

D- 364

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

INSTITUT ZA FIZIKU

Jelena Milidragović

**KONTROLA I MERENJE TEMPERATURE POMOĆU
TERMISTORA SA NEGATIVnim TEMPERATURSKIM
KOEFICIJENTOM**

- *Diplomski rad* -

Novi Sad, 1997.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	1
UVOD	2
1. POLUPROVODNICI	5
1.1. Teorija zona	5
1.2. Poluprovodnici prema teoriji zona	6
1.3. Čisti poluprovodnici	7
1.4. Koncentracija slobodnih nosilaca nanelektrisanja	10
1.5. pn proizvod	13
1.6. Poluprovodnici sa primesama	15
1.7. Zavisnost koncentracije nosilaca nanelektrisanja od temperature	17
2. TERMISTORI	19
2.1. Proizvodnja i osobine NTC termistora	19
2.2. Linearizacija termistorskih termometara metodom prevojne tačke	21
2.3. NTC termistori u režimu povećane disipacije	24
3. EKSPERIMENTALNI DEO	27
3.1. Konstrukcija merne sonde	27
3.2. Određivanje zavisnosti otpora termistora od temperature	28
3.3. Vreme odziva termistora	30
3.4. Zavisnost napona na termistoru od temperature	32
3.5. Termistor u Vitstonovom mostu	34
ZAKLJUČAK	39
LITERATURA	40

Temperatura je jedna od osnovnih fizičkih veličina, čije je merenje od izuzetnog značaja za sve oblasti života. Postoje brojne metode merenja temperature koje se razlikuju u zavisnosti od vrednosti merene temperature i potrebne tačnosti. Interval temperatura u kom su današnje metode merenja primenljive, kreće se od desetog dela kelvina, pa do nekoliko stotina miliona kelvina u fuzionim reaktorima i zvezdama. Razvoj tehnologije novih materijala tokom tridesetih i četrdesetih godina ovog veka doveo je do pojave korišćenja poluprovodničkih materijala za merenje temperature.

Glavna karakteristika ovih materijala je opadanja otpornosti sa povećanjem temperature (negativni tepmeraturski koeficijent - NTC) i velika osetljivost. S obzirom na današnji razvoj proizvodnje poluprovodničkih materijala i na sve nižu cenu te proizvodnje, primena ovih materijala je izuzetno raširena za merenje temperature i preko toga za kontrolu različitih tehničkih, tehnoloških i fizičkih procesa.

U ovom radu je izrađen jednostavan uređaj za merenje temperature, koji kao termoelektrični pretvarač koristi NTC termistor. Takođe su ispitivane karakteristike uređaja i izvršena kalibracija. Da bi se vrednosti temperature mogle očitavati pomoću 8-bitnog A/D konvertora, izrađen je i kalibriran niskošumni pojačavač.

Ovaj rad sadrži pet poglavlja:

- U Uvodu su dati osnovni pojmovi o temperaturi i temperaturskim skalamama.
- Poglavlje 1 sadrži opis nekih osobina poluprovodnika bitnih za ovaj rad.
- U poglavlju 2 dat je pregled vrsta termistora i definisane su glavne karakteristike.
- Poglavlje 3 sadrži opis eksperimentalnog rada i kalibraciju uređaja.
- Zključak sadrži kratak pregled celog rada i dobijenih rezultata.

UVOD

DEFINICIJA I MERENJE TEMPERATURE

Prvi instrument za posmatranje temperaturskih promena - termoskop, konstruisao je Galilej na principu već ranije poznatog fenomena širenja gasova. Međutim, prvi termometar koji se mogao koristiti za praktična merenja temperature potiče od Galilejevog učenika Fernanda od Toskane, a konstruisan je slično savremenim termometrima sa tečnostima, pri čemu je kao radna supstanca upotrebljen alkohol.

Godine 1703. Amonton je postavio jednu hipotezu koja je imala veliki značaj u razvoju termometrije i termodinamike uopšte. On je pretpostavio da termička svojstva tela potiču od kretanja izvesnih elementarnih toplotnih čestica. Pri tome bi temperaturi jednakoj nuli odgovaralo stanje u kome su sve ove elementarne čestice u stanju mirovanja. Jasno je da je ovom hipotezom Amonton anticipirao kasnije definisanu temperaturu apsolutne nule. Prvi gasni termometar sa relativno dobrom mernim svojstvima razvio je Lambert 1760. i pri tome predložio da se shodno Amontonovoj ideji uvedu dve definisane temperature, i to apsolutna nula i tačka topljenja leda, za koju je predložena vrednost od 1000 stepeni. Ovo je bila vizionarska ideja jer je tek polovinom dvadesetog veka usvojena današnja skala koja je, slično Lambertovoj zamisli, bazirana na apsolutnoj nuli i jednoj materijalnoj fiksnoj tački - temperaturi trojne tačke vode.

U osamnaestom veku zasnovane su i sve značajne praktične temperaturske skale - Celzijusova, Farenhajtova, Reomirova, i dr. Najveći značaj svakako ima Celzijusova skala, prema kojoj se jedan stepen definiše kao stoti deo temperaturske razlike tačke ključanja vode tačke topljenja leda. Interesantno je da je Celzijus predložio da se tački leda dodeli vrednost 100, a tački ključanja 0 stepeni.

Reomirova skala, na primer, predstavlja tipičnu praktičnu temperatursku skalu koja je zasnovana na osobinama materijala korišćenog kao termometrijsko telo. Reomir je za nulu usvojio tačku topljenja leda, dok je kao jedan stepen definisao temperatursku razliku pri kojoj se smeša 80% alkohola i 20% vode proširi za jedan hiljaditi deo. Ovakva, a i druge slične skale koje se vezuju za svojstva nekog materijala, ne mogu imati univerzalni značaj i ne mogu definisati temperaturu kao jednu od osnovnih veličina u fizici.

TERMODINAMIČKA TEMPERATURSKA SKALA I TERMODINAMIČKI TERMOMETRI

Temperatursku skalu, koja definiše temperaturu T kao fundamentalnu fizičku veličinu, uveo je prvi put Tomson (Lord Kelvin) 1848. godine. Ova temperaturska skala naziva se termodinamička ili Kelvinova skala. Njena osnovna odlika je da je definisana nezavisno od svojstava materijala koji se koristi kao termometrijsko telo. Temperatura se prema ovoj skali meri apsolutnim metodama na bazi merenja drugih veličina kao što su pritisak, zapremina, itd. Kelvin je svoja razmatranja bazirao na drugom zakonu termodinamike i analizama idealne topotne mašine koja radi na osnovu Karkoovog ciklusa. Poznato je da temperature toplog i hladnog rezervoara T_t i T_h topotne mašine koja radi prema Karkoovom ciklusu su u odnosu:

$$T_t = (Q_t / Q_h) \cdot T_h$$

gde su Q_t i Q_h količine toplote koju mašina uzima od toplog, odnosno vraća hladnom rezervoaru. Prema ovoj formuli temperatura se može meriti na osnovu merenja energije, odnosno količina toplote Q_t , odnosno Q_h . Pri tome nije bitno koji je idealni gas upotrebljen kao radno telo. Temperaturska skala se zbog ove linearne zavisnosti može definisati samo pomoću dve definicijske temperature. Ranije su za to korišćene tačka topljenja leda i tačka ključanja vode, kojima su po definiciji pridružene vrednosti 0°C i 100°C , odnosno 273.15 K i 373.15 K . Sve ostale temperature određene su pomoću termodinamičkog termometra polazeći od navedenih definicijskih temperatura. Godine 1954. Generalna konferencija za tegove i mere usvojila je jedinicu termodinamičke temperature kelvin, označenu sa K , kao 273.16 -ti deo termodinamičke temperature trojne tačke vode. Danas temperatura trojne tačke vode ima po definiciji vrednost 273.16 K , a takođe je po definiciji teorijski najnižoj temperaturi dodeljena vrednost od 0K . Znači, danas tačka topljenja leda i tačka ključanja vode nisu više definicijske tačke termodinamičke skale. U praksi se najviše koristi temperatura t izražena u Celzijusovim stepenima ($^\circ\text{C}$). Po definiciji Celzijusov stepen jednak je kelvinu. Celzijusova i termodinamička temperatura stoje u vezi:

$$t = T - 273.15\text{ K}.$$

Temperaturske razlike mogu se izražavati bilo u kelvinima bilo u Celzijusovim stepenima.

Temperatura trojne tačke vode ($t = 0.01^\circ\text{C}$) predstavlja fiksnu tačku koja se može ostvariti sa najboljom ponovljivošću u prirodi. Temperatura topljenja leda ima slabiju ponovljivost od trojne tačke jer, u izvesnoj meri, zavisi od spoljnih faktora (vazdušni pritisak, vlažnost), a takođe i od nečistoća vode i sl. Tačka ključanja je još više zavisna od ovih faktora, posebno od atmosferskog pritiska, zbog čega su aparature za precizno dobijanje tačke ključanja vode veoma složene. Prema tome, uvođenje trojne tačke umesto tačke leda i ključanja, ima prednosti kako sa metrološkog tako i sa praktičnih aspekata.

Termodinamička temperaturska skala definisana pomoću Karkoovog ciklusa ima pre svega principijelan značaj, s obzirom da je idealan Karkoov ciklus neostvariv u praksi. Pored Karkoovog ciklusa postoji i veći broj fizičkih procesa, pojava i zakona koji se mogu koristiti kao osnova za merenje termodinamičke temperature T. Odgovarajući termometri nazivaju se termodinamički termometri. Da bi se neki termometar mogao smatrati termodinamičkim, moraju biti zadovoljeni sledeći uslovi. Fizička pojava na kojoj se zasniva rad termometra se može, sa velikom tačnošću, opisati matematičkom relacijom. U toj relaciji, pored termodinamičke temperature T treba da budu samo one fizičke veličine koje se mogu izmeriti nekom apsolutnom metodom.

Najstariji i danas najznačajniji termodinamički termometar predstavlja gasni termometar. Osnova njegovog rada izražena je jednačinom stanja idealnog gasa:

$$pV/n = pV_m = RT,$$

gde je p pritisak, V zapremina, n broj molova, $V_m = V/n$ molarna zapremina i R univerzalna gasna konstanta.

Od ostalih termodinamičkih termometara možemo spomenuti: akustički termometar, termometar na bazi šuma, radijacioni termodinamički pirometar.

Zajednička osobina termodinamičkih termometara je da oni predstavljaju vrlo komplikovane i skupe uređaje, koji se isključivo primenjuju za laboratorijska, a ne za svakodnevna praktična merenja temperature.

Većina praktičnih termometara, kao što su termometri sa živom i drugim tečnostima, termometri na bazi bimetala, otporni termometri i dr. ne predstavljaju termodinamičke termometre. Karakteristika ovih termometara se ne može dovoljno tačno opisati na bazi teorijskih razmatranja, nego se oni moraju kalibrirati pomoću nekog od termodinamičkih termometara.

OTPORNI TERMOMETRI

Značajnu grupu otpornih termometara sačinjavaju poluprovodnički pretvarači, pre svega termistori sa negativnim temperaturnim koeficijentom (NTC). Osim njih koriste se u manjoj meri i druge komponente kao što su, na primer, termistori sa pozitivnim koeficijentom (PTC) i germanijumski otpornici. Poluprovodnički termometri se karakterišu velikom osetljivošću, užim temperaturskim opsegom i većom nelinearnošću karakteristike.

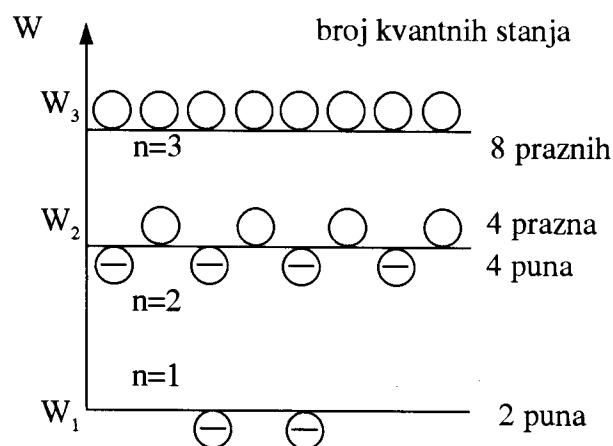
Otporni termometri daju relativno veliki izlazni signal, što znači da ne zahtevaju primenu složenijih kola za njegovu registraciju ili prenos na daljinu. Zbog toga se primena otpornih termometara sve više širi u oblastima u kojima su tradicionalno primenjivane druge merne metode [1].

1. POLUPROVODNICI

1.1. TEORIJA ZONA

U slučaju tesno složenih atoma spoljašnji elektroni ovih atoma utiču jedni na druge. Elektroni susednih atoma, kao i uređeni poredak atoma u kristalnoj rešetki imaju znatan uticaj na ukupnu energiju elektrona.

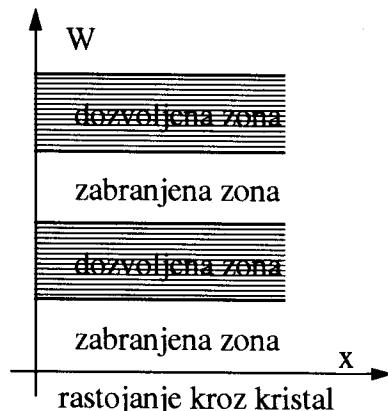
Na slici 1.1. prikazani su, kao primer, energetski nivoi izolovanog ugljenikovog atoma. Energetski nivoi su određeni nanelektrisanjem jezgra koje je zq ; kao i kvantnim brojevima n (glavni kvantni broj), l (orbitalni kvantni broj), m (magnetni kvantni broj) i s (spinski kvantni broj). Bez uticaja spoljašnjeg polja energija je određena sa n i $l+s$; a pod uticajem polja još i sa m . Skup kvantnih brojeva određuje kvantno stanje. Jedno kvantno stanje može da bude popunjeno najviše sa jednim elektronom, a može da bude i prazno. Na slici 1.1. prikazan je raspored elektrona po energijama za najniže energetsko stanje atoma. Dodavanjem energije elektron može da pređe u kvantno stanje više energije. Ako je energija koju primi elektron dovoljno velika, može doći do njegovog otkidanja, tj. do jonizacije atoma.



Slika 1.1. Energetski nivoi izolovanog ugljenikovog atoma.

Kada su atomi gusto složeni, a to je slučaj kod kristalne rešetke, usled međusobnog uticaja energetski nivoi su u izvesnoj meri poremećeni. Naime, kod nekih atoma su se kvantna stanja pomerila na višu, a kod drugih na nižu energiju u odnosu na energije u izolovanom atomu. Kvantna stanja koja su u izolovanim atomima imala iste energije će, kada su atomi u kristalnoj

rešetki, sačinjavati u energetskoj skali jednu grupu kvantnih stanja na različitim, ali bliskim energijama. Interval energije u kojem se nalazi jedna takva grupa kvantnih stanja naziva se dozvoljena energetska zona. Intervali energija u kojima nema kvantnih stanja nazivaju se zabranjene zone (sl. 1.2.).



Slika 1.2. Dozvoljene i zabranjene zone u kristalu.

1.2. POLUPROVODNICI PREMA TEORIJI ZONA

Električna struja nastaje kao usmereno kretanje (drift) slobodnih nosilaca nanelektrisanja brzinom v_D . Usled brzine drifta slobodni nosilac u proseku povećava svoju energiju za $1/2 m v_D^2$ iznad one vrednosti energije koju je imao dok nije učestvovao u prenošenju nanelektrisanja. Nosilac nanelektrisanja mora zato da pređe na kvantno stanje sa višom energijom. Tipična kinetička energija drifta je vrlo mala da bi podigla elektron kroz zabranjenu zonu tipične širine 1 eV. Prosečan razmak između dva susedna kvantna stanja je vrlo mali u poređenju sa energijom haotičnog kretanja elektrona $3/2 kT$. Može se, zbog toga, smatrati da elektron prelazi između kvantnih stanja kao da su ona energetski kontinuum, a ne diskretno raspoređeni nivoi. Elektron ne može driftovati u popunjenoj zoni jer nema na raspolaganju kvantna stanja sa energijom većom za energiju drifta.

Zona u kojoj se vrši provođenje električne struje naziva se provodna zona. Najviša zona koja sadrži elektrone (to su valentni elektroni) na 0 K naziva se valentna zona. Obe ove zone mogu da budu sastavljene od više osnovnih zona (od kojih svaka sadrži $2N$ kvantnih stanja) koje se međusobno preklapaju.

Poluprovodnici su čvrsta tela kod kojih je širina zabranjene zone oko 1eV. Na 0 K valentna zona je popunjena, a provodna prazna. Iako između izolatora i poluprovodnika nije

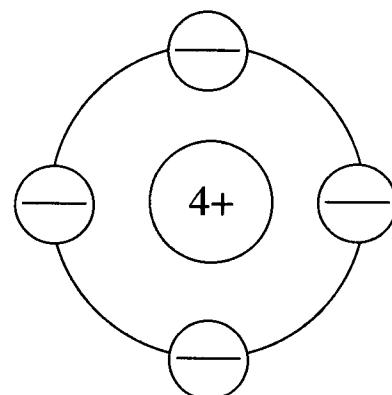
velika razlika u širini zabranjene zone, verovatnoća nalaženja elektrona u provodnoj zoni je znatno veća nego kod izolatora.

1.3. ČISTI POLUPROVODNICI

Pod čistim poluprovodnikom podrazumeva se slučaj kada je kristal poluprovodnika sačinjen isključivo od atoma odnosno molekula (motiva) poluprovodnika, tj. kada se u kristalnoj rešetki ne nalaze nikakve primeće (nečistoće).

HEMIJSKA STRUKTURA

Elementarni poluprovodnici su elementi iz četvrte grupe periodnog sistema i to: Si (r. br. 32) i sivi kalaj Sn (r. br. 50). Elektronska struktura spoljašnjih elektrona ovih elemenata je ista i može da se predstavi u obliku unutrašnjeg dela atoma oko kojeg kruže četiri elektrona (sl. 1.3.). Kako je atom u odnosu na svoju okolinu električno neutralan, unutrašnji deo je nanelektrisan sa 4 pozitivna elementarna nanelektrisanja.

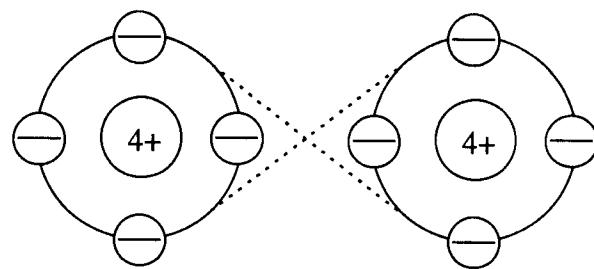


Slika 1.3. Elektronska struktura spoljašnjih elektrona.

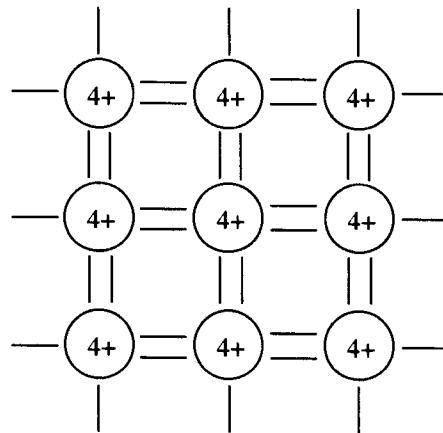
Poluprovodničke osobine pokazuju i kristali nekih jedinjenja elemenata iz III i V, odnosno II i IV grupe periodnog sistema, kao i neka druga jedinjenja.

KRISTALNA STRUKTURA

Kristalna struktura silicijuma i germanijuma je ista kao i kod dijamanta. Svaki atom je okružen sa 4 druga atoma na istom rastojanju od njega. Atomi su međusobno povezani kovalentnim vezama. Jedan elektron jednog atoma se upari sa jednim elektronom susednog atoma (sl. 1.4.), tj. oba elektrona pripadaju istovremeno i jednom i drugom atomu. U dve dimenzije se ovakva kristalna rešetka može pogodno prikazati kao na sl. 1.5. Ovde svaka crta označava po jedan valentni elektron.



Slika 1.4. Kristalna struktura.



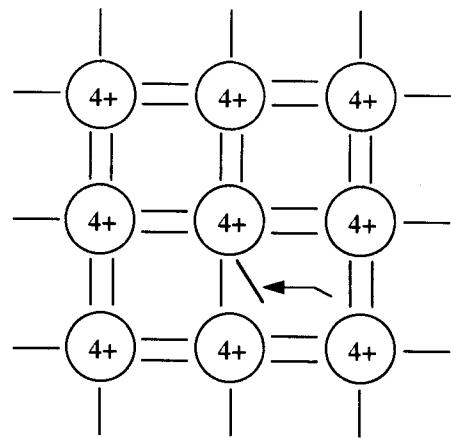
Slika 1.5. Kristalna rešetka.

SLOBODNI ELEKTRONI

Kako je prikazano na sl. 1.5. svi valentni elektroni su vezani u kovalentnim vezama. Realno, ovakav slučaj je moguć samo na 0 K i u odsustvu spoljašnjih radijacija (nuklearno zračenje, svetlost i sl.).

Da bi se jedan elektron otkinuo iz kovalentne veze i tako postao slobodan elektron (nosilac nanelektrisanja) unutar kristala (sl. 1.6. pokazan strelicom), potrebno je utrošiti izvesnu energiju.

Prema teoriji zona najmanja energija potrebna da bi se elektron otkinuo iz kovalentnih veza (valentna zona) i postao slobodan nosilac nanelektrisanja (tj. ušao u provodnu zonu) je širina zabranjene zone W_g . Ako je dovedena energija prilikom otkidanja sa W_v veća od W_g , višak se pretvara u kinetičku energiju elektrona. Tada elektron dolazi na kvantno stanje više energije nego što je donja ivica provodne zone W_c . Energija koja se u kristalu u termodinamičkoj ravnoteži troši na otkidanje elektrona, dobija se iz energije termičkog oscilovanja rešetke kristala.



Slika 1.6. Slobodni elektroni.

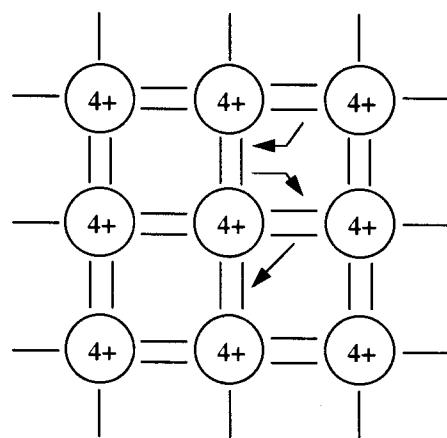
Usled prisustva slobodnih elektrona kristal ima električnu provodljivost:

$$\sigma_n = q \cdot n \cdot \mu_n.$$

Slobodni elektroni se haotično kreću po unutrašnjosti kristala.

ŠUPLJINE

Na mestu sa kojeg se otkinuo valentni elektron, ostalo je pozitivno nanelektrisanje $+q$. Ovo mesto može da bude popunjeno elektronom iz susedne kovalentne veze, što znači da se $+q$ preselilo na to mesto susedne kovalentne veze (sl. 1.7.).



Slika 1.7. Šupljine.

Može se pokazati da ova $+$ mesta imaju osobine čestice: nanelektrisanje $+q$; masu m_p , pokretljivost μ_p , difuzionu konstantu D_p itd. Tako su ta $+$ mesta, kao čestice dobila naziv šupljine (hole). Šupljine mogu da se manifestuju samo u kristalu. Šupljine se, zbog toga, nazivaju kvazičestice.

Ako je koncentracija šupljina p , tada je električna provodljivost kristala zbog šupljina data sa:

$$\sigma_p = q \cdot p \cdot \mu_p.$$

Ukupna provodljivost kristala usled postojanja elektrona i šupljina data je sa:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p).$$

1.4. KONCENTRACIJA SLOBODNIH NOSILACA NAELEKTRISANJA

KONCENTRACIJA ELEKTRONA

Broj elektrona po jedinici zapremine kristala između energije W i dW dat je kao [2]:

$$dn = Z_c(W) F(W, T) dW,$$

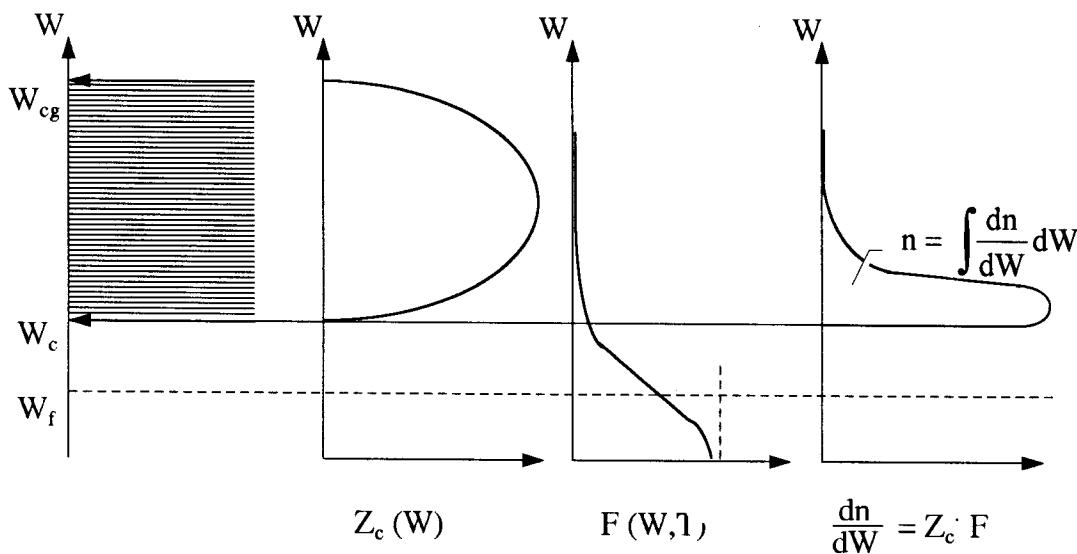
gde je $Z_c(W)$ funkcija raspodele kvantrnih stanja po energijama u provodnoj zoni, a F Fermijeva funkcija verovatnoće, definisana kao

$$F(W, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_f}{kT}}}. \quad (1)$$

Ako je gornja ivica provodne zone neka energija W_{cg} , koncentracija elektrona bi mogla da se odredi iz predhodne formule kao:

$$n = \int_{W_c}^{W_{cg}} Z_c(W) F(W, T) dW, \quad (2)$$

pod uslovom da je u celoj provodnoj zoni funkcija $Z_c(W)$ poznata. Ovaj integral se može rešiti i grafički, ako su grafici funkcija Z i F poznati (sl. 1.8.).



Slika 1.8. Grafici funkcija Z i F , raspodela koncentracije elektrona po energijama.

Zbog toga što je vrednost dn/dW u repu raspodele vrlo mala, doprinos ovog dela površine ispod krive je zanemarljiv u poređenju sa površinom u blizini W_c , čak i kada bi zone bile beskonačno široke, tj. ako W_{cg} teži beskonačnosti. Na osnovu navedenog može se zaključiti:

a) umesto izraza (2) može se staviti:

$$n = \int_{W_c}^{\infty} Z_c(W) F(W, T) dW, \quad (3)$$

a da greška u vrednosti za koncentraciju bude vrlo mala;

b) dovoljno je poznavati tačnu vrednost za Z_c samo u blizini W_c . Za veće energije njena vrednost nije bitna, jer je deo elektrona u repu zanemarljiv u poređenju sa glavninom u blizini W_c .

Analitički izraz funkcije Z_c u blizini W_c je:

$$Z_c = \alpha (W - W_c)^{1/2} \quad W \geq W_c \quad (4)$$

gde je

$$\alpha = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2}.$$

U ovom izrazu h je Plankova konstanta, a m_e^* tzv. efektivna masa elektrona. Efektivna masa elektrona može biti veća ili manja od mase slobodnog elektrona m_e , a definiše se kao:

$$m_e^* = \frac{h^2}{\frac{d^2 W}{[d(\frac{1}{\lambda})]^2}},$$

gde je W ukupna energija elektrona, a λ talasna dužina elektrona kao talasa.

Zamenjujući u jednačinu (3) Z_c iz jednačine (4) i F iz jednačine (1); dobija se:

$$n = \int_{W_c}^{\infty} \alpha (W - W_c)^{1/2} \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_f}{kT}}} dW.$$

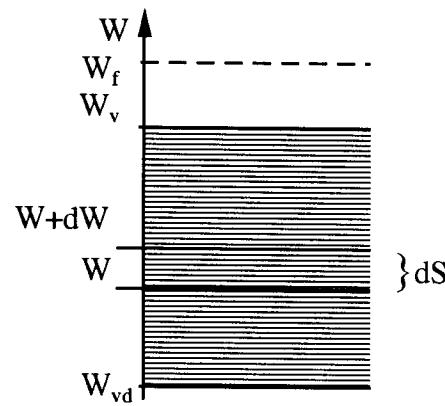
Rešavanjem ovog integrala dobija se konačan izraz za koncentraciju elektrona:

$$n = \frac{\alpha}{2} \pi^{1/2} (kT)^{3/2} e^{-\frac{W_c - W_f}{kT}}.$$

KONCENTRACIJA ŠUPLJINA

Ako se funkcija raspodele kvantnih stanja po energijama u valentnoj zoni obeleži sa Z_v , tada je broj kvantnih stanja dS (sl. 1.9.) koja se nalaze između energije W i $W+dW$ po jedinici zapremine kristala dat izrazom:

$$dS = Z_v(W) dW.$$

Slika 1.9. Broj kvantnih stanja između energije W i $W+dW$.

Verovatnoća da se na kvantnom stanju energije W nađe šupljina jednaka je verovatnoći da se na tom kuantnom stanju ne nalazi elektron. Kako je verovatnoća nalaženja elektrona data sa $F(W,T)$, tada je verovatnoća nalaženja šupljine na tom stanju, $F_p(W,T)$ data sa:

$$F_p(W,T) = 1 - F(W,T),$$

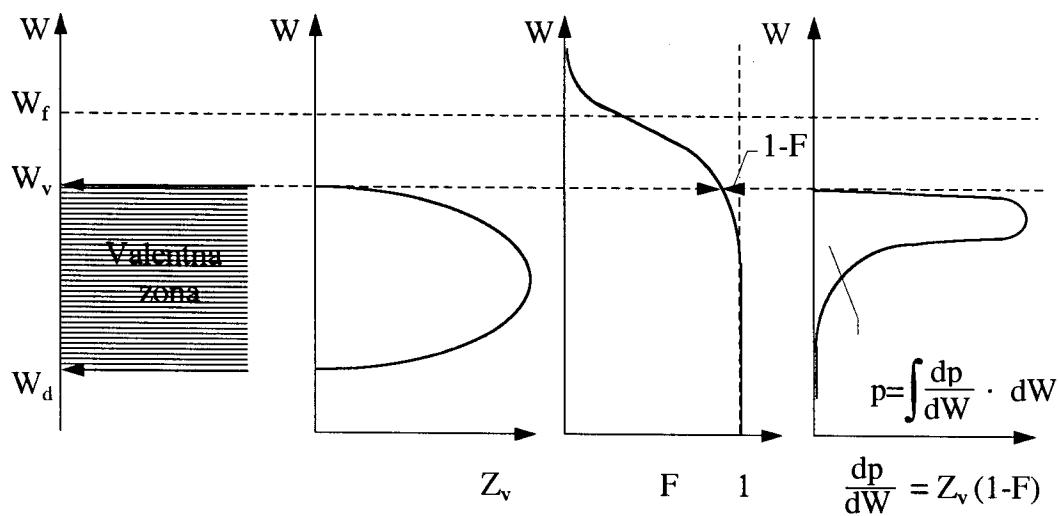
jer je sigurno da se elektron na jednom kuantnom stanju nalazi ili ne nalazi ($F + F_p = 1$). Prema tome, na dS kuantnih stanja statistički će da bude dp šupljina datih izrazom:

$$dp = F_p dS.$$

Na osnovu ovoga, broj šupljina po jedinici zapremine kristala u termodinamičkoj ravnoteži na temperaturi T i između energije W i $W+dW$ iznosi:

$$dp = Z_v(W)[1 - F(W, T)]dW.$$

Raspodela koncentracije šupljina po energijama dp/dW , se može grafički rešiti kao na sl. 1.10.

Slika 1.10. Grafici funkcija Z i F , raspodela koncentracije šupljina po energijama.

$$p = \int_{W_{vd}}^{W_v} Z_v(W)[1 - F(W, T)]dW.$$

Važno je napomenuti da se ne uvodi bitnija greška, ako se integracija započne od vrlo malih energija umesto od W_{vd} tako da se može napisati:

$$p = \int_{-\infty}^{W_v} Z_v(W)[1 - F(W, T)]dW. \quad (5)$$

Najveći deo šupljina ima energiju blisku W_v , pa je dovoljno znati oblik Z_v u blizini W_v :

$$Z_v = \beta(W_v - W)^{1/2},$$

gde je :

$$\beta = \frac{4\pi}{h^3} (2m_p^*)^{3/2}.$$

m_p^* - je efektivna masa šupljine koja ima sličnu talasnomehaničku interpretaciju kao i masa elektrona. Zamenom izraza za Z_v i $F(W, T)$ u jednačinu (5), dobija se:

$$p = \int_{-\infty}^{W_v} \beta(W_v - W)^{1/2} \frac{e^{\frac{W-W_f}{kT}}}{1 + e^{\frac{W-W_f}{kT}}} dW$$

odakle se rešavanjem integrala može dobiti konačan izraz za p :

$$p = \frac{1}{2} \beta \pi^{1/2} (kT)^{3/2} e^{-\frac{W_f - W_v}{kT}}.$$

1.5. PN PROIZVOD

U kristalu poluprovodnika stalno deluju dva procesa:

1. Stvaranje novih parova šupljina i elektrona (tzv. generisanje slobodnih nosilaca nanelektrisanja) kidanjem kovalentnih veza između atoma poluprovodnika.
2. Popunjavanje prekinutih kovalentnih veza između atoma poluprovodnika. Prilikom svakog takvog događaja gubi se jedna šupljina i jedan elektron. Često se kaže da se vrši rekombinacija između elektrona i šupljine.

Neka je g - koeficijent generisanja - broj proizvedenih slobodnih nosilaca nanelektrisanja u jedinici vremena i po jedinici zapremine monokristala, tada je:

$$g = \left(\frac{\partial n}{\partial \tau} \right)_{gen.} = \left(\frac{\partial p}{\partial \tau} \right)_{gen.}$$

Striktno govoreći, drugi znak jednakosti važi samo ako se, kako elektroni tako i šupljine, generišu samo prekidanjem kovalentnih veza između dva atoma poluprovodnika usled termičkog

oscilovanja kristalne rešetke. Veličina g srazmerna je broju kovalentnih veza koje mogu biti prekinute, tj. srazmerna je broju poluprovodničkih atoma N' po jedinici zapremine kod kojih nijedna kovalentna veza nije prekinuta, tj.:

$$g = K_1(T) N',$$

gde je koeficijent srazmernosti $K_1(T)$ vrlo stroga funkcija temperature. Porastom temperature, broj prekinutih veza u jedinici vremena vrlo brzo raste.

Neka je r - koeficijent rekombinacije - broj elektrona odnosno šupljina koji se međusobno rekombinovao u jedinici vremena i po jedinici zapremine, tada je:

$$r = \left(\frac{\partial n}{\partial \tau} \right)_{rec.} = \left(\frac{\partial p}{\partial \tau} \right)_{rec.}$$

Drugi znak jednakosti opet važi samo ako rekombinacija dovodi do popunjavanja prekinutih kovalentnih veza između atoma poluprovodnika u termodinamičkoj ravnoteži. Broj rekombinacija u jedinici vremena i jedinici zapremine srazmeran je verovatnoći da će doći do susreta između elektrona i šupljine. Ova se verovatnoća povećava sa povećanjem kako n tako i p , pa je:

$$r = K_2(T) pn,$$

gde je koeficijent srazmernosti blaga funkcija temperature. Neprekidno generisanje i rekombinacija u poluprovodniku dovodi do rezultantne promene koncentracije u jedinici vremena:

$$\frac{dn}{d\tau} = \left(\frac{\partial n}{\partial \tau} \right)_{gen} - \left(\frac{\partial n}{\partial \tau} \right)_{rec.} = g - r. \quad (6)$$

Isto se može napisati i za šupljine. Kada je kristal u termodinamičkoj ravnoteži, rezultantna promena koncentracije slobodnih nosilaca nanelektrisanja jednaka je nuli, tj.:

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{dp}{d\tau} = 0,$$

pa se u ovom slučaju iz (6) dobija:

$$r = g;$$

a ako se u poslednju jednakost uvrste izrazi za g i r , dobija se:

$$pn = \frac{K_1(T)}{K_2(T)} N'.$$

Kako sve veličine na desnoj strani zavise samo od T , proizilazi da je proizvod koncentracija šupljina i elektrona funkcija samo temperature:

$$pn = f(T).$$

Funkcija $f(T)$ može da se nađe, jer su nam poznati izrazi za p i n posebno:

$$f(T) = pn = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi} (kT)^{3/2} e^{-\frac{W_c - W_f}{kT}} \frac{\beta}{2} \sqrt{\pi} (kT)^{3/2} e^{-\frac{W_f - W_v}{kT}}$$

odakle direktno sledi da je:

$$pn = \frac{1}{4} \alpha \beta \pi (kT)^3 e^{-\frac{W_g}{kT}},$$

jer je $W_c - W_v = W_g$. Ovaj izraz važi kako za čiste tako i primesne poluprovodnike. Kod čistog poluprovodnika je:

$$n = p = n_i;$$

pa se za bilo koji poluprovodnik može staviti da je:

$$pn = n_i^2$$

gde je:

$$n_i^2 = \frac{1}{4} \alpha \beta \pi (kT)^3 e^{-\frac{W_g}{kT}}.$$

1.6. POLUPROVODNICI SA PRIMESAMA

Koncentracija slobodnih nosilaca nanelektrisanja, prema tome i električna provodnost, kod poluprovodnika može značajno da se promeni dodavanjem kontrolisanih količina primesa čistom poluprovodniku prilikom tehnološkog postupka proizvodnje (kristalizacija).

Dodavanjem primesa iz pete grupe atoma (fosfor, antimon ili arsen) poluprovodnicima iz četvrte grupe povećava se koncentracija elektrona kao slobodnih nosilaca nanelektrisanja, pa se ovakvi poluprovodnici nazivaju poluprovodnici N-tipa, a primese donorski atomi. Međutim, dodavanjem atoma iz treće grupe periodnog sistema (bor, aluminijum, galijum ili indijum) povećava se koncentracija šupljina, pa su ovo poluprovodnici P-tipa, a primese akceptorski atomi.

Kod binarnih jedinjenja (III-V grupe) donorski atomi su iz VI grupe (telur, sumpor) i zamenjuju V grupu. Akceptorski atomi su iz II grupe (cink) i zamenjuju III grupu. Drugi način realizacije binarnih poluprovodnika N- ili P-tipa je: u slučaju da ima više atoma iz V grupe, poluprovodnik je N-tipa, a ako preovladavaju atomi iz III grupe, dobija se P-tip.

IZRAZI ZA KONCENTRACIJU ELEKTRONA I ŠUPLJINA

POLUPROVODNIK N-TIPA

Za izračunavanje koncentracija slobodnih nosilaca nanelektrisanja (n i p), koriste se jednačine neutralnosti:

$$n = N_d + p$$

i ako je sistem u termodinamičkoj ravnoteži, jednačina za pn proizvod:

$$pn = n_i^2.$$

Rešavanjem ovih dveju jednačina dobija se [2]:

$$n = \frac{1}{2} N_d \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i}{N_d} \right)^2} \right]$$

$$p = \frac{1}{2} N_d \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i}{N_d} \right)^2} \right].$$

U velikom broju slučajeva u praksi je $N_d > n_i$ pa se ove jednačine mogu napisati kao:

$$n \approx N_d \left(1 + \frac{n_i^2}{N_d^2} \right)$$

$$p \approx \frac{n_i^2}{N_d} \left(1 - \frac{n_i^2}{N_d^2} \right).$$

U slučaju da je $N_d \gg n_i$ ove se jednačine mogu napisati u još jednostavnijem obliku:

$$n \approx N_d$$

$$p \approx \frac{n_i^2}{N_d}.$$

Koja se od ovih aproksimacija u računanju koristi, zavisi od odnosa n_i i N_d , kao i od tačnosti koja se zahteva.

POLUPROVODNIK P-TIPIA

Koncentracija slobodnih nosilaca nanelektrisanja izračunava se iz jednačina neutralnosti i pn proizvoda:

$$p = N_a + n \quad pn = n_i^2,$$

odakle se dobijaju izrazi [2]:

$$p = \frac{N_a}{2} + \frac{N_a}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i}{N_a} \right)^2}$$

$$n = -\frac{N_a}{2} + \frac{N_a}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i}{N_a} \right)^2}$$

U slučaju da je $N_a > n_i$ dobija se:

$$p \approx N_a \left(1 + \frac{n_i^2}{N_a^2} \right)$$

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_a} \left(1 - \frac{n_i^2}{N_a^2} \right)$$

a za $N_a \gg n_i$ važi:

$$p \approx N_a$$

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_a}$$

1.7. ZAVISNOST KONCENTRACIJE NOSILACA NAELEKTRISANJA OD TEMPERATURE

Za bilo koji poluprovodnik važi jednačina neutralnosti:

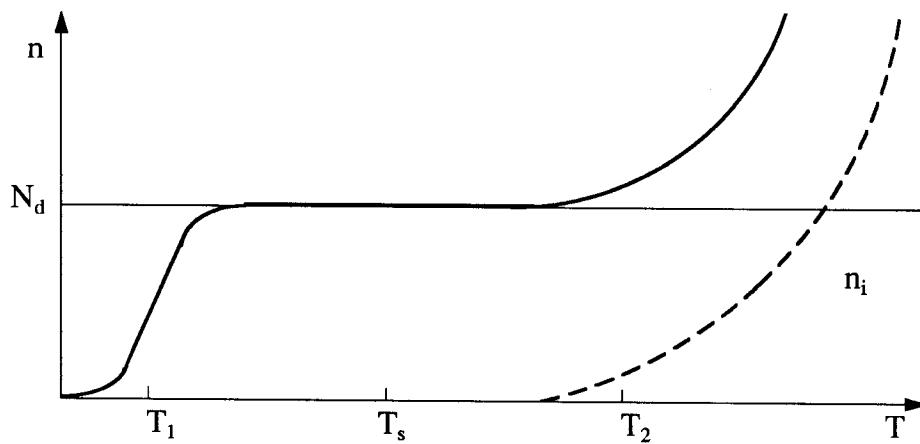
$$pn = n_i^2,$$

gde je:

$$n_i^2 = \frac{1}{4} \alpha \beta \pi (kT)^3 e^{-\frac{W_g}{kT}} \quad (7)$$

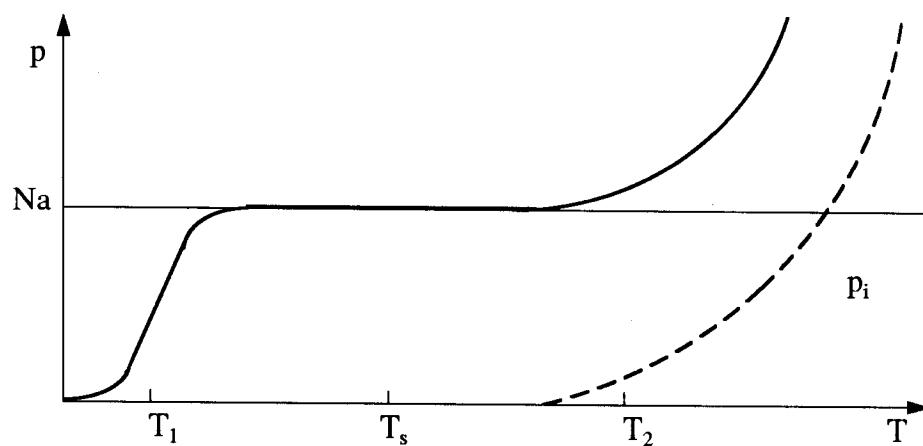
i zavisi samo od temperature. Kako eksponent (veličina W_g/k) ima velike vrednosti, pri sobnim temperaturama n_i^2 je mnogo jača funkcija temperature preko eksponencijalnog nego preko kubnog dela.

I u slučaju poluprovodnika N-tipa koncentracija slobodnih elektrona je funkcija temperature (sl. 1.11.).



Slika 1.11. Zavisnost koncentracije slobodnih elektrona od temperature.

Na veoma niskim temperaturama (u blizini apsoltne nule), energija termičkog oscilovanja kristalne rešetke nije dovoljna da otkine elektrone iz donorskih atoma. Međutim, bliže nekoj temperaturi T_1 , peti elektroni donorskih atoma počinju da se oslobođaju, da bi na nešto višoj temperaturi od T_1 svi peti elektroni donorskih atoma postali slobodni. Ovo se sve dešava na relativno niskim temperaturama kod kojih je samo neznatan broj poluprovodničkih atoma izgubio po jedan elektron, pa je zbog toga koncentracija slobodnih elektrona data sa N_d . Da bi se došlo do primetnog broja prekinutih kovalentnih veza atoma poluprovodnika, potrebno je da se poluprovodnik zgreje do neke temperature T_2 . Za temperature više od T_2 koncentracija oslobođenih elektrona iz kovalentnih veza atoma poluprovodnika naglo raste, elektroni oslobođeni iz donorskih atoma ostaju u manjini i poluprovodnik se za više temperature ponaša kao čist poluprovodnik. Koncentracija šupljina u poluprovodniku P-tipa takođe je funkcija temperature (sl. 1.12.) [2].



Slika 1.12. Zavisnost koncentracije šupljina od temperature.

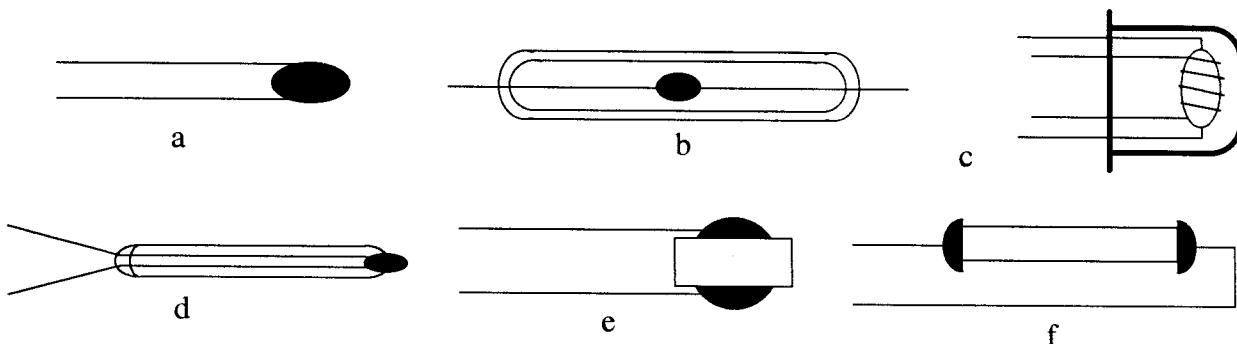
2. TERMISTORI

Reč termistor dobijena je skraćivanjem engleskog izraza "Thermally sensitive resistor" što znači otpornik osetljiv na temperaturu. Smanjivanje otpornosti sulfida srebra pri porastu temperature otkrio je Faradej 1883. godine, međutim prvi komercijalni termistori sa negativnim temperaturnim koeficijentom otpornosti (NTC) za merenje temperature, pojavili su se početkom tridesetih godina ovog veka. Do šire primene termistora došlo je posle 1950. godine, zahvaljujući razvoju poluprovodničke tehnologije i potrebama vazduhoplovne tehnike i kosmonautike. Glavna prednost NTC termistora u odnosu na druge temperaturske pretvarače je velika osetljivost koja omogućava konstrukciju jednostavnih i pouzdanih termometara.

Vremenska nestabilnost zavisnosti otpornosti od temperature kao i velike tolerancije parametara pri proizvodnji, bile su u prošlosti glavni nedostaci termistora koji su ograničavali njihovu primenu. Danas su ovi nedostaci termistora u velikoj meri otklonjeni. U električnim merenjima temperature, u oblastima kao što su na primer medicina, biologija, geologija, okeanologija i sl., termistori predstavljaju najčešće korišćene temperaturske pretvarače. Osim toga, uloga termistora u industriji sve više raste.

2.1. PROIZVODNJA I OSOBINE NTC TERMISTORA

Savremeni NTC termistori proizvode se od poluprovodničkih materijala i oksida metala kao što su gvožđe, hrom, mangan, kobalt, nikl itd. Smeša oksida u prahu se sinteruje na temperaturama iznad 1000 °C čime se formiraju otpornici oblika loptice, diska ili cilindra. Neki od oblika NTC termistora prikazani su na sl. 2.1 [1,3].



Slika 2.1. Tipovi NTC termistora: a) loptica, b) disk, c) štapić, d) termistor kao staklena sonda, e) termistor u vakuumu, f) indirektno grejani termistor.

Pre sinterovanja smeši se dodaju primese u cilju dobijanja poluprovodničkog materijala N ili P-tipa. Maksimalne radne temperature oksidnih termistora iznose od 300 °C do 350 °C. U novije vreme se izrađuju visokotemperaturski termistori sa maksimalnim radnim temperaturama od 700 °C pa čak i 1000 °C, što je blisko maksimalnim radnim temperaturama platinskog otpornog termometra. U oblasti niskih temperatura termistori se primenjuju do nekoliko desetina kelvina.

Otpornost NTC termistora $R(T)$ je nelinearna funkcija temperature koja je izvedena na sledeći način:

$$R(T) = C\rho = C/\sigma,$$

gde je ρ specifična otpornost termistora, a σ njegova specifična provodljivost koja je, za čisti poluprovodnik, data kao:

$$\sigma = qn_i(\mu_n + \mu_p) = Dn_i.$$

Pri tome je:

$$n_i^2 = pn.$$

Odatle se može napisati da je:

$$n_i = ET^{3/2} e^{-W_g/kT},$$

gde su C, D i E konstante koje zavise od dimenzija poluprovodnika i pokretljivosti nosilaca nanelektrisanja. Kako eksponent W_g/k ima velike vrednosti, pri sobnim temperaturama n_i^2 je mnogo jača funkcija temperature preko eksponencijalnog dela nego preko kubnog. zato možemo pisati da je:

$$n_i = F e^{-W_g/kT},$$

gde je F konstanta. Iz toga zaključujemo da je otpornost termistora:

$$R(T) = (C/D) F e^{B/T}$$

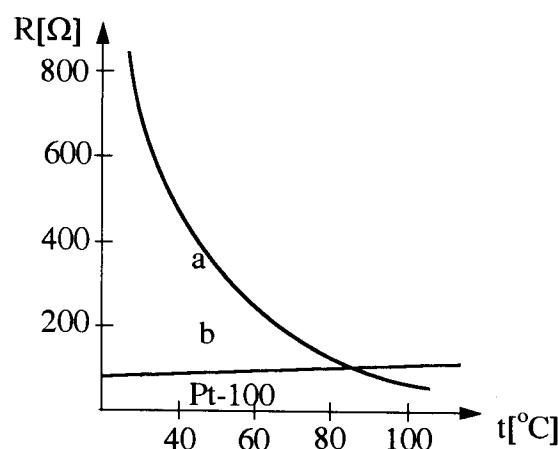
Konačno je otpornost termistora data izrazom:

$$R(T) = A e^{\frac{B}{T}}, \quad (8)$$

gde su A i B konstante koje karakterišu određeni termistor. Veza između otpora termistora na temperaturama T i T_1 se može napisati u obliku:

$$R(T) = R(T_1) e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}$$

R-T karakteristika tipičnog NTC termistora prikazana je na sl.2.2. (kriva a). Na istoj slici data je i karakteristika platinskog otpornika (kriva b), odakle se uočava znatno veća osetljivost termistora, ali i veća nelinearnost .



Slika 2.2. Oblik R-T karakteristike tipičnog NTC termistora (kriva a) i platinskog termistora (kriva b).

Iz (8) osetljivost termistora, odnosno temperaturski koeficijent otpornosti je:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (9)$$

Osetljivost, dakle, opada sa porastom temperature. Konstanta B kreće se u opsegu 3000 K i 4000 K. Osetljivost u okolini sobnih temperatura iznosi (3-5)%/°C, što je desetak puta više nego kod metalnih otpornika.

Otpornost termistora na sobnoj temperaturi može biti veoma različita, počev od nekoliko desetina omu pa do više megaoma. Nominalna otpornost termistora određuje se sastavom materijala i uslovima sinterovanja, ali se može i naknadno podešavati. Poslednjih godina proizvode se termistori sa uskim tolerancijama, tako da zamena jednog termistora drugim prouzrokuje nereproducibilnost pri merenju temperature od 0.2 °C ili 0.1 °C. Visoka nominalna otpornost termistora odražava se na povećanu osetljivost merenja temperature. Naime, termistorski mostovi, zbog većih otpornosti mogu se napajati višim naponom od mostova sa metalnim otpornim termometrima, pri istom samozagrevanju pretvarača. S obzirom da je osetljivost neuravnoteženih mostova direktno srazmerna naponu za napajanje, osetljivost termistorskih mostova je oko 40-50 puta veća nego sa metalnim pretvaračima.

2.2. LINEARIZACIJA TERMISTORSKIH TERMOMETARA METODOM PREVOJNE TAČKE

Termometrijski mostovi sa mernim intervalima širim od oko 50 °C, imaju po pravilu nelinearnu skalu što je posledica nelinearnosti karakteristike termistora. Međutim, u užim intervalima se može ostvariti delimično poništavanje nelinearnosti karakteristike termistora i mosta, što daje kao rezultat linearizovani signal u zavisnosti od temperature.

Pokazuje se da kod pasivnih mernih kola sa jednim termistorskim pretvaračem, izlazni signal može biti prikazan funkcijom [1]:

$$U(T) = \frac{A_1 R(T) + A_2}{A_3 R(T) + A_4} \quad (10)$$

gde je $R(T)$ otpornost termistora, a $A_1 \dots A_4$ parametri međusobno različitih dimenzija, koji zavise od oblika kola i njegovih elemenata. Pri tome se pretpostavlja da je samozagrevanje zanemarljivo malo. Funkcija (10), na nekoj temperaturi $T = T_i$ ima prevojnu tačku u kojoj je zadovoljen uslov $d^2U(T)/dT^2|_{T=T_i} = U''(T_i) = 0$. Poznato je da se u širem intervalu oko prevojne tačke kriva može aproksimirati pravom linijom što predstavlja osnov linearizacije termistorskih termometara. Prevojna tačka podešava se da bude na sredini mernog opsega, $T_i = (T_{\max} + T_{\min})/2$. Uslov linearizacije funkcije (10) dobija se rešavanjem jednačine:

$$U''(T) = -\frac{U'(T)}{T} \left[2 - \frac{B R(T) A_3 - A_4}{T R(T) A_3 + A_4} \right] = 0, \quad (11)$$

gde je:

$$U'(T) = -\frac{BR(T)}{T^2} \frac{A_1 A_4 - A_2 A_3}{[A_3 R(T) + A_4]^2}$$

naponska osetljivost na temperaturi T . Rešavajući (11), za uslov linearizacije se dobija:

$$\frac{A_4}{A_3} = R(T_i) \frac{B - 2T_i}{B + 2T_i}. \quad (12)$$

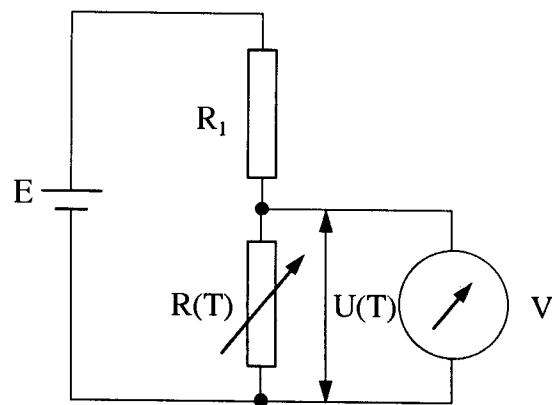
Najjednostavniji linearizovani termistorski termometar je razdelnik napona koji se sastoji od termistora i otpornika stalne otpornosti R_1 , prikazan je na sl.2.3. Voltmetar velike unutrašnje otpornosti pokazuje napon:

$$U(T) = E \frac{R(T)}{R(T) + R_1}. \quad (13)$$

Upoređujući (11) i (13) vide se sledeće veze parametara $A_1 = E$, $A_2 = 0$, $A_3 = 1$, $A_4 = R_1$. Zamenom u (12), za uslov za linearizaciju se dobija:

$$R_1 = R(T_i) \frac{B - 2T_i}{B + 2T_i} \quad (14)$$

Izazni napon termometra na sl. 2.3. ne može biti nula, pa se kod analognog instrumenta koristi samo manji deo skale. Pomoću razdelnika napona se otuda ne može meriti na osetljivim opsezima voltmetra.

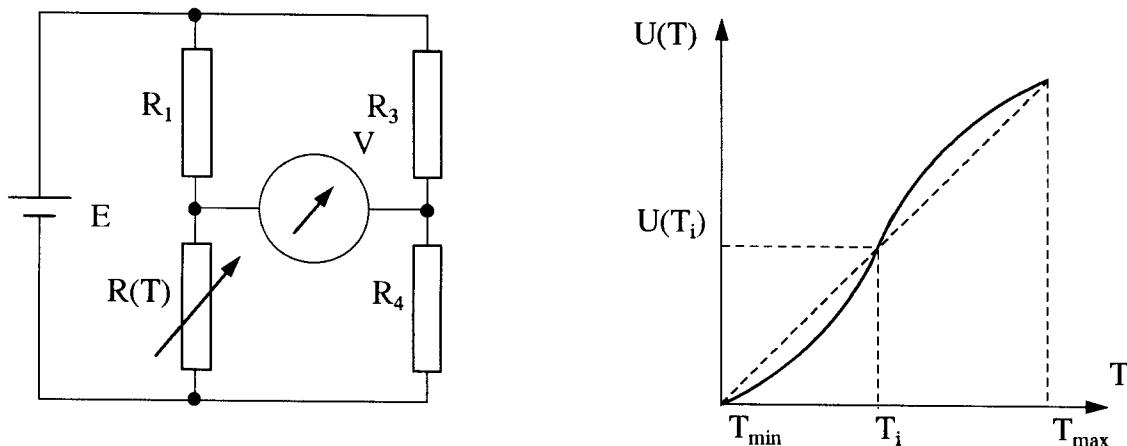


Slika 2.3. Termistorski termometar oblika razdelnika napona.

Most prikazan na sl. 2.4. a, nema pomenuti nedostatak razdelnika napona. Izlazni signal mosta meren visokoomskim voltmetrom je:

$$U(T) = E \left[\frac{R(T)}{R(T) + R_1} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right].$$

Ovaj napon se razlikuje u odnosu na (13) samo za stalni član $ER_3/(R_3 + R_4)$. Prema tome, uslov linearizacije mosta dat je takođe formulom (14). Otpornici R_3 i R_4 dakle ne utiču na linearnost izlaznog napona. Pomoću njih se podešava napon u određenoj tački, na primer ravnoteža mosta na nekoj temperaturi. Kada se napon meri analognim voltmetrom sa nulom na početku skale, ravnoteža se podešava na minimalnoj temperaturi T_{\min} , sl. 2.4. b.



Slika 2.4. a) Linearizovani termistorski most, b) zavisnost izlaznog napona od temperature.

Ako instrument ima nulu na sredini skale, most se uravnovežava u prevojnoj tački, tj. $U(T_i) = 0$. Pri merenju napona digitalnim voltmetrom nastoji se da izlazni napon mosta u jedinicama 10^{-3} V ili 10^{-2} V bude brojno jednak merenoj temperaturi, koja se može direktno čitavati na voltmetru.

Prvi izvod izlaznog napona mosta u prevojnoj tački iznosi:

$$U'(T_i) = E \frac{B^2 - 4T_i^2}{4BT_i^2}.$$

Drugi i treći izvodi su:

$$U''(T_i) = 0 \quad U'''(T_i) = -\frac{B^2}{2T_i^4} U'(T_i).$$

Aproksimacijom funkcije $U(T)$ u okolini prevojne tačke pomoću prva četiri člana Tejlorovog reda dobija se:

$$U(T_i + \Delta T) = U(T_i) + U'(T_i)\Delta T \left[1 - \frac{B^2(\Delta T)^2}{12T_i^4} \right].$$

Iz ove jednačine se vidi da je izlazni napon približno linearna funkcija temperature ukoliko je ispunjen uslov $B^2(\Delta T)^2/12 T_i^4 \ll 1$.

2.3. NTC TERMISTORI U REŽIMU POVEĆANE DISIPACIJE

Temperatura otpornih termometara pri ustaljenom režimu je uvek viša od temperature okoline usled pretvaranja električne energije u toplotu. Ako se u nekom otporniku pri konstantnoj temperaturi okoline razvija snaga P , razlika temperature otpornika i okoline je:

$$\Delta T = \frac{P}{K},$$

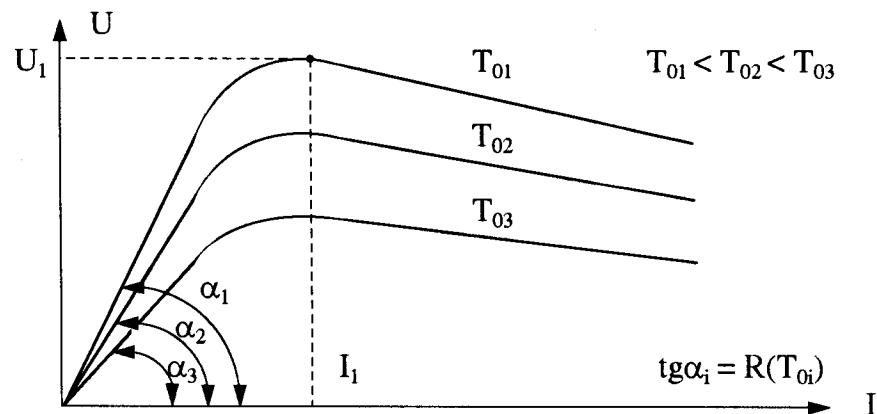
gde je K disipaciona konstanta. Ona iznosi:

$$K = hS,$$

gde je S površina pretvarača, a h koeficijent prelaza toplote na površini pretvarač - fluid. Disipaciona konstanta termistora se kreće počev od oko 10^{-6} W/ $^{\circ}$ C za minijaturne, pa do 50 mW/ $^{\circ}$ C za masivne termistore sa rashladnim površinama. Disipaciona konstanta u tečnostima je znatno veća nego u gasovima. Ona se povećava sa brzinom fluida što je naročito izraženo kod gasova. Na ovoj pojavi se zasniva rad termistorskih anemometara, vakuummetara i analizatora gasova.

Na sl. 2.5. su prikazane I - U karakteristike NTC termistora za tri različite temperature okoline. U početnom delu krivih, koji odgovara malim disipacijama, sve karakteristike su linearne. Samozagrevanje se tada može zanemariti, pa je temperatura termistora skoro konstantna

i bliska temperaturi okoline. Nagib linearne delatnosti karakteristike jednak je otpornosti termistora na temperaturi ambijenta.



Slika 2.5. Statističke strujno napone karakteristike NTC termistora pri različitim temperaturama ambijenta T_0

Kod primene termistora za merenje temperature radi se uvek sa malim disipacijama, tj. u linearnom delu $I - U$ karakteristike. Tada je samozagrevanje termistora zanemarljivo, pa se temperatura senzora neznatno razlikuje od temperature okolne sredine. U suprotnom, kada su disipacija i samozagrevanje veliki, javljaju se sistematske greške. Pokazivanje termometara je nešto više i ono zavisi od karakteristika sredine u kojoj se meri i od brzine fluida. Naime, koeficijent prelaza topline h i disipaciona konstanta se menjaju zavisno od vrste i brzine fluida. Osim toga, povećana disipacija pretvarača izaziva i izvesno zagrevanje okoline, što je posebno izraženo kada je masa objekta čija se temperatura meri mala. Zbog pomenutih problema, samozagrevanje termistorskih i drugih otpornih pretvarača obično mora biti ispod $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Kod preciznih platinskih termometara dozvoljeno samozagrevanje ne prelazi $0.001 \text{ } ^\circ\text{C}$. Kontrola samozagrevanja vrši se izborom odgovarajuće maksimalno dozvoljene struje pretvarača, odnosno napona za napajanje mosta. S tim u vezi neophodno je poznavati disipacionu konstantu pretvarača u fluidima u kojima se termometar koristi.

Otpornost termistora koji radi sa znatnim samozagrevanjem, pri stalnoj temperaturi ambijenta T_0 , može se napisati kao:

$$R(T_0 + \Delta T) = \frac{U}{I} = R(T_0) e^{B \left(\frac{1}{T_0 + \Delta T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (15)$$

gde je $\Delta T = U I / K$.

Iz (15) za naponsko strujnu karakteristiku termistora se dobija [1]:

$$U = IR(T_0)e^{B\left(\frac{1}{T_0+U/I/K} - \frac{1}{T_1}\right)}.$$

Temperatura termistora kada napon dostiže maksimum data je izrazom [1]:

$$T_1 = \frac{B}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4T_0}{B}} \right).$$

Maksimalni napon iznosi [1]:

$$U_1 = \sqrt{K(T_1 - T_0)R(T_1)},$$

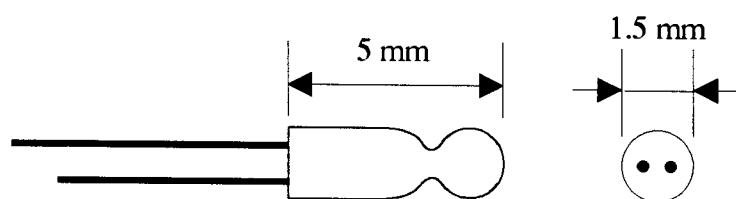
gde je $R(T_1) = R(T_0) \exp B(1/T_1 - 1/T_0)$.

Termistori u režimu povećane disipacije koriste se za merenje raznih veličina koje utiču na disipacionu konstantu, odnosno na prenos topline sa termistora na fluid. Osetljivost termistora je pri tome znatno veća nego pretvarača sa ugrejanom niti.

3. EKSPERIMENTALNI DEO

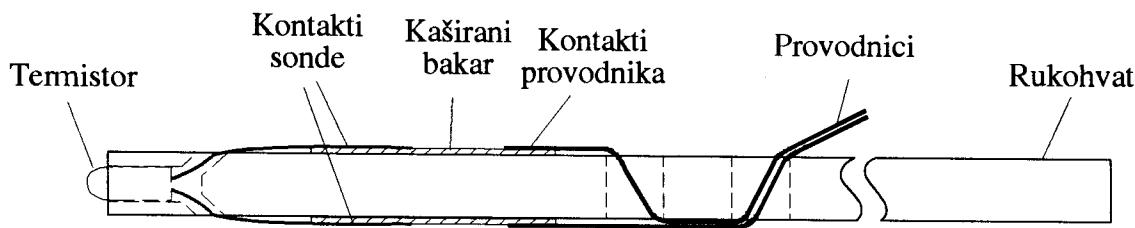
3.1. KONSTRUKCIJA MERNE SONDE

Termistor koji je korišćen kao temperaturski pretvarač je cilindričnog oblika, zatopljen u staklo, tako da su dimenzije konačnog elementa $\phi 1.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (slika 3.1). Radi lakšeg



Slika 3.1. Izgled termistora.

manipulisanja, pretvarački element je ugrađen u odgovarajuću mernu sondu. Ova sonda je izrađena od pertinaksa debljine 3mm. Na čeonom delu pertinaksa ubušen je kanal prečnika 1.5mm i dubine 7mm u koji se uvlači sa prednje strane sam pretvarački element, tako da viri samo vrh oko 0.5mm. Kroz dva ukosa izbušena otvora, na zadnjem kraju kanala, provučeni su metalni izvodi pretvaračkog elementa. Ti izvodi su zalemljeni za bakarne slojeve nanete na pertinaks, u dužini od oko 15mm, a na iste površine su zalemljeni i provodnici koji služe za povezivanje pretvarača u merno kolo. Širina pločice od pertinaksa u koji je ugrađen pretvarački element iznosi 7mm, a dužina 150mm. U slučaju potrebe, moguće je suziti sondu, ili bar čoni deo, na širinu od oko 3mm. Konstrukcija sonde je prikazana na slici 3.2.



Slika 3.2. Konstrukcija merne sonde.

3.2. ODREĐIVANJE ZA VISNOSTI OTPORA TERMISTORA OD TEMPERATURE

Prema specifikaciji proizvođača, termistor korišćen u ovom radu je primenljiv za merenje temperature u opsegu od -55 °C do 200 °C. Prvi korak u izradi uređaja ili mernog kola za merenje temperature je određivanje zavisnosti otpora tog elementa od temperature. U tu svrhu potrebno je ostvariti pouzdane vrednosti temperatura u opsegu u kom će se primenjivati dati termistor. S obzirom da je cilj ovog rada izrada uređaja za merenje temperature u intervalu od oko -30 °C do 150 °C, pri merenju ove zavisnosti korišćene su različite tečnosti čije temperature očvršćavanja, ili pak ključanja leže u datom intervalu. Spisak korišćenih tečnosti i odgovarajuće temperature očvršćavanja i ključanja date su u tabeli 3.1. Temperature očvršćavanja ili ključanja koje su van intervala (-30, 150) °C su u tabeli izostavljene.

Tabela 3.1. Spisak korišćenih tečnosti i odgovarajuće temperature očvršćavanja i ključanja.

	TEMPERATURA OČVRŠĆAVANJA °C	TEMPERATURA KLJUČANJA °C
UGLJENTETRAHLORID	-23.00	76.54
TOLUOL		111.00
BENZOL	5.60	80.20
HLOROFORM		61.00
ETANOL		78.50
ACETON		56.00
VODA	0.00	100.00

U ovom radu podrazumevamo da je greška za vrednosti temperatura u tabeli 3.1. znatno manja od greške merenja ostalih veličina koje su merene u ovom radu. Vrednosti temperatura navedenih u tabeli 3.1. uzete su iz [4]. Da bi se dobile vrednosti otpora i na drugim temperaturama sem onih datih u tabeli 3.1. merenja su vršena na sobnoj temperaturi uz korišćenje termometra čija greška iznosi ± 0.25 °C. Merenje otpora pretvaračkog elementa na temperaturama iznad 50 °C urađeno je pomoću termostatirane peći, u kojoj se temperatura može kontrolisati sa tačnošću od ± 0.5 °C, i termometra predviđenog za merni opseg 0-200 °C sa greškom od ± 0.5 °C. Tačka od -10 °C izmerena je u zamrzivaču, gde je temperatura dovoljno stabilna, uz korišćenje termometra sa greškom od ± 0.01 °C.

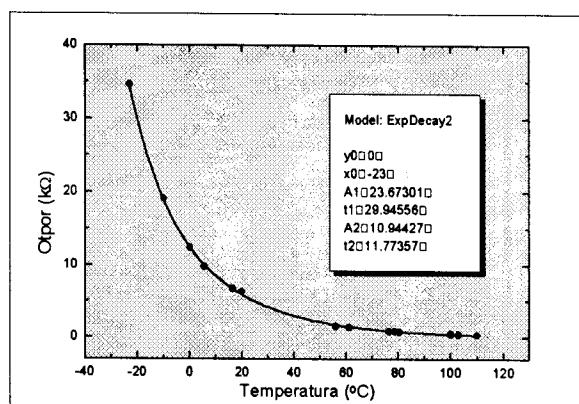
Otpor pretvaračkog elementa je meren pomoću digitalnog univerzalnog instrumenta Hewlett-Packard E2377A. Greška merenja otpora iznosi $\pm 0.5 \Omega$ u opsegu 0 - 2 k Ω i $\pm 5 \Omega$ u opsegu 2 - 20 k Ω .

Dobijene vrednosti otpora na različitim temperaturama, sa odgovarajućim greškama date su u tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Vrednosti otpora na različitim temperaturama.

$t(^{\circ}\text{C})$	$R(\text{k}\Omega)$
-23.0	34.000 ± 50
-10.0 ± 0.01	19.100 ± 5
0.0	12.440 ± 5
5.6	9.740 ± 5
15.5 ± 0.25	6.500 ± 5
16.5 ± 0.25	6.750 ± 5
19.8 ± 0.25	6.350 ± 5
56.0	1.548 ± 0.5
61.0	1.311 ± 0.5
63.0 ± 0.5	1.300 ± 0.5
76.5	0.836 ± 0.5
78.5	0.785 ± 0.5
80.2	0.751 ± 0.5
90.0 ± 0.5	0.580 ± 0.5
100.0	0.450 ± 0.5
110.0	0.347 ± 0.5
124.0 ± 0.5	0.270 ± 0.5

Zavisnost otpora termistora od temperature grafički je prikazana na slici 3.3.



Slika 3.3. Zavisnost otpora termistora od temperature.

Sa grafika na slici 3.3. moguće je približno odrediti vrednost konstante B primenom izraza

$$R(T) = R(T_1)e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1})},$$

ako se vrednosti otpora uzimaju u okolini srednje temperature predviđenog mernog opsega. Dobijena vrednost u okolini temperature od oko 30°C iznosi $B = 3550 \text{ K}$, što je u dobroj saglasnosti sa specifikacijom proizvođača, koji navodi vrednost od 3420 K . Odstupanje ovih vrednosti iznosi oko 3%.

3.3. VREME ODZIVA TERMISTORA

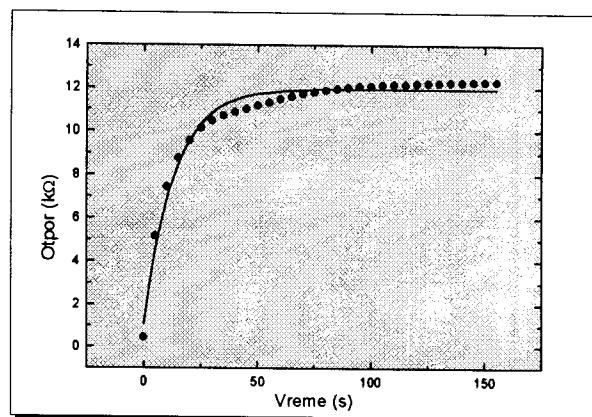
Termistor ne reaguje trenutno na promenu temperature, nego je potrebno izvesno vreme za stabilizaciju njegovog otpora. Zato je izmerena vremenska konstanta τ .

Za određivanje vremenske konstante pri hlađenju potrebno je termistor držati u vodi koja ključa (100°C), a zatim ga brzo zaroniti u smešu leda i vode (0°C). Svakih pet sekundi očitava se vrednost otpora termistora, sve dok se ta vrednost ne stabilizuje. U tabeli 3.3. date su vrednosti otpora termistora u zavisnosti od vremena, a ta zavisnost je grafički prikazana na slici 3.4. Fitovanjem eksponencijalne funkcije dobijena je vremenska konstanta pri hlađenju $\tau = 11 \text{ s}$.

Tabela 3.3. Vrednosti otpora termistora u zavisnosti od vremena.

<i>R (kΩ)</i>	<i>t (s)</i>
0.436	0
5.160	5
7.440	10
8.760	15
9.590	20
10.160	25
10.480	30
10.710	35
10.880	40
11.040	45
11.190	50
11.320	55
11.480	60
11.600	65
11.710	70
11.820	75

<i>R (kΩ)</i>	<i>t (s)</i>
11.890	80
11.960	85
12.020	90
12.070	95
12.100	100
12.130	105
12.160	110
12.180	115
12.210	120
12.230	125
12.240	130
12.260	135
12.270	140
12.280	145
12.290	150
12.290	155



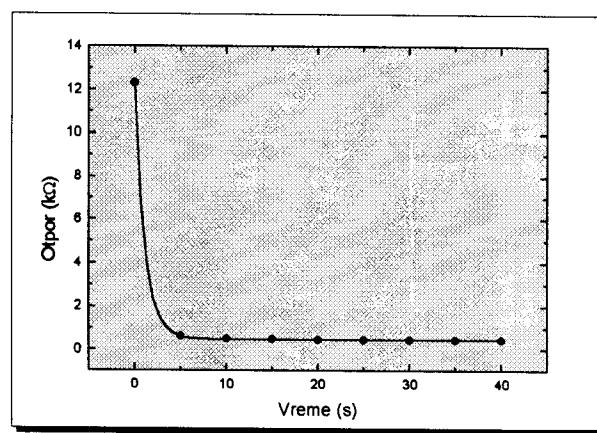
Slika 3.4. Vremenska zavisnost otpora termistora pri hlađenju.

U cilju određivanja vremenske konstante pri zagrevanju termistor je neophodno prenesti iz smeše leda i vode ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) u sud sa ključalom vodom ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vrednosti otpora termistora očitavane su svakih pet sekundi, sve dok se ona nije stabilizovala. U tabeli 3.4. date su vrednosti otpora termistora u zavisnosti od vremena, a zavisnost je grafički prikazana na slici 3.5. U ovom slučaju dobijena je vremenska konstanta pri zagrevanju $\tau = 1.1\text{ s}$.

Tabela 3.4. Vrednosti otpora termistora u zavisnosti od vremena.

$R\text{ (}k\Omega\text{)}$	$t\text{ (s)}$
12.330	0
0.628	5
0.498	10
0.452	15
0.441	20
0.440	25
0.438	30
0.437	35
0.437	40

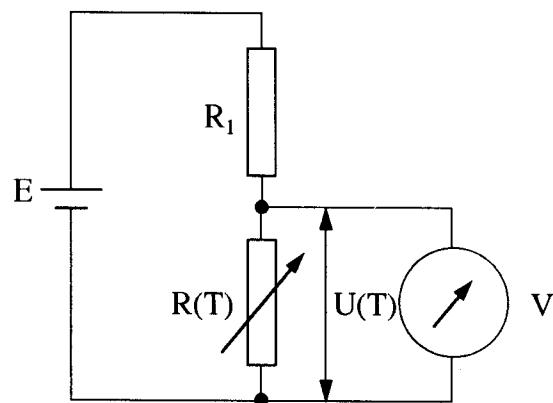
Primećujemo deset puta brži odziv u slučaju zagrevanja nego u slučaju hlađenja. Ta razlika u vremenu se delimično može objasniti većim brojem generisanih nosilaca nanelektrisanja u jedinici vremena pri zagrevanju termistora, od broja rekombinovanih nosilaca nanelektrisanja u jedinici vremena pri hlađenju.



Slika 3.5. Vremenska zavisnost otpora termistora pri zagrevanju.

3.4. ZAVISNOST NAPONA NA TERMISTORU OD TEMPERATURE

U cilju ugradnje termistora u Vitstonov most potrebno je snimiti zavisnost napona na termistoru od temperature koristeći potenciometarsku vezu datu na slici 3.6. Vrednost otpora R_1 u toj vezi je izabrana tako da bude približno jednaka vrednosti otpora termistora na sobnoj temperaturi i iznosi $R_1 = 5.1 \text{ k}\Omega$. Napon izvora za napajanje iznosi 1.5 V. Kao izvor korišćen je laboratorijski stabilisani izvor napona.



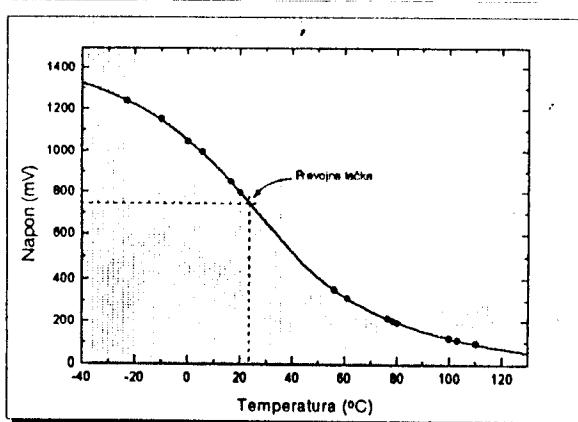
Slika 3.6. Termistorski termometar oblika razdelnika napona.

Napon na termistoru je meren na istim temperaturama kao i otpor (vidi tabelu 3.2.). Dobijene vrednosti napona na različitim temperaturama date su u tabeli 3.5.

Tabela 3.5. Vrednosti napona na različitim temperaturama.

$t(^{\circ}\text{C})$	$U(\text{mV})$
-23.0	1240.0
-10.0	1155.0
0.0	1048.0
5.6	996.0
16.5	850.0
19.8	792.0
56.0	353.0
61.0	312.0
76.5	214.0
78.5	203.0
80.2	195.0
100.0	120.0
110.0	96.6

Zavisnost napona na termistoru od temperature u intervalu od $-23.0\ ^{\circ}\text{C}$ do $110\ ^{\circ}\text{C}$ predstavljena je grafički na slici 3.7. Kriva na toj slici je dobijena fitovanjem, pri čemu je funkcija koja se fituje izabrana tako da od ponuđenih funkcija u programu za fitovanje (Curve 2D) ima najveći Pirsonov koeficijent r^2 . U prevojnoj tački drugi izvod te funkcije treba da bude nula. Nalaženjem drugog izvoda fitovane funkcije određena je prevojna tačka na $t_i = 23.8\ ^{\circ}\text{C}$.

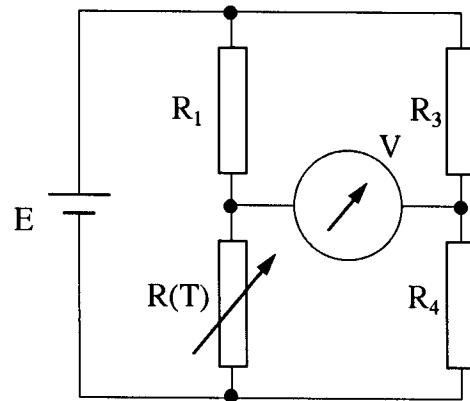


Slika 3.7. Zavisnost napona na termistoru vezanom u razdelnik napona od temperature.

Nakon toga, koristeći vrednost za B, određenu u ovom radu, i vrednost temperature u prevojnoj tački u apsolutnoj skali $T_i = 296.8 \text{ K}$, pomoću izraza:

$$R_1 = R(T_i) \frac{B - 2T_i}{B + 2T_i}$$

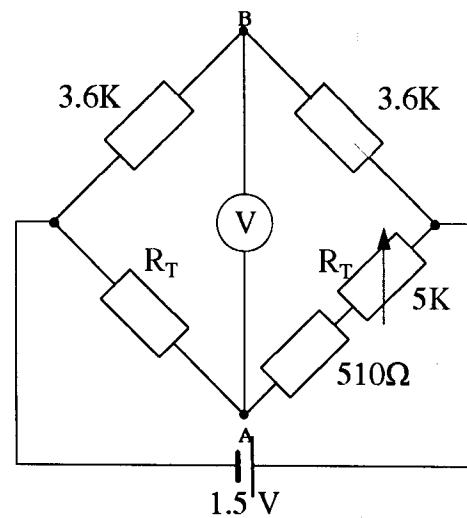
određena je vrednost otpora R_1 koja se ugrađuje u Vitstonov most (slika 3.8.). Ta vrednost iznosi $R_1 = 3.69 \text{ k}\Omega$.



Slika 3.8. Linearizovani termistorski most.

3.5. TERMISTOR U VITSTONOVOM MOSTU

Za uravnotežavanje mosta na temperaturi $t_i = 23.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vrednost otpora R_1 u mostu treba da iznosi $3.69 \text{ k}\Omega$. Međutim, s obzirom na zahtev da se most uravnoteži na temperaturi od $56.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, na kojoj je otpor termistora $1.548 \text{ k}\Omega$, za otpor R_1 je izabrana kombinacija otpornika od 510Ω i preciznog višeobrtnog promenljivog otpora od $5 \text{ k}\Omega$. Za otpore R_3 i R_4 izabrane su vrednosti od $3.6 \text{ k}\Omega$. Napon napajanja mosta iznosi 1.5 V . Šema realizovanog mosta je prikazana na slici 3.9.



Slika 3.9. Šema realizovanog mosta.

Kao što je već pomenuto most se uravnotežava na temperaturi od $56.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, tako da napon između tačaka A i B bude 0 V. Po realizaciji mernog kola izvršeno je uravnotežavanje mosta tokom kog je vrh sonde bio uronjen u ključali aceton.

Na kraju je izvršena kalibracija mernog kola, tj. snimljena zavisnost napona između tačaka A i B od temperature. Izmerene vrednosti napona na različitim temperaturama date su u tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Izmerene vrednosti napona na različitim temperaturama.

<i>U mosta (V)</i>	<i>t (°C)</i>
-0.608	-23.0
-0.571	-8.0
-0.564	-6.0
-0.524	0.0
-0.492	5.6
-0.353	23.5
0.000	56.0
0.046	61.0
0.088	66.0
0.201	76.5
0.223	78.5
0.236	80.2
0.299	89.0
0.388	100.0
0.454	110.0
0.456	111.0
0.549	133.0
0.611	154.0

Na slici 3.10. prikazana je zavisnost između temperature i napona između tačaka A i B, koja zapravo predstavlja kalibracionu krivu. Dobra linearost je postignuta u intervalu od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fitovanjem krive se došlo do zaključka da se ova zavisnost najbolje može predstaviti funkcijom:

$$y = a + bx + cx^3 + de^x + fe^{-x},$$

čiji su parametri:

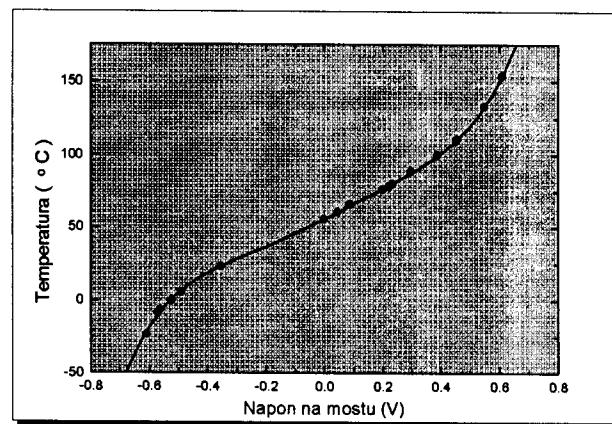
$$a = 1.72188$$

$$b = -59527.159$$

$$c = -10012.794$$

$$d = 29841.636$$

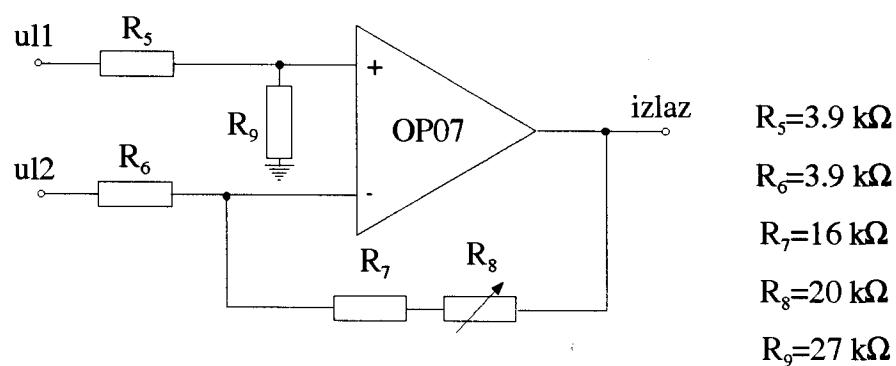
$$f = -29787.572.$$



Slika 3.10. Kalibraciona kriva Vitstonovog mosta

Na grešku merenja temperature pomoću ovakvog kola najviše utiče stabilnost napona v_{AB} . Ta nestabilnost je uvek bila manja od $\pm 2 \text{ mV}$ što odgovara grešci u merenju temperature od $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kao što se vidi iz tabele 3.6., pri promeni temperature od $-23.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $154.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, napon v_{AB} se kreće u granicama $\pm 0.6 \text{ V}$. Taj napon je suviše nizak da bi se, sa dovoljnom tačnošću, direktno mogao očitavati pomoću 8-bitnog A/D konvertora ugrađenog u PC [5]. U tu svrhu je izrađen diferencijalni pojačavač, šematski prikazan na slici 3.11., čije pojačanje iznosi 6.22, tako da se pri naponu $v_{AB} \pm 0.6 \text{ V}$ na ulazu A/D konvertora dobija napon od približno 3.7 V.



Slika 3.11. Šema pojačavača.

U tabeli 3.7. su dati podaci o zavisnosti između temperature i nivoa A/D konverzije M.

Tabela 3.7. Zavisnost između temperature i nivoa A/D konverzije.

<i>t (°C)</i>	<i>M nivo konverzije</i>
-23.0	33.40
-8.0	39.01
-6.0	39.99
0.0	46.09
5.6	50.99
23.5	72.05
56.0	125.64
61.0	132.67
66.0	139.01
76.5	156.19
78.5	159.41
80.2	161.51
89.0	171.02
100.0	184.55
110.0	194.58
111.0	194.88
133.0	208.98
154.0	218.37

Uspostavljajući funkcionalnu zavisnost između ovih veličina dobija se kalibraciona jednačina za preračunavanje očitanog nivoa konverzije za različite temperature. Na slici 3.12. je grafički predstavljena ta zavisnost, a fitovanjem se došlo do analitičkog izraza za kalibracionu jednačinu:

$$y = [a + c \ln x + e(\ln x)^2 + g(\ln x)^3 + i(\ln x)^4] / [1 + b \ln x + d(\ln x)^2 + f(\ln x)^3 + h(\ln x)^4],$$

čiji su parametri:

$$a = 0.060879344$$

$$b = -0.84913636$$

$$c = 0.13002302$$

$$d = 0.26722398$$

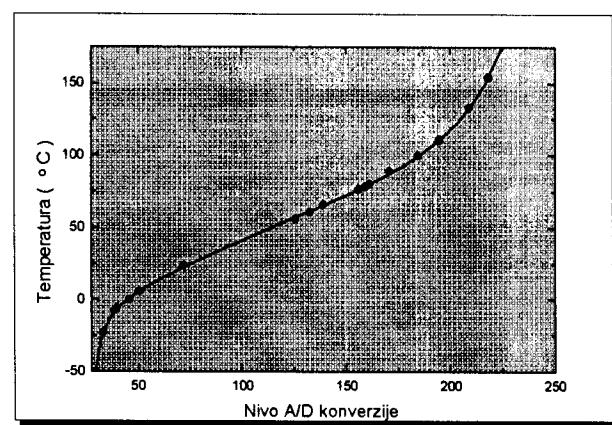
$$e = 0.1687709$$

$$f = -0.037352435$$

$$g = -0.094343822$$

$$h = 0.0019678028$$

$$i = 0.010493176.$$



Slika 3.12. Kalibraciona kriva za korišćenje A/D konvertora.

Ova jednačina se može koristiti za preračunavanje temperature u računarskom programu, kojim se u principu vrši kontrola nekog procesa u kom je bitno merenje i kontrola temperature.

ZAKLJUČAK

Jedan od najjednostavnijih načina za merenje temperature i kontrolu različitih procesa pomoću računara podrazumeva korišćenje termoelektričnih pretvarača. U tu svrhu, kao ekonomski najprihvatljiviji i kao jedni od najosetljivijih pretvarača u opsegu od približno -100 °C pa do nekoliko stotina °C, koriste se poluprovodnički NTC termistori. Zadatak ovog rada je bio izrada i kalibracija termometra sa NTC termistorom, kao i povezivanje sa računarom preko 8-bitnog A/D konvertora.

Nakon definisanja osnovnih pojmoveva vezanih za temperaturu i poluprovodnike, opisan je princip rada NTC termistora, a zatim opis izrade termometra sa NTC termistorom i prikaz njegovih karakteristika.

Merni uređaj realizovan tokom rada ima linearnu karakteristiku (linearnu zavisnost izlaznog napona od temperature) u opsegu od 0 °C do 100 °C, što je postignuto vezivanjem pretvarača u Vitstonov most. Greška merenja temperature procenjena je na ± 0.2 °C. Radi povezivanja sa računarom izrađen je diferencijalni pojačavač sa pojačanjem od 6.22 koji na izlazu daje dovoljan napon za očitavanje pomoću A/D konvertora ugrađenog u PC. Ovo povezivanje je značajno s obzirom da se isti računar može koristiti za kontrolu nekog procesa u kom je bitno održavanje i merenje temperature.

LITERATURA

1. Dragan Stanković: "FIZIČKO-TEHNIČKA MERENJA", "Naučna knjiga", Beograd, 1987.
2. Miroslav Pavlov: "ELEKTRONIKA I", PMF, Novi Sad, 1973.
3. Prospekt "NTC termistori", EI Niš, 1989.
4. Handbook of Chemistri and Physics, 55th edition, R.C. WEAST ed., CRC Press, 1974-1975.
5. Djordje Kaloci: "8-bitni analogno-digitalni i 8-bitni digitalno-analogni konvertor", diplomska rad, Novi Sad, 1996.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

- Redni broj:
RBR
- Identifikacioni broj:
IBR
- Tip dokumentacije: *Monografska dokumentacija*
TD
- Tip zapisa: *Tekstualni štampani materijal*
TZ
- Vrsta rada: *Diplomski rad*
VR
- Autor: *Jelena Milićević*, 102/92
AU
- Mentor: *Dr Zoran Mijatović, docent PMF Novi Sad*
MN
- Naslov rada: *Kontrola i merenje temperature pomoću termistora sa negativnim temperaturskim koeficijentom*
NR
- Jezik publikacije: *Srpski (latinica)*
JP
- Jezik izvoda: *Srpski*
JI
- Zemlja publikovanja: *Jugoslavija*
ZP
- Uže geografsko područje: *Vojvodina*
UGP
- Godina: *1997.*
GO
- Izdavač: *Autorski reprint*
IZ
- Mesto i adresa: *Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novi Sad*
MA
- Fizički opis rada: *(5/41/5/29/0/7/0)*
FO
- Naučna oblast: *Fizika*
NO
- Naučna disciplina: *Fizičko-tehnička merenja*
ND
- Predmetna odrednica/ključne reči:
Termometrija, NTC, Termistor
PO
- Čuva se: *Biblioteka Instituta za fiziku, PMF Novi Sad*
ČU
- Važna napomena: *Nema*
VN
- Izvod: *U radu je konstruisan i kalibriran uredaj za merenje temperature. Termoelektrični pretvarač je NTC termistor.*
IZ
- Datum prihvatanja teme od strane Veća:
DP
- Datum odbrane: *18.12.1997.*
DO
- Članovi komisije:
Predsednik:
Dr. Željko Škrbić, docent, PMF, Novi Sad
Članovi:
Dr. Radomir Kobilarov, vanr. profesor, PMF, Novi Sad
Dr. Zoran Mijatović, docent, PMF, Novi Sad
KO