

Manganiti s uređenjem naboja: ac i dc transportna svojstva

Vanja Marić

Fizički odsjek, PMF, Bijenička 32, 10 000 Zagreb

Mentor: dr. sc. Tomislav Ivek

Institut za fiziku, Bijenička 46, 10 000 Zagreb

(Dated: 19. siječnja 2017.)

Sažetak

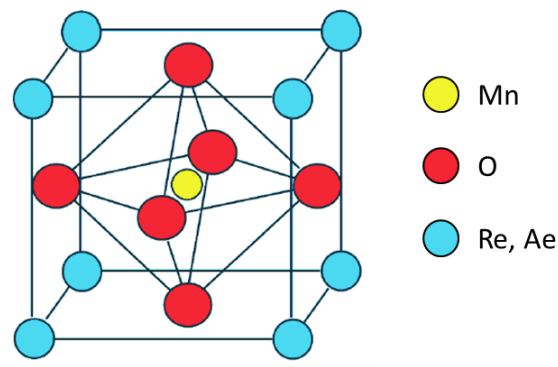
Multiferoici su materijali koji imaju povezana električna i magnetska uređenja. Zanimljivi su zbog samih svojstava koja pokazuju, ali i zbog moguće tehnološke primjene. Proučavamo manganit $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, $x = 0.7$, koji je potencijalni multiferoik. Mjerimo električni otpor i kapacitet u rasponu temperatura od sobne do 4.2 K. Naša mjerenja ukazala su na fazni prijelaz na 230 K. Također, mjerenja pokazuju frekventnu disperziju u kapacitetu na niskim temperaturama. Upućujemo na dodatna mjerenja koja je potrebno napraviti da bismo saznali više o tome je li proučavani manganit multiferoik i koja mu je priroda osnovnog stanja.

I. UVOD

Feroici su materijali koji poprimaju spontano unutar-nje uređenje koje se može mijenjati pomoću nekog vanjskog polja [1]. Dobro poznata fero-uređenja su feromagnetizam, feroelektricitet i feroelasticitet. Feromagnetni imaju spontanu magnetizaciju, sačinjenu od elektronskih spinova, koju možemo mijenjati magnetskim poljem. U feroelektričnim materijalima nalazimo spontanu polarizaciju koju možemo mijenjati pomoću električnog polja. U feroelastičnim materijalima nalazimo pak spontanu deformaciju koju možemo mijenjati mehaničkim naprezanjem [1]. Ferroici su od velikog interesa zbog zanimljivih svojstava koja pokazuju, ali i zbog moguće tehnološke primjene [1]. Npr. električna polarizacija u feroelektričnim materijalima i magnetizacija u feromagnetima proučavaju se za primjenu u računalima gdje bi suprotne orijentacije polarizacije i magnetizacije mogle predstavljati bitove 0 i 1 [1].

Neki materijali pokazuju više fero uređenja. Materijale u kojima su različita uređenja povezana zovemo multiferoicima [1]. U feromagnetima magnetizaciju mijenjamo magnetskim pojem, dok u feroelektričnim materijalima polarizaciju mijenjamo električnim poljem. U multiferoicima magnetsko polje može mijenjati polarizaciju, a električno polje magnetizaciju. Multiferoici su zanimljivi iz stanovišta bazične fizike, pogotovo zato jer magnetizacija, koja je aksijalni vektor, i polarizacija, koja je polarni vektor, imaju različita svojstva simetrije, a u multiferoicima magnetizaciju možemo mijenjati električnim poljem i polarizaciju magnetskim poljem [1]. No proučavani su i za tehnološke primjene. Posebno zanimljivo je kontroliranje magnetizma električnim poljem jer bi moglo dovesti do manjih i energetski učinkovitijih uređaja koji se temelje na magnetskim tehnologijama. [1]

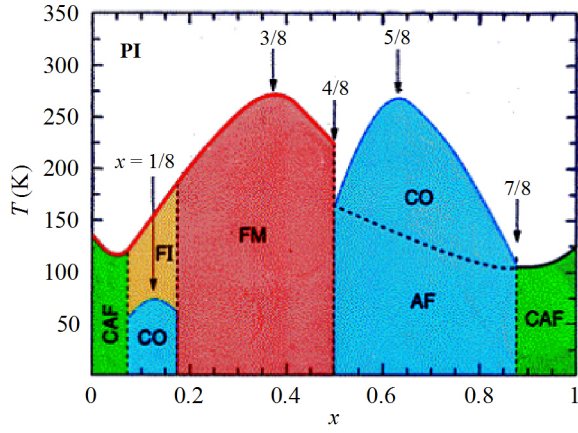
Manganiti su materijali kemijske formule oblika



Slika 1: Perovskitna kristalna struktura manganita $\text{Re}_{1-x}\text{Ae}_x\text{MnO}_3$. Atom mangana, prikazan žutom bojom, okružen je sa šest atoma kisika, prikazanih crvenom bojom, koji tvore pravilni oktaedar. Između oktaedara na vrhovima kocke nalazi se, prikazana plavom bojom, mješavina trivalentnih rijetkih zemnih metala Re i divalentnih zemnoalkalijskih metala Ae. Prilagođeno iz [2].

$\text{Re}_{1-x}\text{Ae}_x\text{MnO}_3$ [2]. Re predstavlja rijetki zemni metal, a Ae zemnoalkalijski metal. Veličina x govori o stupnju supstitucije atoma rijetkog zemnog metala Re atomima zemnoalkalijskog metala Ae. Atom mangana u manganitima sadrži tri ili četiri valentna elektrona [2]. Interes za manganite javio se u 1950-ima kada je uočeno istovremeno postojanje različitih uređenja, a do velikog porasta interesa došlo je u 1990-ima otkrićem kolosalnog magnetootpora [2]. Manganiti imaju perovskitnu kristalnu strukturu [2], prikazanu na slici 1.

Manganiti kemijske formule oblika $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ proučavani su od najranijih dana proučavanja manganita [3]. Danas je iz različitih mjerenja poznat njihov

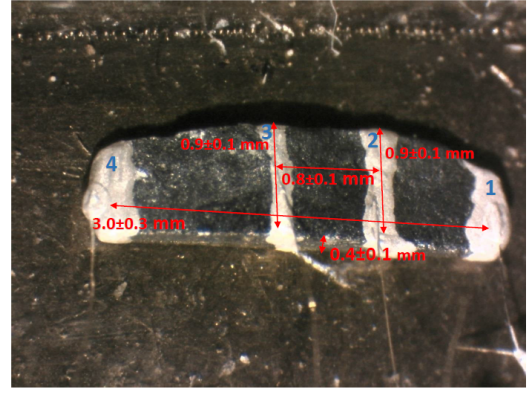


Slika 2: Fazni dijagram manganita $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ u ovisnosti o temperaturi T i supstituiranju x . FM: feromagnetski metal, FI: feromagnetski izolator, AF: antiferomagnetizam, CAF: Canted AF, CO: uređenje naboja. Preuzeto iz [3].

fazni dijagram, prikazan na slici 2 [3]. Fazni dijagram je dosta grub i trebalo bi ga bolje istražiti. Na faznom dijagramu je vidljivo da manganiti $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ pokazuju i uređenje naboja i magnetska uređenja [3]. Uređenje naboja je uređenje u kojem imamo atome s različitim brojem valentnih elektrona raspoređene u pravline strukture [4]. Zanimljivo je jer može dovesti do postojanja feroelektričnog ponašanja [5]. U manganitima uređenje naboja odnosi se na uređenje u kojem su atomi mangana valencije 3 poslagani u pravilnu strukturu i atomi mangana valencije 4 poslagani u pravilnu strukturu [4, 5]. Uzorak uređenja naboja u manganitima nije još posve razjašnjen [3, 4]. Također, poznato je da manganiti pokazuju kolsalni magnetootpor [2] [3].

U ovom seminaru bavimo se materijalom $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ za $x = 0.7$. Razlog što proučavamo sustav s $x = 0.7$ je što prema faznom dijagramu ima najvišu temperaturu uređenja naboja i zato je prikladan za izučavanje. Sustav s $x = 0.7$ pokazuje uređenje naboja ispod 240 K. Osim uređenja naboja sustav pokazuje antiferomagnetizam ispod 120 K. Antiferomagnetizam je uređenje magnetskih momenata gdje suma magnetskih momenata čelija kristalne rešetke iščezava [6]. U antiferomagnetima nemamo, stoga, makroskopsku magnetizaciju [6]. Kako sustav pokazuje i uređenje naboja, koje može dovesti do feroelektričnog ponašanja, i antiferomagnetizam zanima nas je li multiferoik.

Mjerimo otpor i radimo dielektričnu karakterizaciju u širokom rasponu temperatura. Takva mjerenja mogu ukazati na fazne prijelaze u stupnjevima slobode naboja, a time i na multiferoičnost.



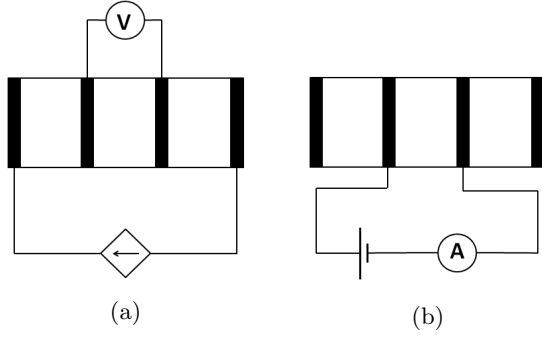
Slika 3: Fotografija uzorka. Keramika $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, $x = 0.7$, zajedno s kontaktima od vodljive srebrne paste. Broj kontakta označen je plavom bojom. Dimenzije uzorka prikazane su crvenom bojom.

II. METODE I UZORAK

Proučavamo materijal $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, $x = 0.7$. Naš uzorak je polikristalna keramika. Uzorak, zajedno s pripadnim dimenzijama, prikazan je na slici 3. Budući da nas zanimaju električna transportna svojstva na uzorak smo stavili kontakte, vidljive na slici 3 zajedno s pripadnim oznakama. Kontakti su anularni, što znači da idu oko uzorka. Načinjeni su od vodljive srebrne paste DuPont 4929N s otapalom heksil-acetat. Poprečni presjek uzorka iznosi $S = 0.4 \pm 0.1 \text{ mm}^2$. Relativna pogreška poprečnog presjeka je velika i iznosi 30% zbog nepravilnog oblika uzorka. Duljina uzorka između unutarnjih kontakata, tj. kontakata 2 i 3, jednaka je $l = 0.8 \pm 0.1 \text{ mm}^2$. U duljini l imamo manju relativnu pogrešku od 10%, čiji je uzrok širina kontakata.

Uzorak postavljamo u kriostat pomoću nosača. Dno nosača sadrži uzorak i nalazi se u kriostatu na niskim temperaturama, dok je vrh nosača izvan kriostata. Uređaji za električna transportna mjerenja povezani su s uzorkom koaksijalnim kabelima koji prolaze kroz nosač. Koaksijalne kabele povezujemo s kontaktima na uzorku zlatnim žicama, promjera $20 \text{ }\mu\text{m}$, i srebrnom pastom.

Otpor uzorka mjerimo metodom četiri kontakta. Metoda je shematski prikazana na slici 4a. U metodi četiri kontakta na vanjske kontakte spajamo izvor istosmjerne struje, a na unutarnje voltmetar. Pretpostavljamo da je ulazni otpor voltmetra puno veći od otpora uzorka. To znači da kroz voltmetar, a time i unutarnje kontakte, ne teče struja. Sva struja teče kroz uzorak. Nemamo pad napona na unutarnjim kontaktima pa voltmetar daje točno pad napona na dijelu uzorka između unutarnjih kontakata. S obzirom da iznos struje znamo metoda četiri kontakata daje nam otpor dijela uzorka između unutarnjih kontakata. Koristimo izvor struje Keithley 6221 dc and ac current source i voltmetar Keithley 2182A nanovoltmeter.



Slika 4: a) Metoda četiri kontakta. Na unutarnje kontakte uzorka spojen je voltmetar, a na vanjske izvor istosmjerne struje. b) Metoda dva kontakta. Na dva kontakta spojeni su u seriju izvor istosmjernog napona i ampermetar.

Podaci o ulaznom otporu voltmetra kažu nam da metodu četiri kontakta možemo koristiti za otpore uzorka manje od $1 \text{ G}\Omega$. Otpor uzorka veći od $1 \text{ G}\Omega$ dovoljno je velik da nezanemariv dio struje teče i kroz voltmetar pa metodom četiri kontakta ne dobivamo točnu vrijednost otpora uzorka. Naime, pad napona desi se i na unutarnjim kontaktima pa voltmetrom ne možemo točno očitati pad napona na uzorku. U slučaju prevelikog otpora uzorka za metodu četiri kontakta prelazimo na metodu dva kontakta, prikazanu na slici 4b, u kojoj na dva kontakta spajamo u seriju izvor istosmjernog napona i ampermetar. Mi smo izvor napona i ampermetar spojili na unutarnje kontakte uzorka. Kako struja teče kroz kontakte metoda nam daje otpor uzorka zajedno s kontaktima. Izvor istosmjernog napona i ampermetar nalaze nam se u kućištu istog uređaja, Keithley 6487 picoammeter/voltage source.

U mjerenju otpora objema metodama željeli smo izbjeći bilo kakve nelinearne efekte. Zato smo napon uvijek držali ispod nekog limita, tipično da električno polje u uzorku bude u mV/cm području. Otpor smo najprije mjerili metodom četiri kontakta prilikom hlađenja uzorka, počevši od 279 K . Na 33 K otpor uzorka postao je veći od $1 \text{ G}\Omega$ pa smo prešli na metodu dva kontakta i nastavili hladiti uzorak. Prilikom grijanja uzorka također smo mjerili otpor. U određenom rasponu temperatura imamo, stoga, otpor izmjeren i prilikom grijanja i prilikom hlađenja. Usporedili smo rezultate i zaključili da se ne razlikuju znatno. U širokom rasponu temperatura također imamo rezultate izmjerene i metodom četiri i metodom dva kontakta. Usporedili smo rezultate i zaključili da se poklapaju ako rezultate dobivene metodom dva kontakta skaliramo faktorom. Jedan mogući razlog za razliku je što u metodi dva kontakta osim otpora dijela uzorka između unutarnjih kontakata mjerimo i otpor samih kontakata. Drugi mogući razlog je drugačiji tok struje u metodi dva kontakta. Otpornost uzorka ρ

računamo iz otpora R dijela uzorka između unutarnjih kontakata prema standardnoj relaciji

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (1)$$

gdje je S poprečni presjek uzorka, a l duljina tog dijela uzorka. Otpornost je, dakle, dobivena kombiniranjem rezultata metode četiri i metode dva kontakta, gdje su rezultati metode dva kontakta skalirani faktorom. U području temperatura od 279 K do 33 K dobivena je iz rezultata metode četiri kontakta, a u području temperatura od 33 K do 4.3 K iz rezultata metode dva kontakta.

Kako bismo dobili kapacitet uzorka vršimo mjerenja koja uključuju izmjeničnu struju. U tim mjerenjima koristimo LCR metar, uređaj koji nameće izmjenični napon različitih frekvencija na kontakte uzorka i mjeri pripadnu kompleksnu impedanciju Z , odnosno kompleksnu admittanciju $Y = 1/Z$. Koristimo LCR metar Keysight E4980 AL, koji omogućuje mjerenje admittancije na frekvencijama izmjeničnog napona od 20 Hz do 1 MHz . LCR metar problem parazitskih kapaciteta, između uzorka s kontaktima i zemlje, rješava tehnikom virtualne zemlje [7]. Za njegov rad potreban je samo jedan par kontakata, ali četiri koaksijalna kabela.

Uzorak zamišljamo kao kondenzator s dielektrikom koji propušta struju, što je prikazano na slici 5a. U skladu s tim, pretpostavljamo da ga možemo predstaviti kao paralelni spoj kondenzatora i otpornika, prikazan na slici 5b zajedno s koaksijalnim kabelima spojenim na njegove kontakte. Iz izmjerenog kapaciteta uzorka možemo izračunati njegovu dielektričnu funkciju ϵ , koja je općenito kompleksna. Izvod se temelji na [8]. Krećemo od Maxwellove jednadžbe

$$\nabla \times \mathbf{H}(t) = \mathbf{j}_f(t) + \frac{\partial \mathbf{D}(t)}{\partial t}, \quad (2)$$

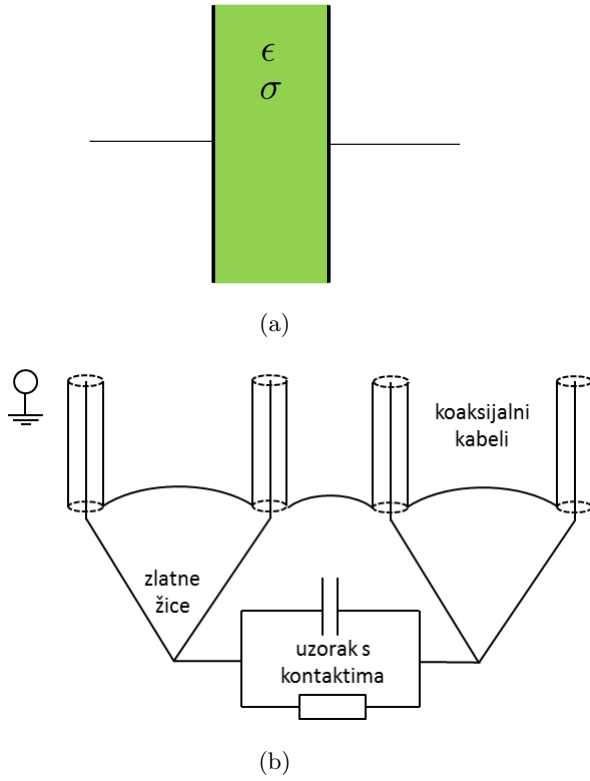
gdje je $\mathbf{H}(t)$ magnetsko polje, $\mathbf{E}(t)$ električno polje, $\mathbf{D}(t)$ vektor dielektričnog pomaka i $\mathbf{j}_f(t)$ struja slobodnog naboja. Prema Ohmovom zakonu imamo proporcionalnost $\mathbf{j}_f(t) = \sigma_0 \mathbf{E}(t)$, gdje je σ_0 vodljivost slobodnog naboja. Promatramo promjenjiva polja frekvencije ω i zapisujemo ih u kompleksnom obliku $\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}e^{i\omega t}$, $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}e^{i\omega t}$ i $\mathbf{D}(t) = \epsilon_0 \epsilon(\omega) \mathbf{E}e^{i\omega t}$, gdje je ϵ dielektrična funkcija, općenito ovisna o frekvenciji ω , i ϵ_0 permitivnost vakuma. Uvrštavamo polja u Maxwellovu jednadžbu (2) i dobivamo

$$\nabla \times \mathbf{H}(t) = (\sigma_0 + i\omega\epsilon_0\epsilon(\omega))\mathbf{E}(t). \quad (3)$$

Vidimo da je ukupna električna struja koja teče kroz mjerni krug $\mathbf{j}(t) = (\sigma_0 + i\omega\epsilon_0\epsilon(\omega))\mathbf{E}(t)$. Prepoznavamo ukupnu kompleksnu vodljivost

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 + i\omega\epsilon_0\epsilon(\omega), \quad (4)$$

u koju je uračunat i dielektrični odgovor tvari. Dielektrična funkcija ϵ po konvenciji zapisuje se na način



Slika 5: a) U mjerenjima koja uključuju izmjeničnu struju uzorak zamišljamo kao kondenzator s dielektrikom koji propušta struju. b) Pretpostavljamo da uzorak možemo predstaviti kao paralelni spoj kondenzatora i otpornika. Na kontakte uzorka zlatnim žicama spojeni su koaksijalni kabeli.

$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$. Relaciju (4) možemo zapisati u obliku

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega) = \frac{\sigma(\omega) - \sigma_0}{i\omega\epsilon_0}. \quad (5)$$

Admitancija Y i vodljivost σ uzorka povezane su geometrijskim faktorom l/S

$$\sigma = \frac{l}{S}Y, \quad (6)$$

gdje je l duljina, a S poprečni presjek uzorka. Admitancija se standardno zapisuje u obliku $Y = G + iB$. Za paralelni spoj kondenzatora kapaciteta C i otpornika otpora R dana je izrazima

$$G(\omega) = \frac{1}{R(\omega)}, \quad B(\omega) = \omega C(\omega). \quad (7)$$

U mjerenjima od izmjerene admitancije uzorka oduzeli smo pozadinu, admitanciju nosača bez uzorka koja je čisto kapacitivna. Pomoću relacije (7) računamo kapacitet i otpor uzorka iz izmjerene admitancije. Uvrštavanjem izraza (7) za admitanciju, preko vodljivosti iz izraza (6), u izraz (5) za dielektričnu funkciju

ϵ dobivamo jednostavnu vezu kapaciteta i realnog dijela ϵ' dielektrične funkcije

$$\epsilon' = \frac{l}{S} \frac{C}{\epsilon_0}. \quad (8)$$

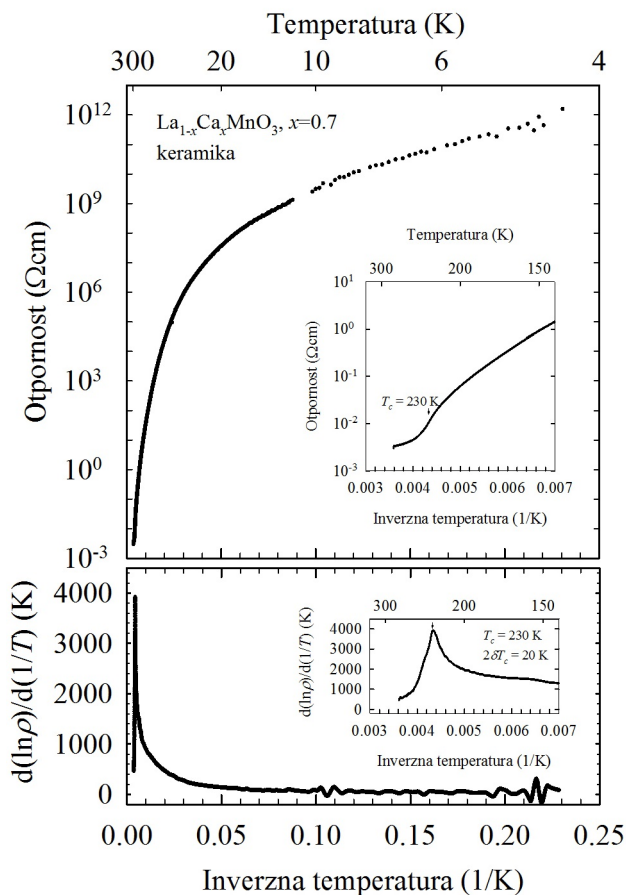
Imaginarni dio ϵ'' nosi informaciju o disipaciji, odnosno otporu, i neće biti diskutiran u ovome seminaru.

U mjerenjima koja uključuju izmjeničnu struju najprije smo LCR metar spojili na vanjske kontakte uzorka i izmjerili admitanciju prilikom hlađenja. Nametnuli smo napon od 50 mV. Dielektričnu funkciju ϵ' izračunali smo prema relaciji (8) iz dobivenog kapaciteta. Dielektrična funkcija i kapacitet razlikuju se, stoga, samo na faktor. Kasnije smo ponovili mjerenja na unutarnjim kontaktima.

Dvokontaktni otpor možemo odrediti i u mjerenjima s izmjeničnom strujom. Dobivamo ga koristeći relaciju (7) iz realnog dijela G izmjerene admitancije. Iz njega možemo saznati nešto više o odnosu uzorka i kontakata. Dobiveni otpor je otpor uzorka zajedno s kontaktima i općenito je ovisan o frekvenciji izmjenične struje. Napraviti ćemo aproksimaciju da je vrijednost otpora na najnižim frekvencijama jednaka statičkoj vrijednosti i od njega oduzeti otpor uzorka iz dc mjerenja. Na taj način dobivamo otpor kontakata. U dc mjerenjima nismo direktno izmjerili otpor uzorka između vanjskih kontakata, ali ga možemo izračunati jednom kad znamo otpornost uzorka na temelju mjerenja otpora između unutarnjih kontakata.

Kako bismo dobili zanimljive informacije o uzorku proučavamo električna transportna svojstva na različitim temperaturama. Zato koristimo kriostat koji nam omogućuje hlađenje uzorka od sobne temperature do 4.2 K. Kriostat se sastoji od dvije staklene boce, stavljene jedna u drugu, s vakumiranim dvostrukim stijenkama za toplinsku izolaciju. U unutrašnjosti bocu ulijeva se tekući helij, a u vanjsku tekući dušik koji koristimo kao izolaciju. Naime, struja topline iz okoline u kriostat proporcionalna je temperaturnom gradijentu. Tako korištenjem boce s tekućim dušikom smanjujemo temperaturni gradijent između tekućeg helija i sobe, a time i grijanje helija.

Za očitavanje temperature uzorka potreban nam je temperaturni senzor. Koristimo otporni temperaturni senzor LakeShore Cernox, koji se nalazi na nosaču pokraj uzorka. Za kontrolirano mijenjanje temperature uzorka potreban nam je grijač uzorka. Kao grijač koristimo žicu od konstantana, koja se također nalazi na nosaču pokraj uzorka. Temperaturni senzor i grijač povezani su koaksijalnim kabelima s temperaturnim kontrolerom izvan kriostata. Koristimo temperaturni kontroler LakeShore 340. On očitava temperaturu i regulira grijač na nosaču. Takav sustav omogućuje kontroliranje brzine grijanja i hlađenja uzorka ili održavanje konstantne temperature. U mjerenjima pazili smo da brzina hlađenja ne bude veća od 30 K/h i da snaga grijača ne bude veća od 0.5 W. Prevelika brzina hlađenja ili prevelika snaga



Slika 6: Otpornost ρ u ovisnosti o temperaturi T te derivacija prirodnog logaritma derivacije po inverznoj temperaturi $d(\ln \rho)/d(1/T)$. Vidimo vrh u derivaciji, širine 20 K, na temperaturi od 230 K, opisan u tekstu.

grijača mogu dovesti do toplinskog naprezanja uzorka, a time i do napuknuća.

III. REZULTATI I DISKUSIJA

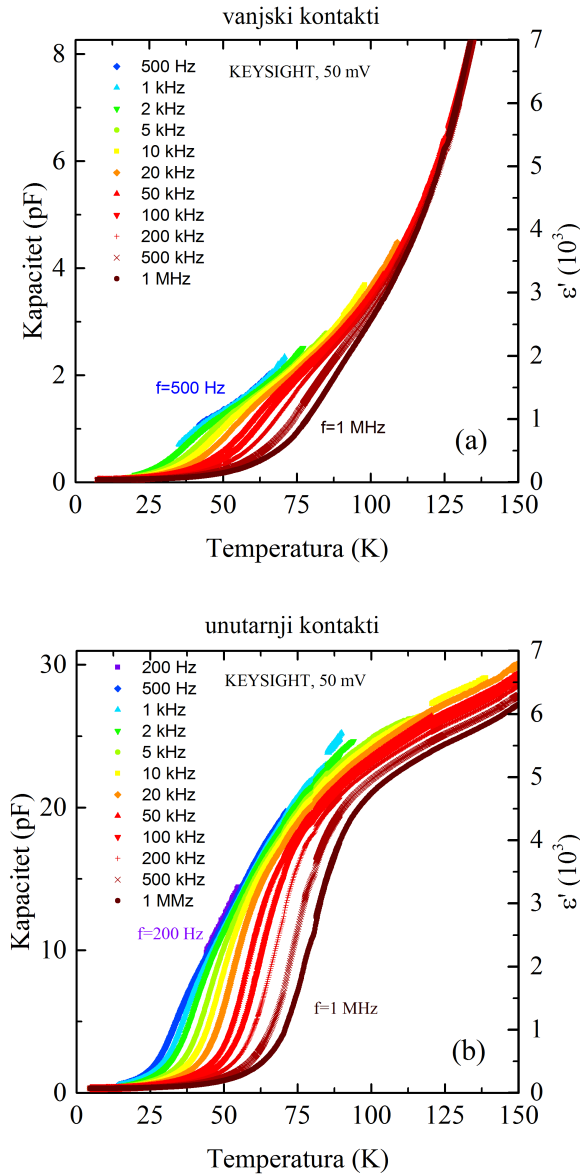
Na slici 6 prikazana je otpornost dobivena mjerenjem otpora uzorka na temperaturama od sobne do 4.3 K. Zanimljivo, dobivena otpornost prolazi čak petnaest različitih redova veličine na mjerenim temperaturama. Umjesto ovisnosti otpornosti ρ o temperaturi T prikazali smo ovisnost logaritma otpornosti $\ln \rho$ o inverznoj temperaturi $1/T$. Takav prikaz naziva se Arrheniusov prikaz i uobičajeno se koristi za prikaz otpornosti izolatora i poluvodiča.

Kada imamo termalna pobuđenja odgovorna za vodljivost Arrheniusov prikaz daje pravac. Na slici 6 također je prikazana derivacija otpornosti u Arrheniusovom prikazu. Dana je derivacija prirodnog logaritma otpornosti po inverznoj temperaturi $d(\ln \rho)/d(1/T)$. U derivaciji

vidimo jasan vrh na temperaturi od 230 K. Širina vrha na pola visine (FWHM) iznosi $2\Delta T_c = 20$ K. Vrhovi u derivaciji mogu se desiti zbog promjene nekog parametra uređenja pa razmatramo je li vrh na 230 K trag nekakvog faznog prijelaza. Temperatura od 230 K u skladu je s uređenjem naboja iz faznog dijagramom na slici 2 ako uzmemo u obzir točnost dijagrama i širinu vrha od 20 K. Vrh je vrlo širok, što upućuje da je i fazni prijelaz širi. Navodimo dva moguća razloga za veću širinu vrha. Prvi je što imamo polikristal za uzorak. Polikristal ima manju uređenost od monokristala, a time i mogući širi fazni prijelaz. Drugi razlog je moguće nehomogeno supstituiranje lantana kalcijem, što opet vodi na manju uređenost i mogući širi fazni prijelaz.

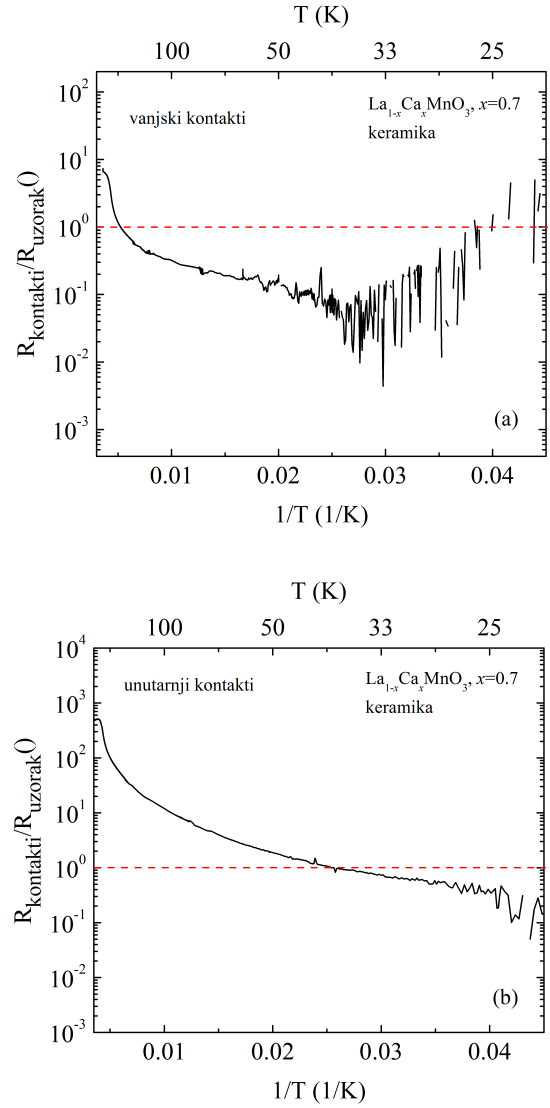
Rezultati za kapacitet uzorka između vanjskih kontakata, zajedno s pripadnom dielektričnom funkcijom, prikazani su na slici 7a. Dielektrična funkcija pokazuje disperziju po frekvencijama u Hz-MHz području, na temperaturama od 25 K do 100 K. Vidimo njezine različite vrijednosti za različite frekvencije izmjeničnog napona. Takvo ponašanje je nekad vidljivo kod feroelektričnih materijala kod kojih je gibanje električnih dipola jako gušeno i naziva se "relaksoru slično ponašanje" [9]. Drugi mogući uzrok frekventne disperzije je da kontakti utječu na uzorak. Naime, moguće je da se formira područje osiromašenja naboja između uzorka i kontakata, što utječe na cjelokupni kapacitet sustava. Utječu li kontakti na uzorak može se provjeriti. Mogu se ponoviti mjerenja, ali s kontaktima od istog materijala i različitim dimenzijama uzorka ili s kontaktima od drugog materijala i istim dimenzijama uzorka. Isli smo ponoviti mjerenja s kontaktima od istog materijala, ali različitim dimenzijama uzorka. Različite dimenzije postigli smo spajanjem LCR metra na unutarnje kontakte uzorka. Rezultati za kapacitet uzorka između unutarnjih kontakata, zajedno s pripadnom dielektričnom funkcijom ϵ' , dani su na slici 7b. Opet vidimo frekventnu disperziju dielektrične funkcije u Hz-MHz području, na temperaturama od 25 K do 100 K. Red veličine dielektrične funkcije između unutarnjih kontakata je isti kao između vanjskih, ali ponašanje je drugačije što sugerira da kontakti utječu na uzorak. Kako bismo saznali više o tome utječu li kontakti na uzorak idući korak je ponoviti mjerenja kapaciteta s kontaktima od drugog materijala. Treći mogući uzrok frekventne disperzije je polarizacija između zrna u keramici. Za to provjeriti potrebno je ponoviti mjerenje kapaciteta s drugim uzorkom gdje bi drugi uzorak imao zrna drukčije veličine. Ukoliko bi se takvim mjerenjima uočilo da uzrok disperzije nije utjecaj kontakta na uzorak ili polarizacija između zrna u keramici moglo bi se ustvrditi da promatrani manganit pokazuje znakove feroelektričnog ponašanja.

Kako bismo dodatno ocijenili utječu li kontakti na mjerenje možemo pogledati omjer otpora kontakata i otpora uzorka. Omjer smo dobili kombiniranjem ac i dc mjerenja. Prikazan je na slici 8a za vanjske i na slici 8b



Slika 7: Kapacitet C uzorka, zajedno s pripadnom dielektričnom funkcijom ϵ' , za razne frekvencije f izmjenične struje. a) LCR metar spojen je na vanjske kontakte uzorka. b) LCR metar spojen je na unutarnje kontakte uzorka.

za unutarnje kontakte. Vidimo kako je otpor kontakata veći od otpora uzorka na višim temperaturama, a manji na nižim. Otpor vanjskih kontakata veći je od otpora uzorka između njih do 200 K, a otpor unutarnjih kontakata veći je od otpora uzorka između njih sve do 40 K. Možemo zaključiti su mjerenja na vanjskim kontaktima kvalitetnija, odnosno sa zanemarivim utjecajem kontakata, i da dielektrična funkcija ϵ' za vanjske kontakte vjerojatno potječe od uzorka, dok za unutarnje veći dio potječe od kontakata.



Slika 8: Omjer otpora kontakata i otpora uzorka dobiven kombiniranjem rezultata ac i dc mjerenja. Crvena crtana linija predstavlja omjer jednak jedinici. a) Omjer otpora vanjskih kontakata i otpora uzorka između njih. b) Omjer otpora unutarnjih kontakata i otpora uzorka između njih.

IV. ZAKLJUČAK

Zanimalo nas je je li manganit $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, $x = 0.7$, multiferoik. Izmjerali smo otpor našeg uzorka, koji je polikristalna keramika, te kapacitet za različite frekvencije izmjenične struje. Otpornost sugerira fazni prijelaz na temperaturi od 230 K. Spomenuti fazni prijelaz u skladu je s uređenjem naboja iz literature. Dielektrična funkcija ϵ' , dobivena iz izmjerenog kapaciteta, pokazuje disperziju po frekvencijama. Ta je pojava karakteristična za neke feroelektrične materijale, ali rezultati sugeriraju određeni stupanj utjecaja kontakata na mjerenje. Da bi-

smo saznali više o uzroku disperzije potrebno je napraviti mjerenja s kontaktima od drugog materijala i istim dimenzijama uzorka te mjerenja s uzorkom koji ima zrna keramike drukčije veličine.

ZAHVALE

Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Tomislavu Iveku na uloženom trudu i prenesenom znanju pri izradi ovog seminara.

-
- [1] N. A. Spaldin et al. *Physics Today* **63**(10), 38 (2010)
 - [2] N. Mathur et al. *Physics Today* **56**(1), 25 (2003)
 - [3] E. Dagotto et al. *Physics Reports* 344 (2001)
 - [4] J. de Groot (2012). *Charge, spin and orbital order in the candidate multiferroic material LuFe_2O_4* (Doktorska disertacija).
 - [5] J. van den Brink et al. *J. Phys.: Condens. Matter* **20** (2008) 434217
 - [6] Neil W. Ashcroft, N. David Mermin *Solid State Physics* Brooks/Cole 1976
 - [7] HP 4284A precision LCR meter operation manual
 - [8] T. Ivek (2004). *Val gustoće naboja u kvazi-jednodimenzionalnim kupratima* (Diplomski rad).
 - [9] M. Pinterić et al. *Phys. Rev. B* **90**, 195139 (2014)