

---

Vladimir Petrović i Aleksandra Mikić

## Ispitivanje osobina piezo kristala i piezo zujalica interferometrijom

---

*U radu je opisano izduženje piezo kristala i piezo zujalica kada se na njih dovede električni napon. Za određivanje izduženja kristala i zujalice za različite napone korišćen je Majkelsonov interferometar. Ogledalo u jednoj grani interferometra je postavljeno na piezo element (piezo kristal ili zujalica), tako da dužina te grane može da se menja. Registrujući promene u interferencionoj slici određeno je izduženje piezo elementa. Za primenjene napone do 5000 V izduženje piezo kristala je oko 900 nm, a kod piezo zujalica 2.5 μm pri naponu od 6 V. Pored merenja izduženja pri primeni određenih napona, nacrtana je histerezisna petlja za oba piezo elementa. Takođe, određeno je vreme relaksacije piezo zujalice kada se sa nje ukloni električno polje odnosno napon.*

---

### Uvod

Piezo-električni efekat je pojava da određeni (tzv. piezo) kristali i keramike stvaraju električni napon ako su izloženi mehaničkom pritisku. Efekat je prvi put otkriven 1880. godine, demonstriranjem na kristalima turmalinu, kvarcu i topazu. Međutim, već tada je uočeno da ne daju svi ispitani kristali isti efekat, i da je kod većine prilično neupotrebljiv. Godinu dana kasnije, 1881. godine, teorijski je predviđeno postojanje obrnutog piezo-električnog efekta, a u narednim godinama vrše se obimna istraživanja na ovom polju.

Piezo kristali imaju veliku primenu u industriji. Još u Prvom svetskom ratu korišćeni su u izgradnji sonara, a za vreme Drugog svetskog rata napravljeni su različiti piezo filteri, upaljači i piezo zujalice, danas veoma korišćene zbog malog napona koji se može na njih dovesti.

Kristalna struktura je karakteristika čvrstih tela, i njena glavna osobina je pravilna struktura atoma ili grupa atoma. Piezo kristali su anizotropni kristali. Odlika anizotropnih kristala je prostiranje različitih osobina duž različitih pravaca kristala. Glavni deo kristalne rešetke jednog piezo kristala predstavlja četvorovalentni metalni jon, uglavnom titanijum ili cirkonijum, u strukturnoj rešetki većih, dvovalentnih jona, kao na primer olova ili barijuma i  $O^{2-}$  jona.

Na temperaturama iznad Kirijeve, piezo kristali imaju pravilno uređenu, simetričnu kristalnu rešetku i postaju izotropni (slika 1A). Na slici 1B je prikazana jedna ćelija piezo kristala koja ima nepravilnu strukturu i dovodi do anizotropnosti kristala. Ovakve osobine piezo kristali imaju na temperaturama ispod Kirijeve. Kako centralni jon titanijuma ili cirkonijuma u ovom slučaju nije u središtu kristalne ćelije, postoji dipolni momenat. Dipolni momenti se nalaze unutar određenih domena (malih prostora) u kome su uniformno raspoređeni, tzv. Weissovi domeni (slika 2A). Postavljanjem u električno polje, dipoli se poravnavaju u pravcu polja, i samim tim se izdužuje ceo piezo kristal duž ose polja.

Obrnuti piezo-električni efekat se javlja samo u određenim pravcima, tj. kristal ne može da se izdužuje u svim pravcima kao što je to slučaj kod elektrostrikcije (deformacije dielektrika u spoljašnjem električnom polju). Uzrok ovome je anizotropnost piezo kristala.

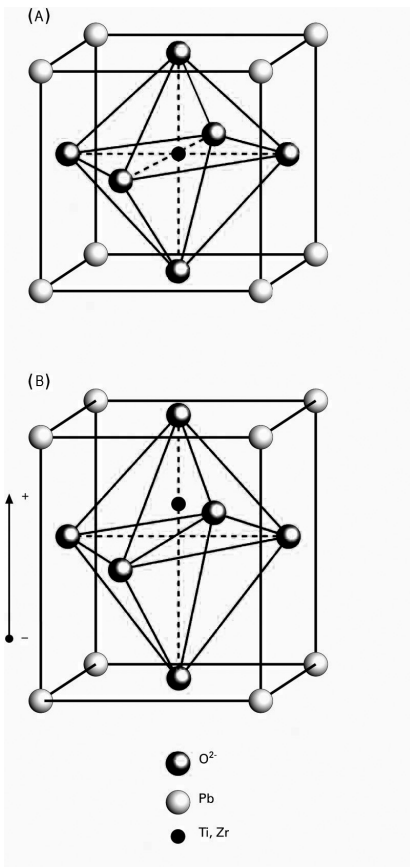
Po isključivanju električnog polja piezo kristal ne povraća u potpunosti svoju prvobitnu strukturu, jer se dipoli zadrže orijentisani u pravcu isključenog polja, tj. kristal sada ima zaostalu polarizaciju (slika 2C). Ova pojava se naziva histerezis. Da bi se dipoli vratili u potpunosti u početni položaj, potrebno je dovesti električno polje suprotnog polariteta ili mehanički vratiti piezo kristal.

---

*Vladimir Petrović (1991), Požega, Miloša Obilića 12, učenik 3. razreda Gimnazije „Sveti Sava“ u Požegi*

*Aleksandra Mikić (1990), Beograd, 10 Avijatičara 21, učenica 4. razreda Šeste beogradske gimnazije*

*MENTOR: mr Aleksandar Krmpot, Institut za fiziku, Zemun*

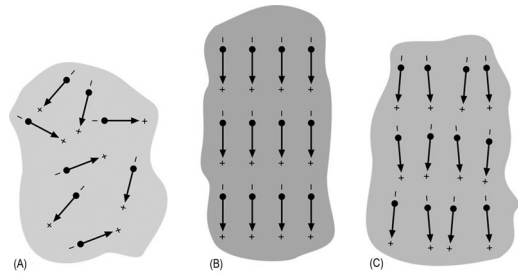


Slika 1. Struktura olovo cirkonata/olovo titanata iznad Kirijeve temperature (A) i ispod Kirijeve temperature (B)

Figure 1. Structure of lead zirconate/lead titanate above Curie point (A) and below Curie point (B)

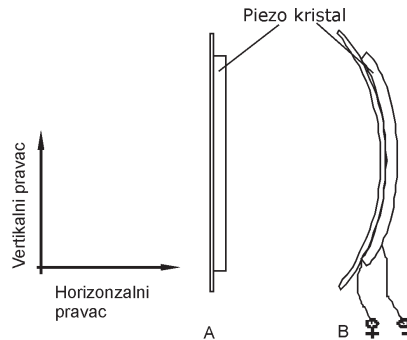
Ovaj proces se može ponoviti više puta, kristalu dovoditi različiti napon, i dobijati različita izduženja.

Piezo kristali se npr. koriste u pravljenju piezo zujalica. Piezo zujalice predstavljaju tanko isečen piezo kristal postavljen na tanku provodnu membranu (slika 3A). Kada se na piezo kristal dovede napon on teži da se izduži u vertikalnom pravcu. Pošto je kristal učvršćen za metalnu ploču on ne može da se izduži u pomenutom pravcu već dolazi do savijanja (slika 3B). Zavisno od konstrukcije, može da se postigne da deformacija u horizontalnom pravcu bude znatno veća nego izduženje samog kristala u vertikalnom pravcu kada bi on bio slobodan. Na ovaj način se uz primenu znatno manjih napona nego kod piezo kristala (za tri reda veličine manjih)



Slika 2. Raspored dipola unutar piezo kristala pre polarizacije električnim poljem (A), za vreme polarizacije (B) po prekidu polarizacije (C)

Figure 2. Distribution of dipoles inside the a piezo element before poarization by electric field (A), during the polarization (B) after the poarization (C)



Slika 3. Piezo zujalica pre (A) i posle dovođenja napona na nju (B)

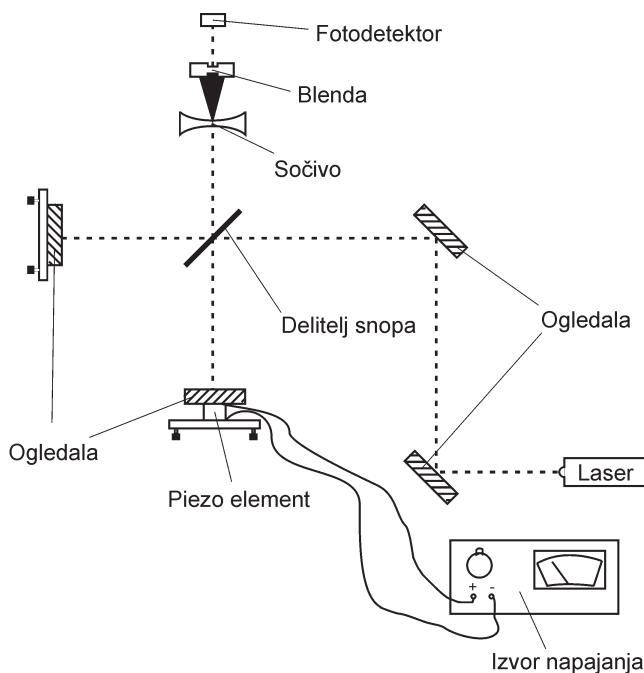
Figure 3. Piezo buzzer before (A) and after polarization (B)

dobija veća mehanička deformacija odnosno pomeranje. Zbog toga se one mnogo masovnije koriste od običnih piezo kristala.

## Aparatura i metod

U eksperimentima su određivane osobine piezo kristala oblika valjka visine 10 mm i prečnika osnove 9.8 mm i piezo zujalice kod koje je piezo element visine 0.82 mm i prečnika 23 mm.

Za određivanje izduženja kristala i zujalice za različite napone korišćen je Majkelsonov interferometar. Ogledalo u jednoj grani interferometra je postavljeno na piezo element (piezo kristal ili zu-



Slika 4.  
Aparatura

Figure 4.  
Instrumental setup:  
(top to bottom)  
left – mirrors;  
center –  
photodetector,  
shutter, lens, beam  
separator, piezo  
element;  
right – mirrors, laser,  
voltage source.

jalica) tako da dužina te grane može da se menja. Šema cele aparature je prikazana na slici 4.

Interferenciona slika kod Majkelsonovog interferometra se menja u zavisnosti od razlike puteva koju svetlost pređe kroz jednu odnosno drugu granu interferometra. Tako ako se piezo element izduži ili skupi za određenu dužinu, razlika puteva se menja, a s njom i interferenciona slika. Postavljeno je sočivo, koje snop širi, a zatim je postavljena blenda kojom se postiže da do detektora dospeva svetlost sa određenog, veoma malog dela interferencione slike. Kako se interferencione pruge pomeraju (jer se menja razlika puteva), intenzitet svetlosti koja dolazi do detektora se menja i zavisi od toga koliko se piezo element izduži. Taj intenzitet je meren fotodetektorom (vatmetrom).

Za piezo kristal je ogledalo lepljeno direktno, dok je za piezo zujalicu ogledalo lepljeno preko držača prečnika 4 mm (slika 5).

### Određivanje zavisnosti izduženja od napona

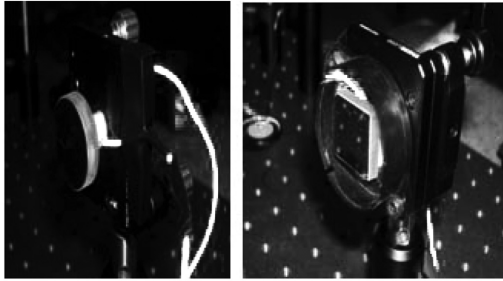
Veza između maksimalnog intenziteta i trenutnog intenziteta izmerenog na fotodetektoru data je formulom:

$$I = I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

gde je  $\delta$  fazna razlika između talasa ( $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} d$ ),  $\lambda$  talasna dužina svetlosti, a  $d$  putna razlika talasa. Kako svetlost prelazi put do ogledala pa nazad putna razlika je duplo veća od pomeraja ogledala, tj. izduženja/skraćenja piezo elementa. Korišćen je zeleni He-Ne laser talasne dužine 543 nm.

Na piezo kristal je dovođen napon do 5000 V i za različite napone je vatmetrom merena snaga svetlosti koja prolazi kroz aperturu. Izmerena snaga je proporcionalna sa intenzitetom  $I$  u formuli (1). Odatle lako može da se nađe fazna razlika i razlika puteva, a samim tim i izduženje kristala.

Jedna od osobina piezo elementa je da imaju histerezis, tj. da se različito izdužuju i skupljaju pri povećanju i smanjenju napona. Dakle, izduženje piezo elementa ne zavisi samo od napona koji se na njega dovodi već i od toga da li se on povećava ili smanjuje. Tako za istu vrednost napona izduženje ima dve vrednosti – jednu prilikom povećavanja, a drugu prilikom smanjivanja napona, naravno u određenom intervalu. Zato je napon na piezo kristalu povećavan do 5000 V i smanjivan unazad i tako se postigla razlika u izduženju i sužavanju.



Slika 5. Ogledalo zalepljeno na piezo kristal (levo) i piezo zujalicu (desno)

Figure 5. The mirror attached to the piezo cristal (left) and the piezo buzzer (right)

Isto ovo je urađeno i za piezo zujalicu, samo što je zbog njenih osobina bio dovoljan znatno manji napon nego kod piezo kristala da bi se postiglo isto izduženje.

## Merenje vremena relaksacije

Vreme relaksacije predstavlja vreme za koje se piezo zujalica vrati u početno stanje po isključenju napona. Naime, kada se napon isključi, dipoli u piezo kristalu zujalice se vraćaju u neravnomeran raspored, a i sila elastičnosti membrane za koju je zalepljen tanak piezo kristal vuče zujalicu da se vrati u početni položaj. To vraćanje traje vrlo kratko, reda 100 ms.

Na piezo zujalicu je dovođen pravougaoni signal s tim da se napon periodično menjao od 0 do 80 V. Na mesto fotodetektora postavljen je fotootpornik redno povezan sa običnim otpornikom od 1 k $\Omega$  i izvorom jednosmernog napona. Otpor fotootpornika zavisi od intenziteta svetlosti koja pada na njega pa se napon na njemu menja jer u kolu postoji još jedan redno vezan otpornik.

U zavisnosti od izduživanja zujalice, menja se i intenzitet svetlosti koja kroz blendu stiže do fotootpornika, a sa njim i napon na otporniku koji se registruje osciloskopom. Kada napon na piezo zujalici padne sa 80 na 0 V, intenzitet svetlosti koja pada na fotootpornik se menja određeno vreme, jer se zujalica vraća u stanje pre izduženja. Kada se vrati u to stanje, intenzitet svetlosti postane stalan, a napon na fotootporniku prestaje da se menja.

Na jedan kanal digitalnog osciloskopa je dovođen napon na zujalici, a na drugi napon na fotoot-

porniku i tako je dobijen grafik zavisnosti napona na piezo zujalici i napona na fotootporniku od vremena. Na grafiku se uočava gde se napon na fotootporniku ustalio, tj. gde je prekinuo da se menja.

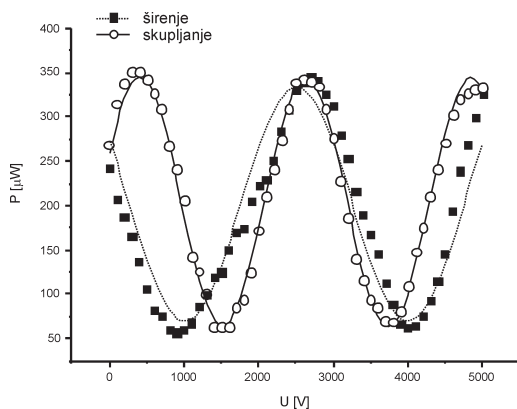
## Rezultati

### Izduženje piezo kristala u zavisnosti od napona koji se dovodi na njega

Pri naponu od 5000 V ukupno izduženje kristala iznosilo je (890 $\pm$ 20) nm. Dobijena zavisnost intenziteta svetlosti od napona može se videti na grafiku na slici 6.

### Histerzis piezo kristala

Uz pomoć podataka o intenzitetu svetlosti pri određenim naponima (slika 6), koristeći jednakost (1) određena je zavisnost izduženja piezo kristala od napona, tj. pri kojim naponima se javlja koje izduženje kristala i tako dobijen grafik zavisnosti izduženja od napona (histerzisna petlja). Na grafiku (slika 7) nije prikazana cela histerzisna petlja već samo deo, jer su ispitivani naponi samo do 5000 V. Neposedovanje generatora većeg napona je onemogućilo dobijanje cele histerzisne petlje. Međutim, iako nije dobijena cela histerzisna petlja, dobijen je veći njen deo. Najizraženiji histerzis je pri naponu



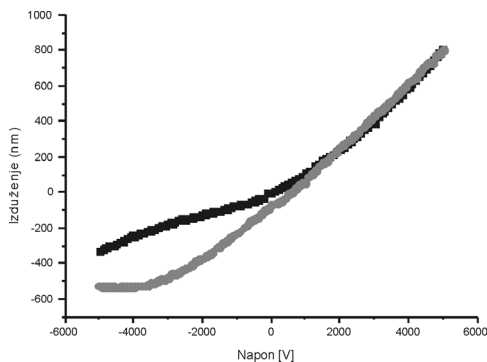
Slika 6. Zavisnost intenziteta svetlosti koja kroz aperturu stiže do detektora od napona na piezo kristalu

Figure 6. Dependence of the light intensity reaching the detector through the aperture versus voltage on the piezo crystal (square: elongation; circle: relaxation)

od  $-3200$  V gde je razlika u pomerajima pri izduženju i skupljanju  $(300 \pm 20)$  nm.

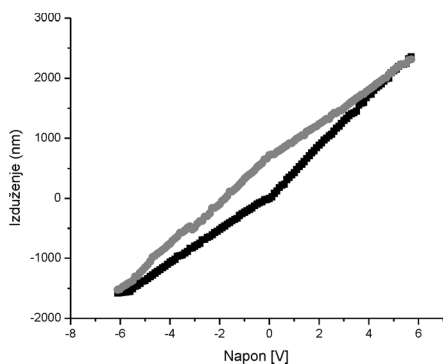
## Histerezis piezo zujalice

Na slici 8 prikazana je potpuna histerezisna petlja piezo zujalice. Pri naponima već od  $6$  V dobijeno je izduženje  $(2480 \pm 20)$  nm. Dobijena je histerezisna petlja koja je najšira oko nule i razlika u pomerajima na  $0$  V iznosi  $(720 \pm 20)$  nm.



Slika 7. Zavisnost izduženja piezo kristala od napona na njemu (deo histerezisne petlje)

Figure 7. Dependence of the piezo crystal elongation versus applied voltage (part of the hysteresis bowline)



Slika 8. Zavisnost izduženja piezo zujalice od napona na njoj (histerezisna petlja)

Figure 8. Graph representing elongation of piezo buzzer versus applied voltage (the hysteresis bowline)

## Vreme relaksacije piezo zujalice

Na digitalnom osciloskopu dobijena je promena napona sa vremenom na piezo zujalici i fotootporniku (slika 9). Osciloskop je bio podešen na naizmenično (AC) sprezanje tako da je signal zbog prolaska kroz filter niskih učestanosti donekle izobličen. Oscilacije signala oko nule u ovom slučaju predstavljaju oscilacije oko neke konstantne vrednosti napona.

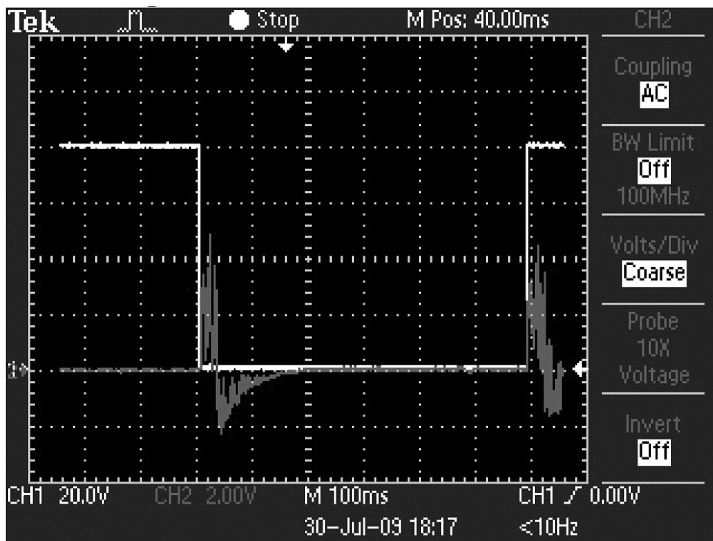
Na horizontalnoj osi na grafiku sa slike 9 je vreme, a na vertikalnoj napon. Bela linija predstavlja napon dovoden na zujalicu (jedan veliki podeok iznosi  $20$  V), a siva napon na fotootporniku (jedan veliki podeok iznosi  $2$  V). Jedan veliki podeok na horizontalnoj osi iznosi  $100$  ms.

Na grafiku na slici 9 se može primetiti da se napon skoro ustalio na nekoj vrednosti i vrlo malo se menja. Uzrok promenama mogu biti bilo koje male promene u intenzitetu svetlosti koje mogu biti prouzrokovane fluktuacijama snage lasera, ako npr. čestica prašine naleti na laserski snop i sl. Tako je na grafiku označena linija 1 koja predstavlja približnu vrednost ustaljenog napona (slika 10). Na grafiku je debljina linije koja predstavlja ustaljenu vrednost napona iznosila  $3-5$  piksela, pa je za debljinu ove linije uzeto  $3$  piksela. Trenutak u kome se smatra da je napon prestao da se menja je uzet u tački u kojoj prvi put siva linija seče liniju 1. Ta tačka preseka se nalazi u preseku linije 1 i linije 2 koja je nacrtana radi lakšeg određivanja vremena koje je proteklo između pada napona na zujalici i ustaljenja napona na fotootporniku. Kako jedan mali podeok (mali podeoci su označeni tačkama) iznosi  $20$  ms, za vreme relaksacije se dobija  $150$  ms. Greška za vreme relaksacije iznosi veličinu jednog malog podeoka, pa je, konačno, vreme relaksacije piezo zujalice  $(150 \pm 20)$  ms.

Primećeno je da amplituda napona koja se dovodi na zujalicu ne utiče znatno na vreme relaksacije. Njen uticaj se svodi i na opseg greške.

## Diskusija i zaključak

Histerezisna petlja zujalice je najšira oko nule što pokazuje da se ona isto ponaša pri dovodenju različitih polariteta, tj. i pozitivnog i negativnog napona, samo što se izdužuje/skuplja u suprotnim smerovima. Međutim, histerezisna petlja piezo kristala je pomerena, tj. nije najšira oko nule, već pri naponu od  $-3200$  V. Ovo pokazuje da se kristal različito po-

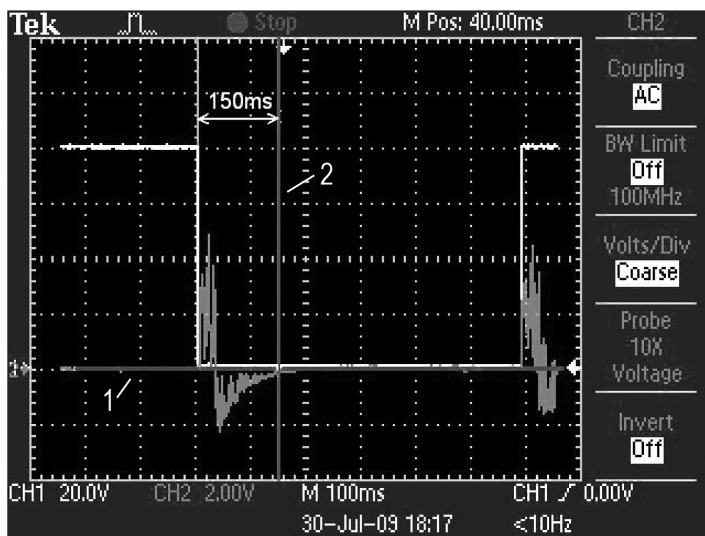


Slika 9.

Zavisnost napona na piezo zujalici i napona na fotooptorniku od vremena. Bela linija je napon na piezo zujalici, a siva na fotooptorniku.

Figure 9.

Dependence of voltage on the piezo buzzer and voltage on the photoresistor versus time. The white line is voltage on the piezo buzzer and the gray line is voltage on the photoresistor.



Slika 10.

Grafik na kome je određeno vreme relaksacije piezo zujalice. Linija 1 predstavlja približnu ustaljenu vrednost napona, a linija 2 prolazi kroz tačku koja je uzeta za trenutak posle koga se napon više ne menja.

Figure 10.

Graph determining the piezo buzzer's relaxation time. Line 1 represents the approximate value of voltage which is no longer changing. Line 2 passes through the point which is taken as the moment after which there is no change in voltage.

naša pri dovođenju različitih polariteta. Tačnije, može više da se skupi pri dovođenju napona jednog polariteta, nego da se raširi pri dovođenju istog napona suprotnog polariteta. Postoji mogućnost da pri pravljenju piezo kristala nije pogodan pravac u kome se on pravilno izdužuje, već je on malo pomeren, pa se zbog toga dipoli postavljaju različito pri dovođenju napona suprotnih polariteta i tako utiču na izduženja.

Na grafiku na kom je prikazana histerezisna petlja zujalice, vidi se da pri vrednostima bliskim 6 i

-6 V postoji par zajedničkih tačaka, ali ne u onoj meri koja postoji kod kristala. Prvobitna ideja je bila da se zujalica dovede do većeg napona, da bi se dobilo više preklopnih tačaka, kao kod piezo kristala. Međutim, prilikom rada uočeno je da pri vrednostima većim od 6 V, nije moguće odrediti intenzitet svetlosti, tačnije bio je nečitljiv sa detektora. Pretpostavka je da pri određenim naponima dolazi do zasićenja piezo zujalice, tj. zujalica više ne može da se izduži. Pri kom naponu će doći do zasićenja zavisi verovatno od dimenzija zujalice, rasporeda atoma u

kristalnoj rešetki. Dokaz da je sigurno došlo do zasićenja zujalice je i vreme relaksacije koje se za vrednosti napona veće od 6 V vrlo malo menja. Nije uočeno da vreme relaksacije raste sa naponom u pomenutom intervalu, već je ono skoro konstantno. Zasićenje se nesumnjivo javlja kod svih zujalica zbog nemogućnosti da se više istegnu pri određenom intenzitetu napona. U daljem istraživanju bi se mogle ispitivati karakteristike zujalice koje utiču na zasićenje. Zasićenje se sigurno javlja i kod piezo kristala, ali pri bitno većim naponima od onih koji su primenjivani, pa se ono, u ovom slučaju, nije moglo uočiti.

Radi dobijanja potpune histerezijsne petlje kod piezo kristala trebalo bi ponoviti ovaj ogled koristeći izvor većeg napona.

Prilikom izvođenja eksperimenata veliki uticaj na rezultate je imalo okruženje. S obzirom da se radilo sa veoma osetljivom aparaturom, i male vibracije mogle su da se vide na mernim aparatima i imale su uticaj na merenje. Uticaj tih vibracija se može primetiti u greškama dobijenih vrednosti.

**Zahvalnost.** Zahvaljujemo se mentoru, mr Aleksandru Krmpotu, na strpljenju i pruženoj pomoći, kao i Aleksandri Alorić i Jeleni Pajović, studentima Fizičkog fakulteta u Beogradu, i Nikoli Veličkoviću, studentu Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, na pomoći tokom realizacije eksperimenata.

## Literatura

Nedeljković N. 2009. *Talasi i optika*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet

Wottawa C. 2000. *Measuring Nanometer Displacements of Piezoelectric Transducers with*

*an Optical Ruler*. New York: Laser Teaching Center

<http://www.physikinstrumente.com/tutorial/index.htm>

[http://www.americanpiezo.com/piezo\\_theory/piezo\\_theory.pdf](http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/piezo_theory.pdf)

---

*Vladimir Petrović and Aleksandra Mikić*

## Examination of Piezo Crystal and Piezo Buzzer Properties Using Interferometry

In this paper we describe the elongation of the piezo crystal and the piezo buzzer when certain voltage is applied. The Michelson interferometer was used for measuring the elongations. The mirror in one arm of the interferometer was attached to the piezo element (piezo crystal or buzzer), so that the length of the arm could be easily varied. The elongation of the piezo element was evaluated by registering changes of the interference pattern.

The elongation of the piezo crystal was approximately 900 nm for voltage up to 5000 V, while for the piezo buzzers it was around 2.5  $\mu\text{m}$  at 6 V.

The hysteresis bowlines for both elements are presented. Also, the relaxation time of the piezo buzzer after it is removed from the electrical field is determined.

