Feroeletričnost - histerezna krivulja

Uvod

V zunanjem električnem polju se dielektrični materiali polarizirajo, tako da za celotno gostoto električnega polja $\vec{D}$ v snovi velja naslednja enačba

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E},$$

kjer je $\varepsilon_0 = 8.86\,\mathrm{pFm^{-1}} = 8.86\,10^{-12}\,\mathrm{AsV^{-1}m^{-1}}$ influenčna konstanta, $\vec{E}$ je jakost električnega polja in $\vec{P}$ polarizacija snovi (volumska gostota dipolnega momenta). Odziv snovi torej opiše (relativna) dielektrična konstanta ε, ki je v splošnem tenzor drugega ranga, mi pa se bomo zanimali le za eno komponento, ki opisuje odziv snovi vzdolž polarne osi in jo bomo enostavno označili z ε.

Dielektrična polarizacija je v večini izolatorjev majhna zato je ε v kristalih tipično od 2 do 5. V polarnih tekočinah, kakršna je voda, se pri nizkih frekvencah električnega polja molekule lahko obračajo in s tem povečajo inducirano polarizacijo. Voda ima tako pri nizkih frekvencah dielektrično konstanto okoli 80.

Poznamo pa snovi, ki se na zunanje električno polje odzivajo z mnogo večjo polarizacijo. Te snovi imajo lahko makroskopsko polarizacijo tudi v odsotnosti zunajega električnega polja. Po analogiji s feromagneti - ti so poznani že iz antike, kompas pa je znan približno 900 let - so te snovi, ki so jih odkrili šele v dvajsetih letih prejšnjega stoletja, poimenovali feroelektriki. (Omenimo naj, da poznamo tudi feroelastične materiale.) Analogija med feromagneti in feroelektriki gre daleč in tako lahko tudi v feroelektrikih opazujemo nelinearno odvisnost polarizacije od zunanjega električnega polja, to je histerezno krivuljo. Enako kot feromagnetni materiali ob segrevanju pri ustrezni *t.i. Curiejevi temperaturi* T_C preidejo v paramagnetno fazo, se tudi feroelektriki običajno pri višjih temperaturah spremenijo v paraelektrike in temperaturo faznega prehoda tudi imenujemo Curiejeva temperatura. Feroelektričnost najdemo pri kristalih z ustrezno nizko simetrijo, pravimo jim polarni kristali. Ti kristali nimajo centra inverzije. Ni pa ta pogoj dovolj za pojav feroelektričnosti (obstajajo še drugi simetrijski pogoji). Feroelektrični kristali so podvrsta piroelektričnih in sicer tistih, pri katerih je možno smer polarizacije obrniti z zunanjim električnim poljem.

Osnovna karakteristika feroelektrikov je feroelektrična histerezna zanka, kakršno kaže slika 1, ki opisuje nelinearno odvisnost polarizacije materiala od zunanjega električnega polja. Histerezna krivulja ima v različnih materialih različne oblike. Slika 1 kaže tako imenovano nasičeno histerezno zanko, kakršno dobimo če uporabimo pri meritvi dovolj visoko električno polje (vsaj dvakrat večja od koercitivnega električnega polja E_c). V taki histerezni krivulji lahko določimo:

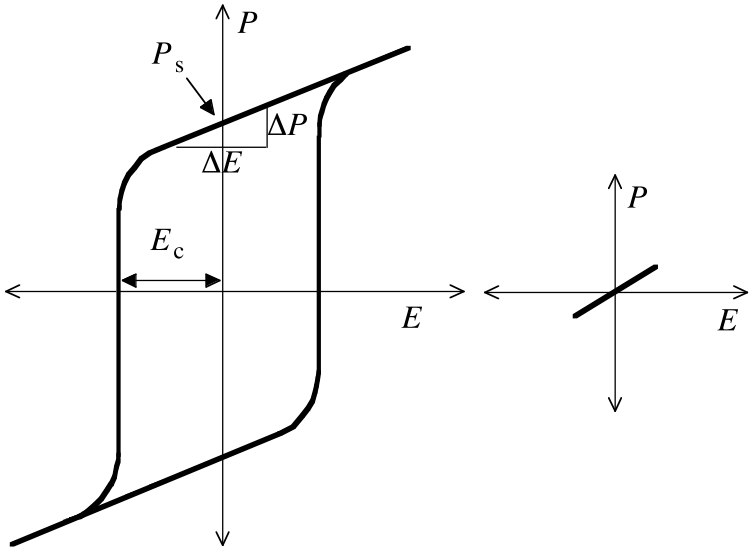
1. Spontano polarizacijo feroelektrika P_s, to je vrednost polarizacije pri $E = 0$. Velikost spontane polarizacije se v bližini faznega prehoda iz feroelektrične v paraelektrično fazo navadno hitro spreminja s temperaturo. V paraelektrični fazi je P_s enaka 0.

2. Koercitivno električno polje E_c nam pove, kolikšno najmanjše polje moramo uporabiti v nasprotni smeri obstoječe spontane polarizacije, da le tej obrnemo smer. Tudi

E_c je temperaturno odvisno in je enako 0 v paraelektrični fazi. Koercitivno polje je slabo definirana količina, saj je odvisno še od hitrosti in načina spreminjanja polja, od velikosti in oblike vzorca in pogosto tudi od vrste elektrod.

3. Naklon krivulje $P(E)$ pri $E = 0$ nam pove dielektrično susceptibilnost χ, ki je definiran s formulo
$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}E}(E = 0) = \chi\varepsilon_0 = (\varepsilon - 1)\varepsilon_0. \tag{1}$$

Zaradi nelinearnega obnašanja polarizacije moramo biti pri merjenju te fizikalne lastnosti zelo previdni. Če merimo pri premajhnih poljih, to je pri $E \leq E_c$, vzorca ne uspemo popolnoma polarizirati; pravimo, da je mnogodomenski. (Urejenost električnih dipolov se navadno razteza preko majhnega dela kristala, v drugem predelu pa je smer spontane polarizacije obrnjena. Ti predeli enake polarizacije se imenujejo domene spet po analogiji s feromagnetizmom). Meritev naklona $P(E)$ v takem primeru ne bo dala pravega rezultata in izmerjena susceptibilnost bo prevelika. Krivulja $P(E)$ (in s tem njen odvod) je namreč odvisna od začetnega stanja, v katerem se feroelektrik nahaja. Najverjetnejša je mnogodomenska struktura in takemu feroelektriku se s spreminjanjem električnega polja spreminja tudi domenska struktura, kar prispeva k izmerjeni susceptibilnosti. Le pri zelo majhnih poljih $E \ll E_c$ imamo ponovno možnost izmeriti pravo susceptibilnost, če je polje tako majhno, da domenske strukture ne more spreminjati. Seveda pa mora biti naša merilna priprava v tem primeru ustrezno občutljiva.



Slika 1: Feroelektrična histerezna krivulja $P(E)$ (levo) kaže odvisnost dielektrične polarizacije od električnega polja. Shematično je prikazana tako imenovana nasičena histerezna zanka, kakršno dobimo, če uporabimo pri meritvi dovolj visoka električna polja, vsaj dvakrat višja od koercitivnega električnega polja E_c. S P_s je označena spontana polarizacija. Pri mnogo manjših amplitudah električnega polja (desna slika ni v merilu) histereza izgine. V paraelektrični fazi vidimo pri vseh velikostih amplitude le sliko, kakršna je predstavljena na desni.

Potrebčine

- osciloskop, ki ga uporabljamo v `X-Y` načinu

- termostatska kopel v kateri je montiran vzorec
- vir spremenljive izmenične napetosti - variac
- razdelilno vezje in kabli

Naloga

1. Izmeri temperaturno odvisnost spontane polarizacije P_s in koercitivnega polja E_c v kristalu triglicin sulfata (`TGS`). Nariši diagram obeh temperaturnih odvisnosti.
2. Pri sobni temperaturi (približno 25 °C) in približno pri temperaturah 35, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, in 60°C določi dielektrično konstanto kristala ε na dva načina (pri vsaki temperaturi): najprej s pomočjo nasičene histerezne krivulje in nato še pri najmanjših možnih električnih poljih.
3. Izmeri temperaturno odvisnost dielektrične konstante v paraelektrični fazi.

Navodilo

Vezavo celotnega poskusa kaže slika 2. Vzbujevalno električno polje s frekvenco 50 Hz dobimo iz omrežja preko nastavljivega transformatorja (variac). Kristal v obliki majhne pločice (površina $S = 31.8$ mm^2, debelina $d = 0.64$ mm) je na obeh velikih ploskvah premazan s prevodno pasto in tvori kondenzator C_x. Kristal služi kot dielektrik v kondenzatorju, ker pa je nelinearen, je njegova kapaciteta slabo določena. Linearni (navadni) kondenzator C_0 je zaporedno priključen s C_x, tako da je naboj na obeh kondenzatorjih v vsakem trenutku enak. Tako lahko z meritvijo napetosti $U_y = q/C$ na kondenzatorju C_0 določimo polarizacijo kristala kot

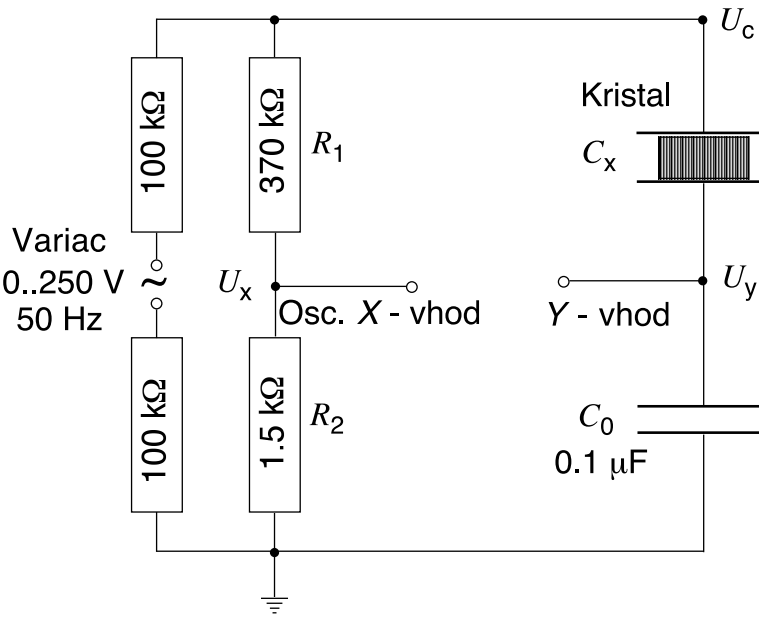
$$P = \frac{q}{S} = \frac{U_y C_0}{S}.$$

Električno polje v kristalu določimo na naslednji način. Kondenzator C_0 je izbran tako, da je njegova kapaciteta vedno mnogo večja od kapacitete drugega kondenzatorja $C_x \ll C_0$. Napetost $U_0 - U_y$ na ploščah kondenzatorja C_x v katerem je kristal, je zaradi tega praktično enaka celotni pritisnjeni napetosti U_c. Tako poznamo električno polje v vzorcu, če poznamo napetost U_c in debelino vzorca. Za lažje opazovanje na osciloskopu celotno napetost U_c razdelimo v razmerju $R_2/(R_1 + R_2)$ in to zmanjšano napetost U_x vodimo na vhod osciloskopa za vodoravni odklon (`X`-vhod). Tako dobimo električno polje v kristalu kot

$$E = \frac{(R_1 + R_2)U_x}{R_2\, d}$$

Preveri, da je vezava pri vaji v skladu s sliko 2 in upoštevaj, da dveh 100 kΩ uporov ne vidiš, ker sta skrita v škatli. Služita za omejevanje tokov (v primeru napa cne vezave), in zmanjšujeta napetost na ustrezni nivo. Ozemljitev osciloskopa je izvedena preko plašča enega signalnega kabla. **Preberi navodila za uporabo osciloskopa.**

Osciloskop je eden izmed najbolj uporabnih merilnih instrumentov. Osnovni sestavni del je katodna cev. Podobno kot vse elektronske cevi ima za izvor elektronskega curka

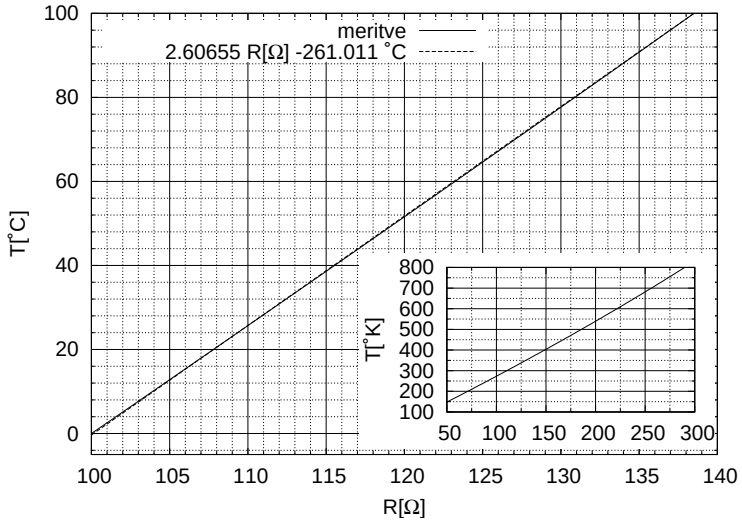


Slika 2: Shema električne vezave za opazovanje feroelektrične histerezne zanke. Vir napetosti je variabilni transformator - variac, zanko pa opazujemo na osciloskopu tako da povežemo ustrezne točke na njegova vhoda X in Y.

vročo katodo s čim manjo površino. Nadaljnje elektrode služijo za pospeševanje in fokusiranje elektronskega curka, ki gre nato skozi dva para odklonskih plošč. En par odklanja vertikalno, drugi horizontalno. Elektronski curek pada na fluorescentni zaslon, kjer ta zasveti. Bistveni sestavni deli osciloskopa so tudi ojačevalniki in generatorji žagaste napetosti. Če hočemo meriti časovno odvisnost nekega izvora napetosti, damo na odklonski ploči `X` žagasto napetost, ki odklanja žarek linearno s časom. Na vertikalni ploči (plošči `Y`) pa merjeno napetost, seveda ustrezno ojačano. Merimo lahko tudi zvezo med dvema napetostnima signaloma. Enega priključimo tako, da odklanja žarek v smeri `X`, drugega pa tako kot prej v smeri `Y` in na zaslonu dobimo `X-Y` diagram. Pri tej vaji uporabljamo osciloskop v `X-Y` načinu.

Temperaturo kristala merimo s pomočjo uporovnega termometra iz platine (PT100), kjer temperaturo T odčitamo preko upornosti R in umeritve prikazane na sliki 3. Pri sobni temperaturi je kristal `TGS` v feroelektrični fazi, zato lahko takoj začneš z opazovanjem histerezne krivulje. Spreminjaj maksimalno napetost na kristalu (sorazmerno z amplitudo U_x) in opazuj, kako se spreminja oblika histerezne krivulje. Pri sobni temperaturi potrebuješ maksimalno napetost, da dobiš nasičeno histerezno zanko. Odčitaj/izmeri koercitivno polje E_c in spontano polarizacijo P_s. Iz naklona histereze v okolici izhodiš ča ($E = 0$) in z uporabo formule(1) določi dielektrično konstanto ε kot je prikazano na sliki 1. Skiciraj obliko nasičene histereze in ne pozabi označiti merila. Pazi, da sta vrtljiva gumba za spremenljivo občutljivost v tisti skrajni legi, ki pomeni, da uporabljaš pravo umeritev. Potem - še vedno pri sobni temperaturi - spreminjaj (zmanjšuj) napetost dokler histereza ne izgine. Izmeri naklon krivulje in izračunaj ε.

Vklopi termostatsko kopel z vrtljivim preklopnikom, kjer oznake `H1`, `H2`, `H3` in `H4` pomenijo različne moči gretja. Večja moč pomeni hitrejši odziv, vendar običajno tudi večje nihanje temperature okoli zaželene vrednosti. Zaželeno temperaturo nastavi na kontaktnem termometru s tem da vrtiš zgornji črni nastavek. Temperaturo odčitaš na



Slika 3: Empirična relacija med temperaturo T in upornostjo R v uporabljenem uporovnem termometru

sosednjem termometru.

Povišaj temperaturo na 35°C in ponovi vse meritve kot pri sobni temperaturi (P_s, E_c, ε - na dva načina). Od te temperature dalje meri vsaki 2 stopinji nasičeno histerezno krivuljo in sicer le presečiča z `X` in `Y` osema, ki ti povesta koercitivno polje E_c in spontano polarizacijo P_s. Obe količini se zmanjšujeta z višanjem temperature. Blizu prehoda, to je nekako pri 45°C oz. pri 120 Ω upornosti PT100, zopet izmeri dielektrično konstanto ε na dva načina. Od 45°C navzgor meri koercitivno polje in spontano polarizacijo bolj na gosto. Prepričaj se, da v paraelektrični fazi histerezna zanka izgine. Pri nekaj temperaturah tik nad prehodom izmeri še dielektrično konstanto ε. Ali se ta kaj spreminja z velikostjo polja?