

PIEZOELEKTRIČNOST

Uvod

Kristali v feroelektričnem stanju so tudi piezoelektrični: mehanska obremenitev spremeni električno polarizacijo, in obratno, zunanje električno polje, v katerem je kristal, povzroči deformacijo kristala. Vzrok za to je sklopitev med mehansko in električno energijo kristala. Navedimo nekaj primerov piezoelektričnih kristalov, ki so feroelektriki: barijev titanat (BaTiO_3), rošelska sol (natrijev kalijev tartrat) in triglicinsulfat. Piezoelektrični pa so tudi neferoelektrični kristali, npr. kremen (SiO_2). Piezoelektrični efekt dobimo pri kristalih, ki nimajo centra simetrije. V praksi pogosto srečujemo podskupino piezoelektrikov imenovana piroelektriki, ki pa imajo polarno os in njihova polarizacija je temperaturno odvisna.

Piezoelektriki se odzovejo na deformacijo s polarizacijo snovi. Lokalno deformacijo povzročeno v neki točki s silo $d\vec{F} = (dF_i) i = 1, 2, 3$, podamo z napetostnim tenzorjem T_{ij} $i, j = 1, 2, 3$, definiranim kot

$$T_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{dF_i}{dS_j} + \frac{dF_j}{dS_i} \right),$$

kjer so dS_i $i = 1, 2, 3$ tri med seboj pravokotno-orientirane površine delovanja sile $d\vec{F}$.

Elemente tenzorja T_{ij} , ki so v splošnem odvisni od pozicije v kristalu, dobimo tako: izberemo majhno ravno ploskvico velikosti dS , tako da je njena normala orientirana v določeno smer. Na tej ploskvici deluje en del kristala na drugega z majhno silo dF , katere smer se v splošnem ne ujema s smerjo normale na ploskvico. V izbranem koordinatnem sistemu postavimo na izbranem mestu v kristalu tri ploskvice, tako da so njihove normale vzporedne s koordinatnimi osmi. Te ploskvice označimo z dS_x , dS_y in dS_z : npr. ploskvica dS_x je pravokotna na os x . Na vsaki od treh ploskvic deluje en del kristala na drugega s silo, ki ima komponente v smeri vseh treh osi. Pri oznaki komponente tenzorja T_{ij} pomenita indeksa po eno od treh koordinat, npr. T_{xy} . Odvod sile po ploskvi v izrazu za T_{ij} , npr. dF_x/dS_y , pomeni količnik med komponento x sile, ki deluje na ploskvico z normalo v smeri osi y , ter velikostjo te ploskvice.

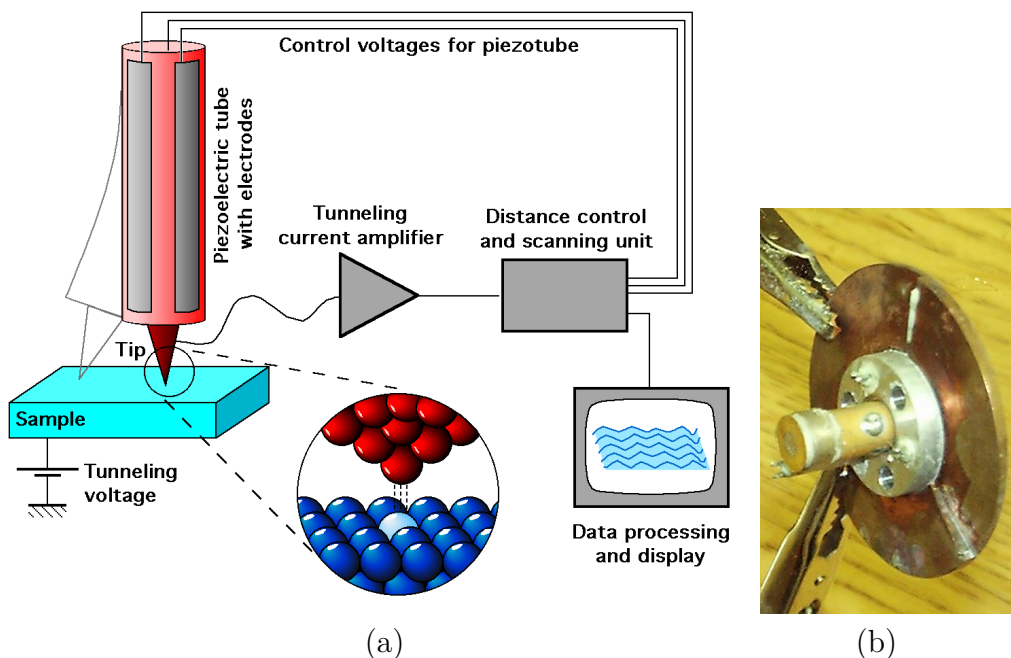
Pri piezoelektrikih je zveza med polarizacijo kristala \vec{P} in mehansko napetostjo T_{ij} linearna in v splošnem določena s tenzorjem 3. reda:

$$P_i = d_{ijk} T_{jk}.$$

Pri tem upoštevamo Einsteinovo konvencijo, da na desni strani enačbe seštevamo po ponavljajočih indeksih j in k .

Elemente tenzorja d_{ijk} imenujemo "piezoelektrični moduli". Praktično jih merimo v izbranih smereh kristala. Električni naboj merimo na izbrani ploskvi, mehanska obremenitev pa je lahko tlak na ploskev, upogib ali torzija. Kot piezoelektrik največkrat uporabljamo kvarc v obliki ploščic ali piezoelektrično keramiko, navadno v obliki ploščic, polarizirano pravokotno na ploskev (svinčev cirkonijev titanat PbZrTiO_3). Piezoelektrične materiale uporabljamo za merjenje sprememb tlaka in sil, kot mikrofone in generatorje ultrazvoka. Piezoelektriki so pomembni tudi pri delovanju sodobnega vrstičnega tunelskega mikroskopa (angl. scanning tunneling microscope - STM), katerega shema je

prikazana na sliki 1.a. S takim mikroskopom lahko "otipamo" relief in atomsko zgradbo površin raznih materialov. Bistveni del mikroskopa je tanka kovinska igla na koncu piezoelektrične cevke opremljene z elektrodami. S pomočjo napetosti na elektrodah lahko cevko, ki je prikazana na sliki 1.b, nekoliko upogibamo in ji spreminjamo dolžino ter tako določamo položaj igle.



Slika 1: Shematični prikaz vrstičnega tunelskega mikroskopa, iz vira [1], in piezoelektrična cevka, ki je vidna v sredini skenerja. Na koncu cevkice je zlata ploščica, na katero se z magnetom pritrdi kovinska konica s katero tipamo površino, iz vira [2].

V praktikumski vaji bomo izmerili piezoelektrični odziv ploščice iz piezoelektrične keramike. Shema meritve je prikazana na sliki 2. V primeru piezoelektrične keramike ima tenzor d_{ijk} tri neodvisne elemente. To so d_{131} , d_{311} in d_{333} , če je os z izbrana vzporedno z začetno polarizacijo keramike. V našem primeru s silo \vec{F} , pravokotno na ploskev S , ustvarjamo (tlačno) napetost $T = T_{33} = F/S$ in povzročimo nastanek polarizacije $P_3 = dT$. V snovi vzdolž z -smeri velja med polarizacijo P_3 in gostoto električnega polja D naslednja zveza

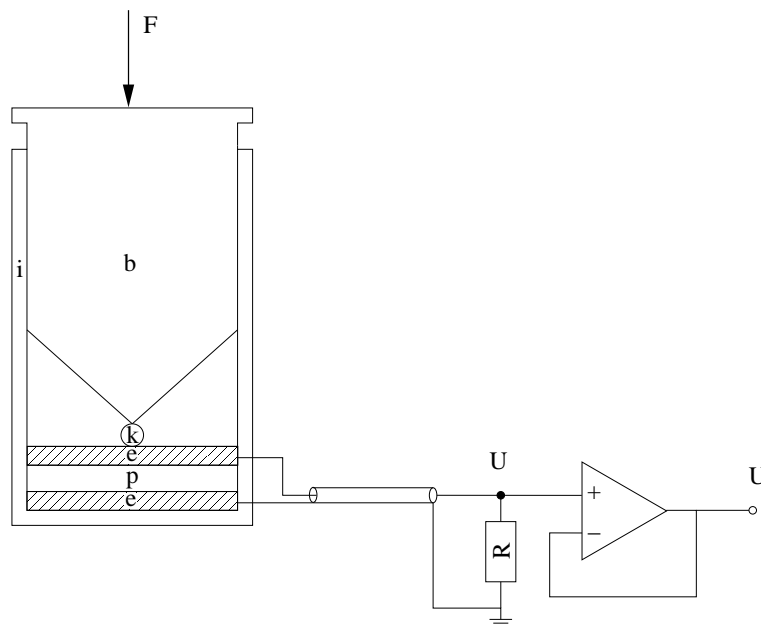
$$D = \epsilon\epsilon_0 E + dT$$

kjer je ϵ dielektrična konstanta piezoelektrika pri konstantni napetosti in temperaturi in $d = d_{333}$. Naboj na eni ploskvi kondenzatorja oz. ploščice keramike je $q = DS$ in z upoštevanjem povezave med električno jakostjo in napetostjo $E = U/b$ dobimo, da je naboj

$$q = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{b} U + dF.$$

Opazimo, da je prvi člen le drug način, da napišemo naboj na ploščatem kondenzatorju ploščine S in debeline b s kapaciteto

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{b}. \quad (1)$$



Slika 2: Shema meritve. V valjasti posodi iz izolacijskega materiala (i) je okrogla plošča iz piezokeramike (p) s premerom = 38 mm in debelino = 6,5 mm med dvema elektrodama (e), od katerih je spodnja ozemljena. Sila F se prenaša preko bata (b) in kroglice (k) na piezoelektrik. Napetost merimo preko operacijskega ojačevalca.

Z upoštevanjem tega naboja na kondenzatorju izrazimo kot

$$q = CU + dF . \quad (2)$$

Kondenzator se prazni preko upornika R s tokom $I = -\dot{q}$. Upor R je v našem primeru enak $5 \text{ G}\Omega$. Kot je prikazano na sliki 2, padec napetosti na uporniku

$$U = RI = -R\dot{q} , \quad (3)$$

spremljamo na osciloskopu preko povratno vezanega operacijskega ojačevalca (angl. voltage follower). Iz enačb (2) in (3) dobimo diferencialno enačbo za časovni potek napetosti

$$\dot{U} = -\frac{1}{\tau}U - \frac{d}{C}\dot{F} \quad (4)$$

pri čemer uvedemo časovno konstanto $\tau = RC$. Sedaj obravnavajmo oba predvidena scenarija spremembe napetosti na kristalu, za katere je

$$F_s(t) = F_0\theta(st) , \quad (5)$$

kjer je F_0 teža uteži, predznak $s = +$ pa ustreza obremenjevanju in $s = -$ razbremenjevanju kristala. Tukaj uporabimo še enotsko stopnico definirano kot

$$\theta(t) = \begin{cases} 1 & : t > 0 \\ 0 & : \text{sicer} \end{cases} .$$

Sedaj vstavimo časovni potek sile (5) v enačbo za napetost (4) in jo rešimo pri začetnem pogoju $U(0^-) = 0$. Z uvedbo konstante $U_0 = -dF_0/C$ dobimo rešitev

$$U_s(t) = sU_0e^{-t/\tau} , \quad (6)$$

veljavno za $t > 0$. Opazimo, da je pri obremenjevanju in razbremenjevanju skok napetosti v nasprotnih smereh.

Za opazovanje počasnih pojavov je smiselno uporabiti osciloskop s pomnilnikom. Taki osciloskopi (Digital Oscilloscopes) v zadnjih desetih letih vedno bolj izpodrivajo klasične analogne. Njihova velika prednost je tudi v tem, da lahko rezultate meritve preko ustreznega vmesnika prenesemo na računalnik za kasnejšo obdelavo ali rezultate shranimo. V praktikumu imamo zaenkrat preko vmesnika priključen tiskalnik, na katerega lahko prenesemo sliko z zaslona.

Potrebščine

- merilna valjasta posoda s piezoelektrično keramiko
- elektrometrski ojačevalnik z baterijskim napajanjem
- digitalni osciloskop Tektronix TDS 1002 z zunanjo spominsko kartico
- tiskalnik
- uteži za 200g, 500g in 1kg.

Naloga

1. Izmerite dielektrično konstanto vzorca iz piezoelektrične keramike.
2. Izračunajte piezoelektrični koeficient keramike.

Navodilo

Preberite navodila za ravnanje z osciloskopom. Preizkusite delovanje osciloskopa v različnih načinih, analognem in digitalnem! Pazite tudi, da je vhod osciloskopa nastavljen na DC sklopitev. Osciloskop nastavite na način časovnega merjenja napetosti. Na osciloskopu opazujte najprej signal, ki ga direktno daje piezoelektrična ploščica. Opazili boste, da lahko piezoelektrična ploščica deluje kot mikrofona ali merilnik tresljajev klopi. Opazujte značilne odzivne čase. Poskušajte tudi izmeriti odziv po tem, ko piezoelektrik obremenite z utežjo.

Povežite izhod elektrometrskega ojačevalnika z osciloskopom. Eno od treh uteži postavite na ploščo merilnika in opazujte časovni signal na osciloskopu. Nastavite ustrezno časovno (os osciloskopa) in napetostno skalo (os). Sliko posnemite potem, ko najprej počakate, da dosežete stacionarno stanje. Nato zelo previdno obremenite keramiko, da kar se da zmanjšate začetno nihanje napetosti. S pritiskom na RUN/STOP ustavite zajemanje in graf premaknite na željeno mesto. Izberite si najbolj primeren način

Tiskanje meritev. Priporoča se, da grafa dobljena pri obremenjevanju in razbremenjevanju posnamete na isti ekran. To storite tako, da si dobljen graf po ustavitvi zajemanja shranite na interni spomin. Graf shranite tako, da pritisnete **SAVE/REC** in nato nastavite z gumbi ob ekranu **Actions** na **Save Waveform** in referenco **REF A** ali **REF B**, kamor želite shraniti graf. V vsako referenco se lahko shrani en graf. Z gumbom ob spodnjem kotu ekrana shranite graf. Ko sta oba grafa, za obremenjevanje in razbremenjevanje, shranjena pod referencama, ponovno pritisnite na gumb **SAVE/REC** in izberite pod **ACTION** opcijo **DISPLAY REFS**, ki vam prikaže vse shranjene reference na ekran in jih lahko s pritiskom na gumb **PRINT** stiskate.

Shranjevanje rezultatov na spominsko kartico. Spominsko kartico "Compact Flash Card QPI" vstavite v režo osciloskopa "Tektronix TDS 1002", vrhu naprave takoj za držalom. Graf shranite na spominsko kartico tako, da pritisnete **SAVE/REC** in nato nastavite z gumbi ob ekranu **Actions** na **Save Waveform**, referenco na **File** in **Source** na **CH1**. Pod **Select Folder** si lahko na kartici ustvarite novo mapo z **New folder** in se premaknete vanj s **Change folder**. Graf se s pritiskom na gumb ob ekranu **Save** shranite v tekstovno datoteko z imenom **TEKXXXX.CSV**, kjer **XXXX** predstavlja zaporedno številko datoteke v izbrani mapi. Točke s ekrana so zaporedoma od leve proti desni shranjene vsak v svojo vrstico, pri čemer sta podatka z osi x in z osi y ločena z vejico, kot to narekuje format **CSV** [3]. Ko zaključete s shranjevanjem, s pritiskom na gumb ob reži izvržete spominsko kartico. Le-to preko priloženega bralnika priključite na port **USB** računalnika in jo s strani računalnika uporabljate kot tipični zunanji disk.

A. Iz grafov za časovno odvisnost napetosti izračunajte časovno konstanto (ta bi morala biti enaka za vse signale). To lahko naredite na dva načina. Po prvem načinu pri času t_1 potegnite tangento na krivuljo in odčitajte, kje seka vodoravno os (čas t_2). Časovna konstanta je $\tau = t_2 - t_1$. Prepričajte se o tem z odvajanjem enačbe (6) po času. Ta način določitve časovne konstante ni najbolj natančen, saj je precej subjektivno, kako bomo potegnili tangento na krivuljo.

Pri drugem načinu izberite poljubni točki na krivulji, odčitajte časovni razmik med točkama $\Delta t = t_2 - t_1$ in količnik napetosti $U(t_2)/U(t_1)$, ki pa je z uporabo enačbe (6) dan s formulo

$$\frac{U(t_2)}{U(t_1)} = e^{-\Delta t/\tau}.$$

Od tod lahko izračunamo τ . Primerjajte rezultat za oba načina. Z uporabo relacije $\tau = RC$ in enačbe (1) s pomočjo pridobljene časovne konstante τ izračunajte kapaciteto kondenzatorja in dielektrično konstanto piezoelektrika ε .

B. Narišite graf začetnega skoka napetosti $U(t = 0)$ v odvisnosti od obremenitve keramike F , tako da razbremenitev upoštevate kot negativno (tlačno) napetost. Nazadnje izračunajte še piezoelektrični koeficient d po enačbi (2).

Premislite delovanje ojačevalca, ki ima v našem primeru vlogo sledilca napetosti (ang. voltage follower). **Po končani vaji izklopite napajanje ojačevalnika, da se baterije ne izpraznijo!**

Literatura

- [1] Wikipedia, Scanning tunneling microscope
http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope
- [2] R. Žitko, *Skenirni tunelski mikroskop razvit na oddelku F5, Instituta Jozef Štefan*
- [3] Wikipedia, Comma-separated values
http://en.wikipedia.org/wiki/Comma-separated_values