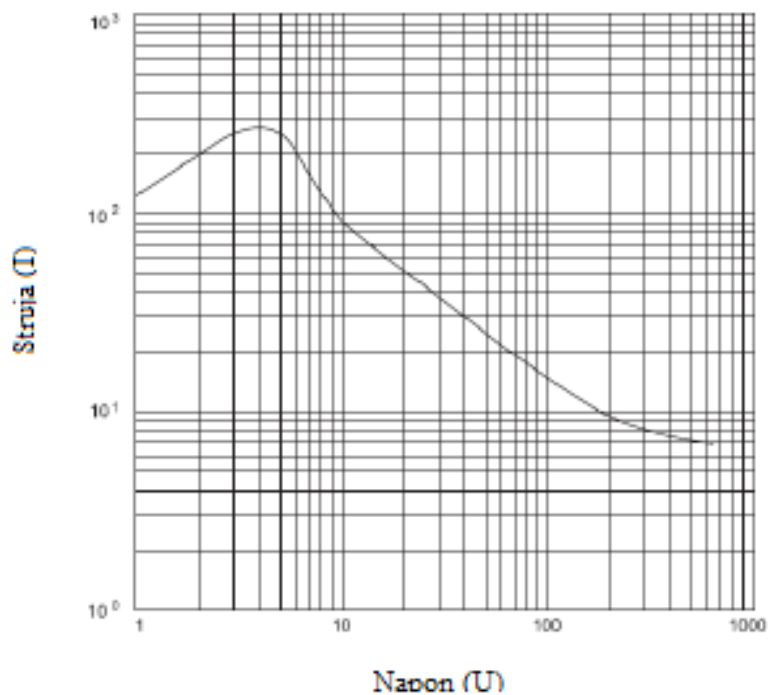
R-T krivulja (slika 4.6.) prikazuje odnos otpora nulte snage i temperature na specifičnom naponu. Kad temperatura keramičkog PTC termistora dosegne Curievu temperaturu ( $T_c$ ), otpor mu se naglo povećava. Suprotno tome, termistor se vraća u stanje niskog otpora nakon smanjenja temperature.



Sl. 4.6. R-T krivulja keramičkog PTC termistora

##### 4.2.2.2. Karakteristika napona i struje (U-I krivulja)

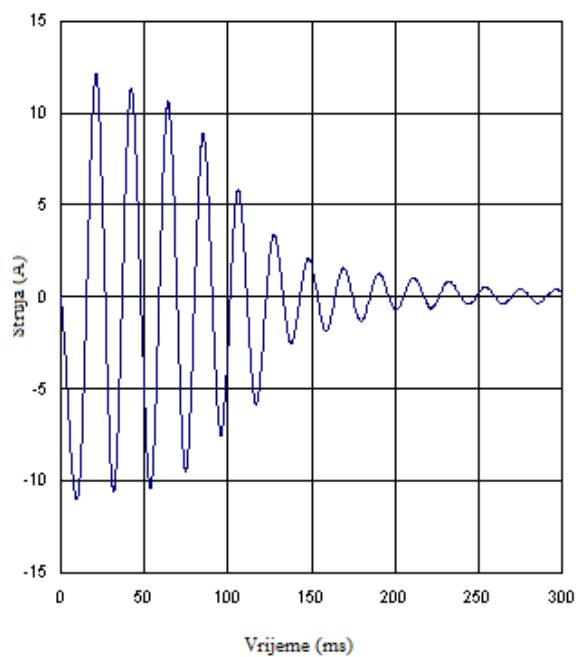
U-I krivulja (slika 4.7.) prikazuje odnos napona i struje u termički ustaljenom stanju i zraku pri 25°C.



**Sl. 4.7.** *U-I krivulja keramičkog PTC termistora*

#### 4.2.2.3. Karakteristika struje i vremena (I-T krivulja)

I-T krivulja (slika 4.8.) prikazuje odns stuje i vremena pri određenom naponu i struji na 25°C.



**Sl. 4.8.** *I-T krivulja keramičkog PTC termistora*

### 4.2.3. Primjena keramičkih PTC termistora

PTC elementi čine korisne pokazatelje temperature jer se nagli porast otpora iznad Curieve temperature vrlo lako detektira ili se koriste u upravljačkim mehanizmima. Mali cjevasti elementi promjera milimetra i dugi nekoliko milimetara mogu se umetnuti u namotaje motora ili transformatora i koristiti za otkrivanje pregrijavanja ili za izravno upravljanje povećanjem ukupnog otpora namota kada on postane previše vruć [10].

Idealni su za upotrebu u bezbroj primjena modernog električnog i elektroničkog inženjstva, na primjer kao osigurači od preopterećenja struje ili kao zaštita od kratkog spoja u motorima. PTC termistori se koriste u balastnim sustavima s elektroničkim svjetilkama i izvorima napajanja u prekidaču. Također su prikladni kao samoregulirajući grijači elementi, u pomoćnom grijanju, grijanju mlaznica i predgrijavanju rasplinjača u automobilima [16].

## 4.3. SOFC

Gorive ćelije s čvrstim oksidom kao elektrolitom (SOFC, eng. *Solid Oxide Fuel Cell*) rade na vrlo visokim temperaturama, najvišim od svih vrsta gorivih ćelija na oko 800°C do 1000°C. Mogu imati učinkovitost veću od 60% pri pretvaranju goriva u električnu energiju. Ako se toplina koja se proizvela također iskoristi, njihova ukupna učinkovitost u pretvaranju goriva u energiju može biti veća i od 80%.

### 4.3.1. Elektrokemija u SOFC-u

Četiri glavne funkcije koje elektrokemija obavlja u sadašnjoj generaciji SOFC-a:

- Elektrolit
- Anoda
- Katoda
- Međusobno povezivanje

#### 4.3.1.1. Elektrolit

Gotovo bez iznimke kubično stabilizirani cirkonij je odabrana keramika za elektrolit u SOFC-ima. To je zbog njegove adekvatne vodljivosti i gotovo potpune odsutnosti elektroničke vodljivosti.

Također, zbog kombinacije dostupnosti i troškova, pogodan izbor je cirkonij stabiliziran itrijom (YSZ). Keramika je potrebna u obliku gustih, polikristalnih spojeva, tankih koliko je moguće radi smanjivanja otpornosti ćelije [10].

#### **4.3.1.2. Anoda**

Anoda, odnosno elektroda za gorivo, mora biti stabilna, elektronički vodljiva, imati visoku specifičnu površinu i poroznost koja omogućava slobodan prolazak gorivnih plinova do sučelja anode. Također mora olakšati protok produkata oksidacije dalje od sučelja. Iako temperatura i smanjeni atmosferski uvjeti dopuštaju korištenje djelomično sinteriranog metalnog nikla kao anode, produljena upotreba dovela bi do dodatnog sinteriranja i nepoželjnih mikrostrukturnih promjena. Prekrivanje djelomično sinteriranog nikla YSZ-om daje bolji spoj toplinske ekspanzije između anode i elektrolita, smanjujući toplinski umor tijekom rada i poboljšavajući prijanjanje između anode i elektrolita. Daljnja prednost je što mikrostruktura nudi povećanje reaktivnog područja na trofaznoj granici gdje se oksidacija goriva javlja [10].

#### **4.3.1.3. Katoda**

Za razliku od anode, katoda djeluje u oksidacijskom okruženju, ali poput anode, mora imati visoku elektroničku vodljivost i strukturu pora koja omogućuje plinovitom oksidansu da dosegne katodno sučelje.

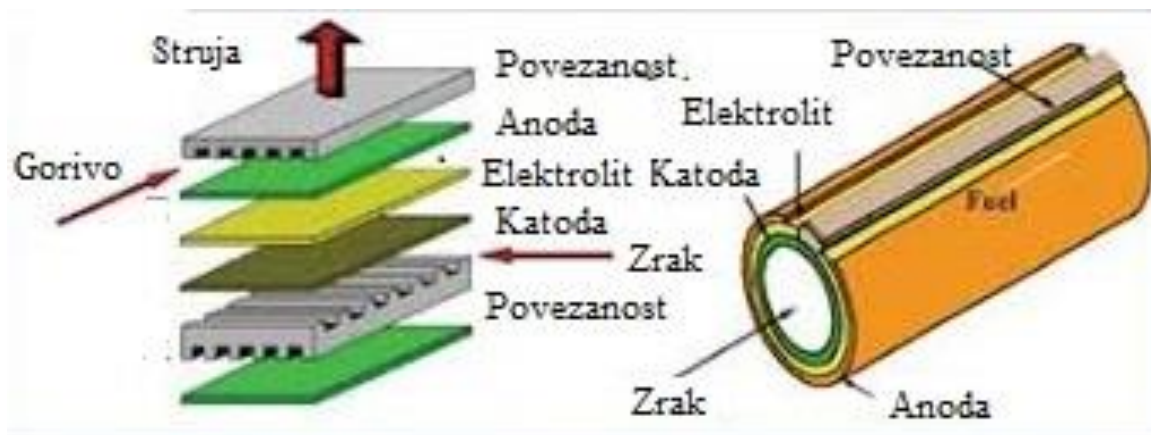
Najpovoljniji materijal je modificirani lantan-manganit. Doping stroncija povećava vodljivost [10].

#### **4.3.1.4. Međusobno povezivanje**

Zahtjevi svojstava keramike za međusobno povezivanje su najzahtjevniji. Vodljivost bi trebala biti što viša, i u idealnom slučaju 100% elektronička. Budući da je međusobno povezivanje izloženo visokim temperaturama i oksidacijskim okruženjima, mora biti stabilno i na jedno i na drugo. Tim zahtjevima udovoljava dopirani lantanski kromit, no za SOFC-ove koji rade u temperaturnom području 500-750°C može se koristiti ploča od nehrđajućeg čelika [10].

### 4.3.2. Izvedba i konstrukcija SOFC-a

Postoje dvije osnovne izvedbe SOFC-a, a to su: ravna i cjevasta. U ravnoj izvedbi komponente su stavljene u ravne grupe gdje se zrak i vodik slijevaju kroz jedinicu preko kanala ugrađenih u anodu i katodu.



Sl. 4.9. Prikaz geometrije SOFC-a [10]

U cjevastoj izvedbi, zrak se dovodi u unutrašnjost proširene cijevi s čvrstim oksidom (koja je na jednom kraju zapečaćena) dok gorivo teče oko vanjske cijevi. Sama cijev tvori katodu, a komponente ćelije su sastavljene u slojevima oko cijevi [10].

## 4.4. Piezoelektrični generatori

Piezoelektrična keramika, kao što je već napomenuto, kada se mehanički aktivira pritiskom ili vibracijama, ima sposobnost generiranja električnog napona dovoljnog za iskrenje. Piezoelektrična keramika se često koristi u tom svojstvu za paljenje izvora goriva u upaljačima, plinskim pećima i opremi za zavarivanje. Osim toga, sve od kvarcnih satova do kompjuterskih mikrofona koristi piezo komponente i rezultirajući piezoelektrični efekt kako bi se poboljšale performanse [17].



**Sl.4.10.** *Piezoelektrični generator* [17]

#### **4.4.4. Vrste piezoelektričnih keramičkih generatora**

Piezoelektrični generatori, koji se ponekad nazivaju PEG, su novost u proizvodnji električne energije. Potencijalni su za ostvarivanje ideje o bežičnim elektroničkim uređajima s vlastitim napajanjem. Naravno sve je još daleko od toga da postoji generator s piezo vibracijama kao glavnim izvorom energije. No, kad je riječ o visoko stabilnim, pouzdanim izvorima energije, stručnjaci vjeruju da piezogeneratori mogu promijeniti način na koji koristimo energiju današnjih široko korištenim, učinkovitim elektroničkih uređaja [17].

##### **4.4.4.1. Jednoslojni piezoelektrični generatori**

Dvije uobičajne primjene piezo generatora su u upaljačima za cigarete i plinskim plamenicima. U tim primjenama, pritiskom na tipku, primjenjuje se opterećenje na jednoslojnu piezoelektričnu keramiku u obliku štapa. Kao rezultat piezoelektričnog učinka, keramički element proizvodi napon koji prolazi kroz malu iskru koja uzrokuje zapaljenje izvora goriva [17].

Električna energija u štapastom jednoslojnom piezo generatoru oslobađa se vrlo brzo, visokog je napona i vrlo niske struje. Piezoelektrični sustavi paljenja su mali i jednostavni, dugotrajni i zahtjevaju malo održavanja.

##### **4.4.4.2. Višeslojni piezoelektrični generatori**

Višeslojni piezo generatori sastoje se od snopa vrlo tanke (sub-milimetarske) piezoelektrične keramike naizmjenično s elektrodama. Električna energija proizvedena višeslojnim piezo

generatorima ima mnogo manji napon nego napon generiran od jednoslojnog generatora. S druge strane, struja koju proizvodi višeslojni generator je znatno veća od struje koju stvara jednoslojni piezoelektrični generator [17].

Budući da se stvaraju elektromagnetske smetnje, višeslojni piezo generatori su izvrsne poluvodičke baterije za elektroničke sklopove.

Zbog napretka u mikro-elektroničkim sustavima, brojni potrošački uređaji su se dimenzionalno smanjili. Manji elektronički sustavi zahtjevaju manje energije za rad. Kao rezultat toga, višeslojni piezoelektrični generatori u čvrstom stanju postali su izvedivi izvor napajanja za neke primjene.

Trenutne primjene višeslojnih piezo generatora su izvori energije za bežične senzore, kao što su senzori koji nadziru tlak na automobilima.

#### **4.4.5. Budućnost piezoelektričnih generatora**

Jednoslojni i višeslojni piezo generatori koriste se u primjenama gdje baterije ili izravna električna struja nisu dostupne [17].

U posljednje vrijeme, skladištenje energije pomoću piezoelektrične energije postalo je žarište mnogih istraživanja. Piezoelektrična keramika ima ograničene energetske učinke i stoga su potencijalni veliki troškovi u primjeni velike količine energije. S druge strane, upotreba višeslojnih piezo generatora u manjim elektroničkim uređajima s malim zahtjevima za energijom pruža priliku za istraživanje.

## 5. ZAKLJUČAK

Ljudima dan započinje keramikom, bude se u građevinama od opeke, cementa, okruženi prozorima od stakla. Peru se u popločenim kupaonicama, doručkuju iz keramičkih šalica i zdjelica. Često čitave dane provode za računalima koja su prepuna elektroničkih komponenti na bazi keramike, poput mikročipova, kondenzatora ili otpornika. Iako je to daleko od očitog, živimo u svijetu keramike.

Toliko puta keramiku uopće ne primjećujemo jer se krije unutar električne i elektroničke opreme. Elektromotori u kućanskim uređajima sadrži magnete, a i vrlo često su izrađeni od feritne keramike. Također feritne magnete i druge vrste keramičkih pretvarača nalazimo i u zvučnicima i slušalicama. Dok se metali poput bakra koriste za prijenos električne energije od mjesta do mjesta, mora se koristiti keramika za izoliranje visokonaponske električne energije na mjestima poput generatora i transformatora.

Najsuvremenija električna upotreba keramike je vjerojatno u visokotemperaturnim supervodičima (materijali koji gotovo nemaju električni otpor). Iako se tradicionalni supervodiči moraju ohladiti na gotovo apsolutnu nulu ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ), nove keramike postaju supervodljive i u relativno toplim uvjetima ( $-180^{\circ}\text{C}$ ), što ih čini daleko praktičnijima za upotrebu u magnetno levitacijskim vlakovima ili u vrhunskim računalima.

Keramika je dio ljudskog života već gotovo 3000 godina. Njezine estetske i funkcionalne karakteristike postale su neizostavan dio svakodnevnog života. U današnjem svijetu koji se brzo mijenja, moderna keramika-često skrivena u zamršenim tehničkim sustavima-igra presudnu ulogu u osiguravanju ispravnog funkcioniranja ovih složenih jedinica i rada s vrhunskim performansama. Jedinstvena struktura i funkcionalna svojstva čine keramiku idealnim izborom, posebice za termički, mehanički i kemijski zahtjevne primjene. Prema tome, keramika će imati ključnu ulogu sada i u budućnosti u osiguravanju tehnologije s održivom, pristupačnom opskrbom energije i mobilnošću.



## LITERATURA

- [1] The American Ceramic Society, "A Brief History of Ceramics and Glass," 2018..  
<https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/brief-history-of-ceramics-and-glass>. Pristupljeno lipanj 2019.
- [2] M. Mani Subedi, "Ceramics and its Importance," *Himlayan Physics*, vol. 4, 2013.
- [3] P. Boch and J.-C. Niepce, *Ceramic Materials*, London: ISTE Ltd, 2007.
- [4] Ceramic Ninja, "Properties Of Ceramics Different Proporties of Ceramic Materials,"  
<https://ceramicninja.com/properties-of-ceramics/#>. Pristupljeno lipanj 2019.
- [5] K. Uchino, *The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective*, The Pennsylvania State University, 2017.
- [6] S. B. Narang i S. Bahel, »Low loss dielectric ceramics for microwave applications,«  
*Journal of Ceramic Processing Research*, 2010.
- [7] M. Barsoum, *Fundamentals of Ceramics*, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2003.
- [8] G. H. Haertling, »Ferroelectric Ceramics: History and Technology,« *Journal of American Ceramic Society*, 1999.
- [9] K. C. Kao, *Dielectric Phenomena in Solids*, Academic Press, 2004.
- [10] A. Moulson i J. Herbert, *Electroceramics*, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [11] S. P. Parker, *Encyclopedia of Physics*, McGraw-Hill, 1993.
- [12] Encyclopedia Britannica, »Magnetic ceramics,«  
<https://www.britannica.com/technology/magnetic-ceramics/Magnetic-storage>. Pristupljeno kolovoz 2019.
- [13] T. Ramanarayanan, S. Singhal i E. Wachsman, »High Temperature Ion Conducting Ceramics,« *The Electrochemical Society*, 2001.
- [14] SubsTech, "Electrical properties of ceramics," 1 June 2012.  
[https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electrical\\_properties\\_of\\_ceramics#semi-conducting\\_properties](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electrical_properties_of_ceramics#semi-conducting_properties). Pristupljeno kolovoz 2019.
- [15] Capacitor Guide, "Ceramic Capacitor," 2019. <http://www.capacitorguide.com/ceramic-capacitor/>. Pristupljeno lipanj 2019.
- [16] Thinking electronic industrial, "Ceramic PTC Thermistor: Introduction," April 2018.  
<http://www.thinking.com.tw>. Pristupljeno kolovoz 2019.

[17] APC International, "Piezoelectric generators," 2016.  
<https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/generators.html> . Pristupljeno lipanj 2019.

## **SAŽETAK**

Nalazimo se u svijetu koji je sastavljen od keramike. Često neprimjetna, ona se uvukla u gotovo sva područja čovjekova života. U ovom radu daje se uvid u povijest i razvoj keramike, od njenih početaka do primjene u modernim tehnologijama, te u njezina svojstva općenito, s posebnim naglaskom na elektrokermiku. Opisana je njezina primjena u elektrotehničkom području, od elektrokermike do poluvodičke keramike. Na nekoliko primjera su detaljnije opisane neke od komponenti električnih ili elektroničkih uređaja i bit keramike u njima.

**Ključne riječi:** keramika, elektrokermika, primjena

## **ABSTRACT**

World around us is made of ceramics. Often unnoticed, it has crept into almost every area of human life. This paper gives an insight into the history and development of ceramics, from its beginnings to modern technology, and its properties in general, with particular emphasis on electro ceramics. Its application in the electrical field, from electro ceramics to semiconducting ceramics, is described. On a few examples some of the components of electrical or electronic devices are described in more detail and the essence of ceramics in them.

**Keywords:** ceramics, electro ceramics, application

