

REGIONALNI CENTAR ZA TALENTE VRANJE

**MERENJE TEMPERATURE KORIŠĆENJEM
POLUPROVODNIČKIH DIODA I BIPOLARNIH TRANZISTORA
TEMPERATURE MEASUREMENTS USING A SEMICONDUCTOR
DIODE AND BIPOLAR TRANSISTORS**

Autori: KOCIĆ MILOŠ, 3. razred Gimnazije „Stevan Jakovljević“, Vlasotince i
TAKIĆ ALEKSANDRA, 3. razred Gimnazije „Stevan Jakovljević“, Vlasotince
članovi FDV „H. Crnilović-Kica“, Vlasotince

Mentori: MAJA VELJKOVIĆ prof fizike, **NOVICA STOJILKOVIĆ** dipl. ing el.

Vlasotince 2013.

**MERENJE TEMPERATURE KORIŠĆENJEM
POLUPROVODNIČKIH DIODA I BIPOLARNIH TRANZISTORA
TEMPERATURE MEASUREMENTS USING A SEMICONDUCTOR
DIODE AND BIPOLAR TRANSISTORS**

Autori: KOCIĆ MILOŠ, 3. razred Gimnazije „Stevan Jakovljević“, Vlasotince i
TAKIĆ ALEKSANDRA, 3. razred Gimnazije „Stevan Jakovljević“, Vlasotince
članovi FDV „H. Crnilović-kica“, Vlasotince

Mentori: MAJA VELJKOVIĆ prof fizike, **NOVICA STOJILKOVIĆ** dipl. ing el.

Rezime

Ovim radom se želi pokazati kako se mogu iskoristiti poluprovodničke diode i bipolarni tranzistori za merenje temperature. Tačnije, biće pokazano da je potrebno meriti napon na diodi ili napon između baze i emitora pod uslovom da je struja koja protiče kroz diodu ili tranzistor konstantne vrednosti i da je kod tranzistora baza i kolektor u spoju. Temperaturni opseg je dovoljno veliki da je našao primenu u mnogim elektronskim uređajima pa su zbog toga napravljena i mnoga integrisana kola za merenje temperature kao što su: LM 3911, LM 334, LM 335, LM 35, AD 590, AD 592.

Ključne reči: Poluprovodnička dioda, bipolarni tranzistor, konstantna struja, temperatura, voltmetar, senzor

Summary

This paper will show how to take advantage of semiconductor diodes and bipolar transistors for temperature measurement. Specifically, it is argued that it is necessary to measure the voltage on the diode or the voltage between the emitter and base, provided that the current flowing through the diode or transistor constant values that are at the transistor base and collector coupled. Temperature range is large enough that it has been applied in many electronic devices and are therefore made many integrated circuits for measuring temperature, such as: LM 3911, LM 334, LM 335, LM 35, AD 590, AD 592.

Keywords: semiconductor diodes, bipolar transistors, constant current, temperature, voltmeter, sensor

UVOD

Pre svega treba napomenuti da je temperatura (T) jedna od osnovnih veličina u fizici. Temperatura predstavlja stepen zagrejanosti nekog tela. To je neelektrična veličina koja se meri najčešće u svim oblastima ljudske delatnosti. Postoje više temperaturnih skala ali najveći značaj ima Celzijusova skala, prema kojoj se jedan stepen definiše kao stoti deo temperaturne razlike tačke leda i tačke ključanja vode.

Pored Celzijusove temperaturne skale u upotrebi su još Kelvinova i Farenhajtova temperaturna skala.

Merenje temperature je predmet teorijske i eksperimentalne discipline termometrije. Deo termometrije koji obuhvata merenje temperature na području iznad 500°C se uslovno naziva pirometrija. Uređaji kojima se mere te temperature se nazivaju pirometri. Uređaji kojima se uopšte mere temperature se zovu termometri.

Danas se u zavisnosti od ulaznog pretvarača temperatura meri u veoma širokom opsegu (u rasponu od apsolutne nule pa sve do nekoliko hiljada stepeni Celzijusa).

Prvi termometar je konstruisan još u XVI veku i to su bili gasni termometri. Nakon toga su se pojavili termometri na bazi širenja tečnosti i bimetalni termometri. Sa razvojem nauke i tehnologije pojavili su se i različiti električni termometri.

Neki termometri koriste Zebekov efekat i to su termoparovi i njime se mere temperature od 1K do 2900K

Druge termometre čine otporni termometri. Njihov se rad zasniva na promeni otpornosti senzora. Najznačajniji otporni termometar je platinski termometar.

Ukoliko se za konstrukciju otpornog termometra koriste neki drugi materijali, kao što su oksidi metala, sulfid srebra ili barijumtitanat, dobijaju se otpornici osetljivi na temperaturu ili kako se češće nazivaju termistori. Tu spadaju NTC i PTC termistori. Otpornost NTC i PTC termistora je nelinearna funkcija temperature, pa je najčešće potrebno vršiti linearizaciju.

Za precizno merenje temperature koriste se kvarcni termometri, ali je njihova upotreba ograničena na užu opseg temperature.

Za beskontaktna merenja u industriji koriste se pirometri i njime se mere temperature preko 500°C .

LISTA SIMBOLA

k- Bolcmanova konstanta i ona iznosi $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T-Temperatura u kelvinima (K).

q-naelektrisanje elektrona. $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C

U-napon spoja.(V)

I – Jačina struje (A)

I_0 – inverzna struja zasićenja

E_g zabranjena zona za materijal od kojeg je napravljena dioda na 0° K

C - konstanta nezavisna od temperature za diodu datog tipa

MATERIJAL I METOD RADA

Diodni P-N spoj

Pronađeno je da je diodni P-N spoj, kada je napajan konstantnom strujom pokazuje napon koji se menja linearno sa temperaturom. Visok stepen linernosti je naročito interesantan podatak, jer dopušta da kalibracija bude izvedena korišćenjem samo dve fiksne temperaturne tačke.

Razumevanje temperaturnih osobina jednog **P-N** spoja može biti povećano razmatranjem strujno naponske karakteristike diode u opsegu direktne polarizacije. Ta jednačina može biti izražena kao:

$$I = I_0 \cdot e^{\frac{qU}{kT}} \quad 2.1$$

Struja zasićenja je sama po sebi funkcija temperature. Može se pokazati da temperaturna zavisnost I_0 , za uslove rada pri visokom nivou injekcije, može biti zapisana kao:

$$I_0 = f(T) \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad 2.2$$

Gde je E_g zabranjena zona za materijal od kojeg je napravljena dioda na 0° K.

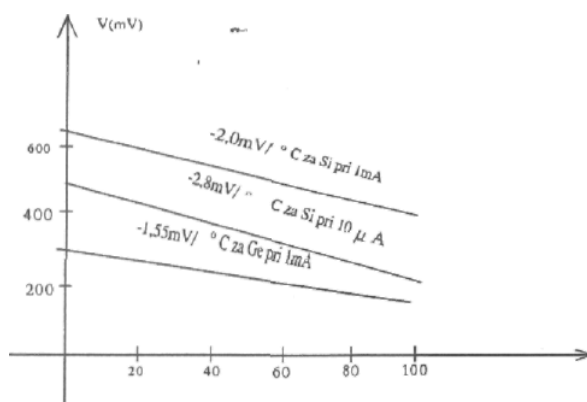
Pokazalo se da funkcija $f(T)$ ima zavisnost koja poništava član $T^{3/2}$. Kombinovanjem 2.1 i 2.2 za napon spoja U, dobija se sledeća jednačina.

$$U = \frac{E_g}{q} - \frac{(\ln C - \ln I) \cdot k \cdot T}{q} \quad 2.3$$

Gde je C konstanta nezavisna od temperature za diodu datog tipa. Iz jednačine 2.3 sledi da kada dioda radi pri uslovima konstantne struje, diodni napon se linearno menja sa temperaturom i osetljivost je data sa 2.4.

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{(\ln C - \ln I) \cdot k}{q} \quad 2.4.$$

Na slici 1 prikazana je promena napona na diodi od silicijuma i germanijuma pri konstantnim strujama od $10\mu A$ i $1mA$. Na njoj se vidi da je promena napona na diodi vrlo linearna. u temperaturskom opsegu od 0 stepeni celzijusa pa do 100 stepeni celzijusa. Napon na diodi je dat u milivoltima.



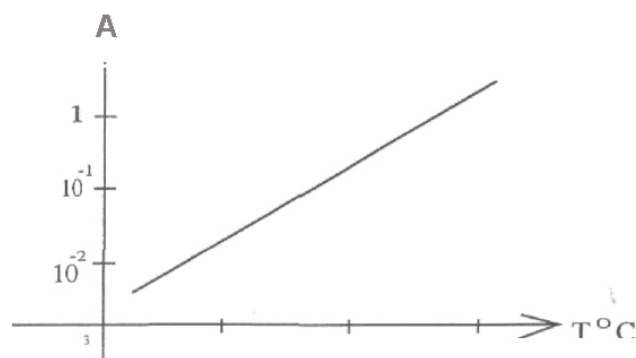
Slika 1

Za silicijumsku diodu, koja radi pri struji od $10\mu A$ tipična osetljivost je približno $-2,8mV/^{\circ}C$ i opada sa porastom struje do $-2,0mV/^{\circ}C$ pri struji od $1mA$.

Za germanijumsku diodu, koja radi pri struji od $1mA$ tipična osetljivost je $-1,55mV/^{\circ}C$.

U praksi struja kroz P-N spoj, pored difuzione komponente sadrži i druge komponente, uglavnom zbog površinskog curenja i rekombinacije. Zbog toga obične diode ne prate bezuslovno jednačinu 2.3 i njihove karakteristike mogu biti neprimenljive ukoliko se totalna struja menja.

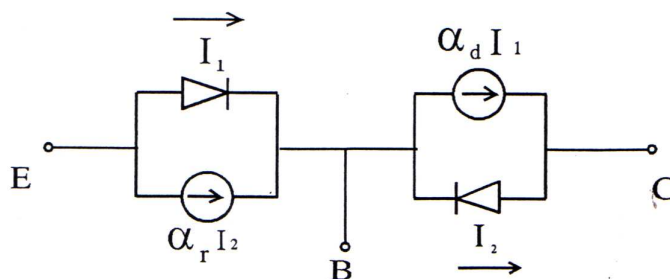
Pored napona na diodi i struja I_0 je u funkciji temperature. Međutim ona je nelinearna i vrlo mala pa ju je teško meriti. Promena ove struje je takva da se za svakih $10^{\circ}C$ ona udvostruči. Na slici 2 prikazana je logaritamska zavisnost struje I_0 od temperature.



Slika 2

Temperaturne osobine tranzistorskog P-N spoja

Diodni spoj emitor-baza tranzistora je dvostruko korisniji u tom pogledu nego li sama dioda. Difuzione komponente su manji deo totalne struje nego što je to slučaj kod diode. Tačnije difuziona komponenta protiče kroz kolektor a ostale komponente se pojavljuju kao bazna struja. Ako tranzistor radi sa konstantnom strujom I_c može se očekivati da napon spoja emitor-baza prati jednačinu 2.4. Na slici 3 je prikazan model tranzistora.



Slika 3

Jednačine koje opisuju ponašanje tranzistora su:

$$I_E = I_{ES} \cdot (e^{U_{EB}/U_t} - 1) + I_{CS} \cdot (e^{U_{CB}/U_T} - 1) \cdot \alpha_r \quad 3.1$$

$$I_C = I_{CS} \cdot (e^{U_{CB}/U_t} - 1) + I_{ES} \cdot (e^{U_{EB}/U_T} - 1) \cdot \alpha_d \quad 3.2$$

$$\text{Pri čemu je } U_T = \frac{kT}{q} \quad 3.3$$

Kako je kolektor – baza u praksi u kratkom spoju onda je $U_{CB}=0$ onda je:

$$e^{U_{CB} / U_T} - 1 = 0 \quad 3.4$$

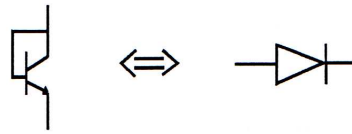
Kako je $\alpha_d = 1$ onda imamo da je:

$$I_C = I_{ES} \cdot (e^{U_{EB} / U_T} - 1) \quad 3.5$$

Kao što se vidi sa slike 4 jednostavno se prespoji kolektor i baza. Na slici 5 dat je ekvivalent za ovakav spoj tranzistora i sa slike se vidi da se tranzistor može smatrati kao dioda.



Slika 4



Slika 5

Struja koja prolazi kroz kolektorski spoj se može smatrati kao struja kroz diodu.

$$I_C = I_S \cdot e^{-\frac{qU_{g0}}{kT}} \cdot e^{\frac{qU_{EB}}{kT}} \quad 3.6$$

$$I_C = I_S \cdot e^{-\frac{q(U_{g0} - U_{EB})}{kT}} \quad 3.7$$

$$U_{EB} = U_{g0} - \frac{k}{q} \cdot T \cdot \ln \frac{I_S}{I_C} \quad 3.8$$

$$\frac{\Delta U_{EB}}{\Delta T} = -\frac{k}{q} \cdot \ln \frac{I_S}{I_C} \quad 3.9$$

Ovaj izraz pokazuje osetljivost U_{EB} od temperature i vidi se iz izraza da napon U_{EB} opada sa porastom temperature. Ovaj izraz važi pod uslovom da je I_c i I_s konstanto.

Koristeći sve ovo navedeno napravljena su integrisana kola specijalizovana za merenje temperature kao što su: LM 3911, LM 334, LM 335, LM 35, AD 590, AD 592. Merni opseg može biti od -55°C do 150°C .

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Da bi pokazali praktično ova teoretska razmatranja potrebna nam je sledeća aparatura.

- Jednosmerni napon napajanja sa minimalnim naponom od 15V a maksimalnim 20V.
- Izvor konstantne struje koja se može regulisati tako da je moguće dobiti opseg struje od $200\mu\text{A}$ do $550\mu\text{A}$.
- Dva unimera od kojih će jedan biti ampermetar a drugi voltmetar,
- Sonde napravljene sa 1N 4148, BC 546B i BC 337-40,
- Termometar,
- Kablovi sa bananicama kako bi se sve to spojilo i bilo izvršeno merenje
- Grejno telo kojim će biti zagrejana voda do ključanja

Poluprovodnička dioda 1N 4148 i bipolarni tranzistori BC 546B i BC 337-40 su uzeti iz razloga jer se mogu naći lako u prodavnicama elektronskih komponenata. (na pr. Elementa, Sprintel, Kelco, MG electronic, Proelectronic i td.) . Cena je veoma niska i kreće se od 1 dinara pa do 6 dinara.

Na slici 6 je šematski prikaz povezivanja kako bi bilo izvršeno merenje.



Slika 6

U tabelama 1,2 i 3 prikazani su rezultati merenja za poluprovodničku diodu 1N 4148 i bipolarne tranzistore BC 546B i BC 337-40 pri strujama $250\mu\text{A}$ i $500\mu\text{A}$.

Poluprovodnička dioda 1N 4148		
Temperatura	Napon U_d u mV za $I=250\mu A$	Napon U_d u mV za $I=500\mu A$
10°C	575	605
15°C	564	595
20°C	553	585
25°C	542	575
30°C	531	565
35°C	521	555
40°C	511	545
45°C	501	535
50°C	490	525
55°C	479	514
60°C	469	503
65°C	457	493
70°C	446	482
75°C	434	472
80°C	423	461
85°C	412	451
90°C	401	440
95°C	390	430

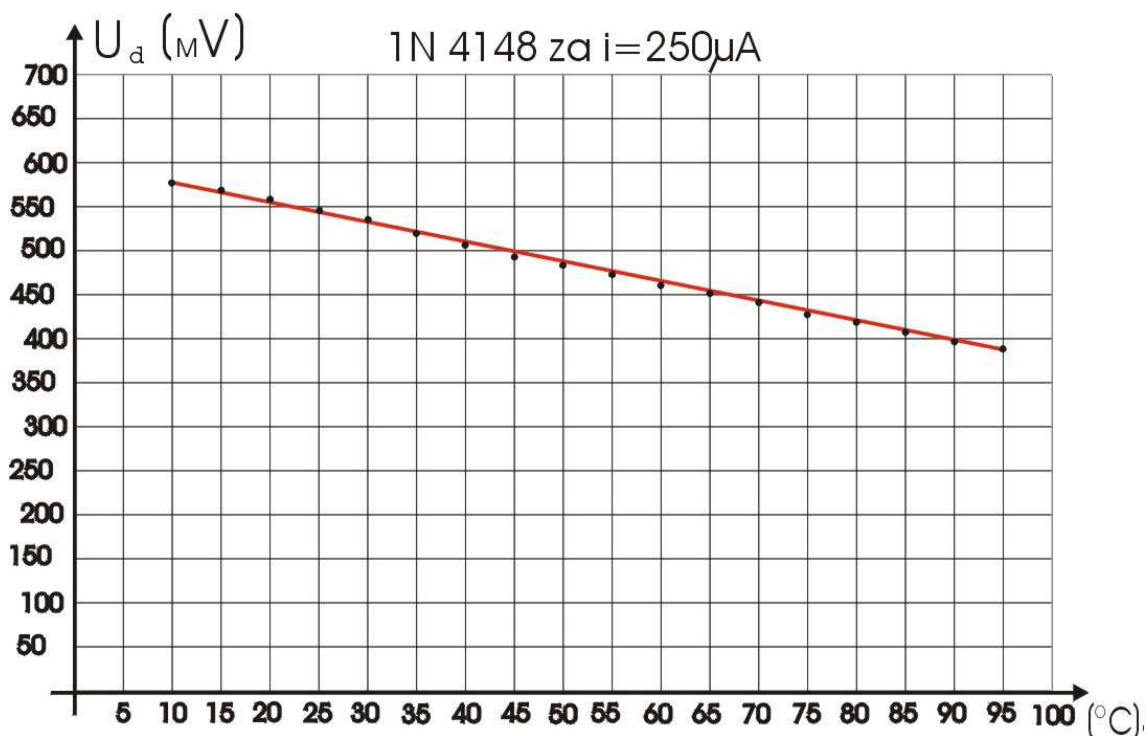
Tabela 1, vrednosti napona u funkciji temperature diode 1N4148 za struje 250 μA i 500 μA
Table 1, voltage values as a function of temperature for 1N4148 diode current 250 μA and 500 μA

Bipolarni tranzistor BC 546B		
Temperatura	Napon U_{BE} (mV) za $I=250\mu A$	Napon U_{BE} (mV) za $I=500\mu A$
10°C	620	634
15°C	609	623
20°C	598	613
25°C	586	603
30°C	574	593
35°C	563	582
40°C	552	570
45°C	542	560
50°C	531	549
55°C	520	538
60°C	508	527
65°C	497	516
70°C	486	504
75°C	474	492
80°C	463	482
85°C	451	472
90°C	440	461
95°C	429	451

Tabela 2, vrednosti napona u funkciji temperature tranzistora BC546B za struje 250 μA i 500 μA
Table 2, voltage values as a function of temperature for BC546B transistor current 250 μA and 500 μA

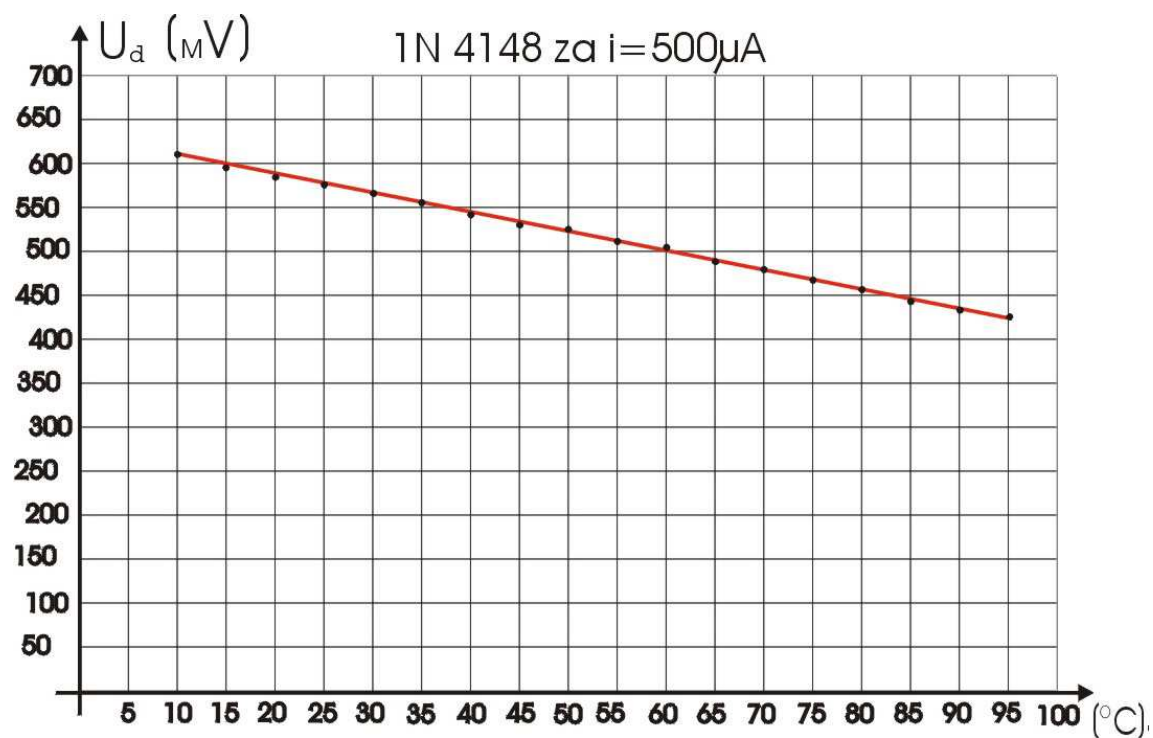
Bipolarni tranzistor BC 337-40		
Temperatura	Napon U_{BE} u mV za $I=250\mu A$	Napon U_{BE} u mV za $I=500\mu A$
10°C	573	605
15°C	563	594
20°C	553	583
25°C	541	573
30°C	530	562
35°C	519	552
40°C	508	542
45°C	497	533
50°C	485	523
55°C	475	512
60°C	464	503
65°C	452	493
70°C	442	482
75°C	432	471
80°C	420	461
85°C	410	450
90°C	400	439
95°C	389	429

Tabela 3, vrednosti napona u funkciji temperature tranzistora BC337-40 za struje $250\mu A$ i $500\mu A$
 Table 3, voltage values as a function of temperature transistor BC337-40 to $250\mu A$ and $500\mu A$ current



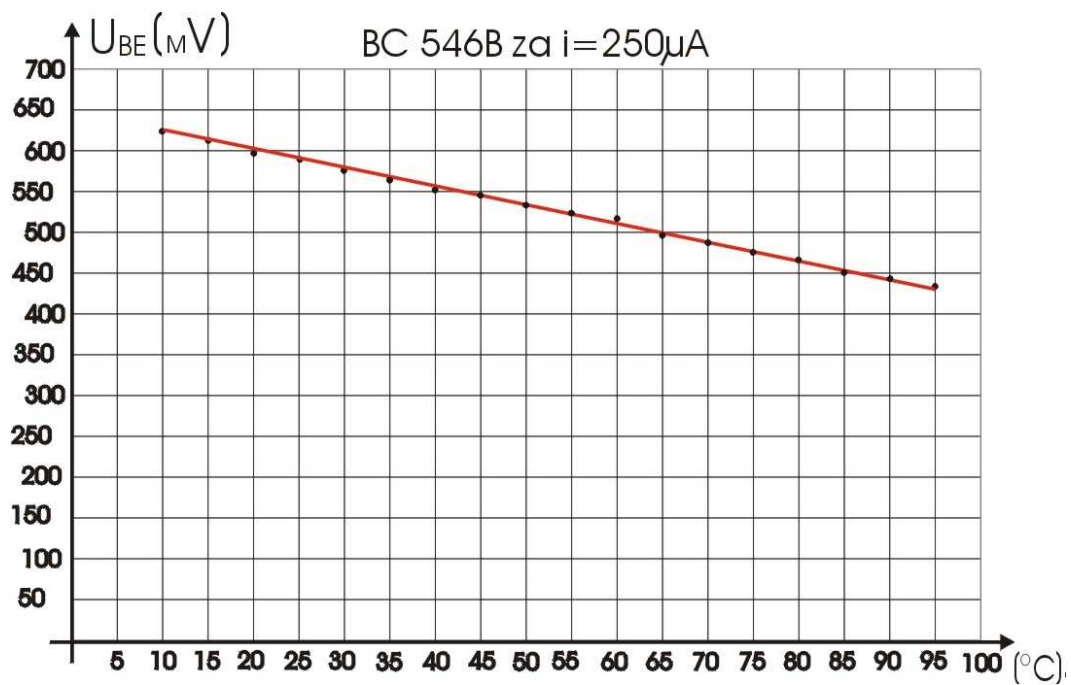
Slika 7, grafik za diodu 1N 4148 pri struji od $250\mu A$

$$\text{Osetljivost je } \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{390 - 575}{95 - 10} = \frac{-185}{85} = -2,176471 \frac{mV}{K}$$



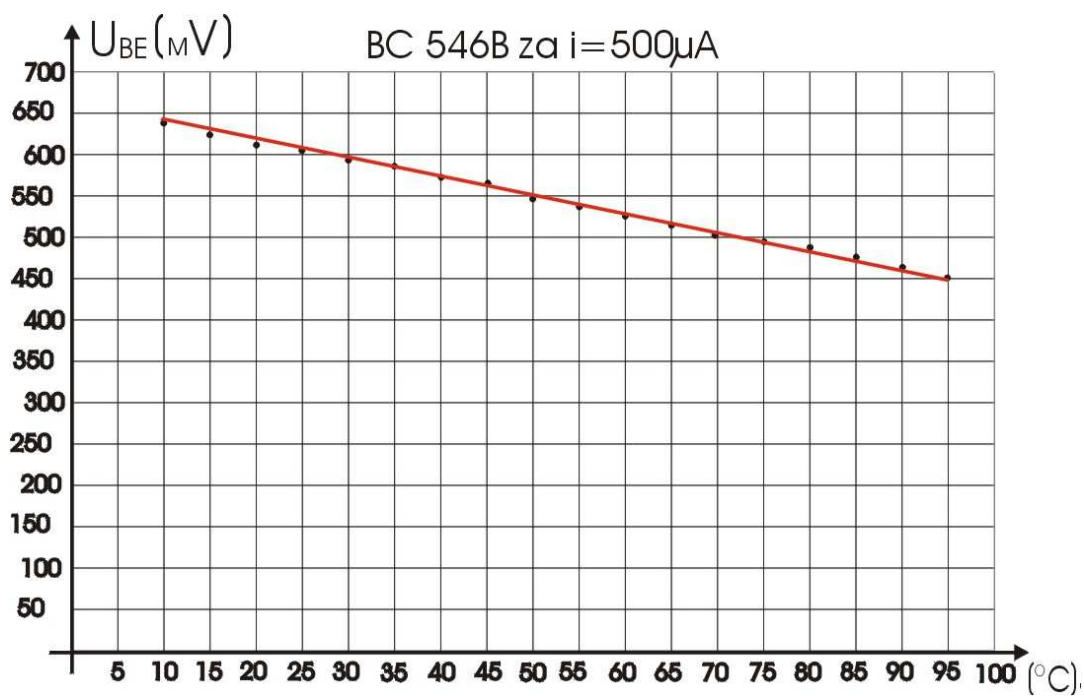
Slika 8, grafik za diodu 1N 4148 pri struji od $500\mu A$

Osetljivost je $\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{429 - 606}{95 - 10} = \frac{-177}{85} = -2,082352 \frac{mV}{K}$



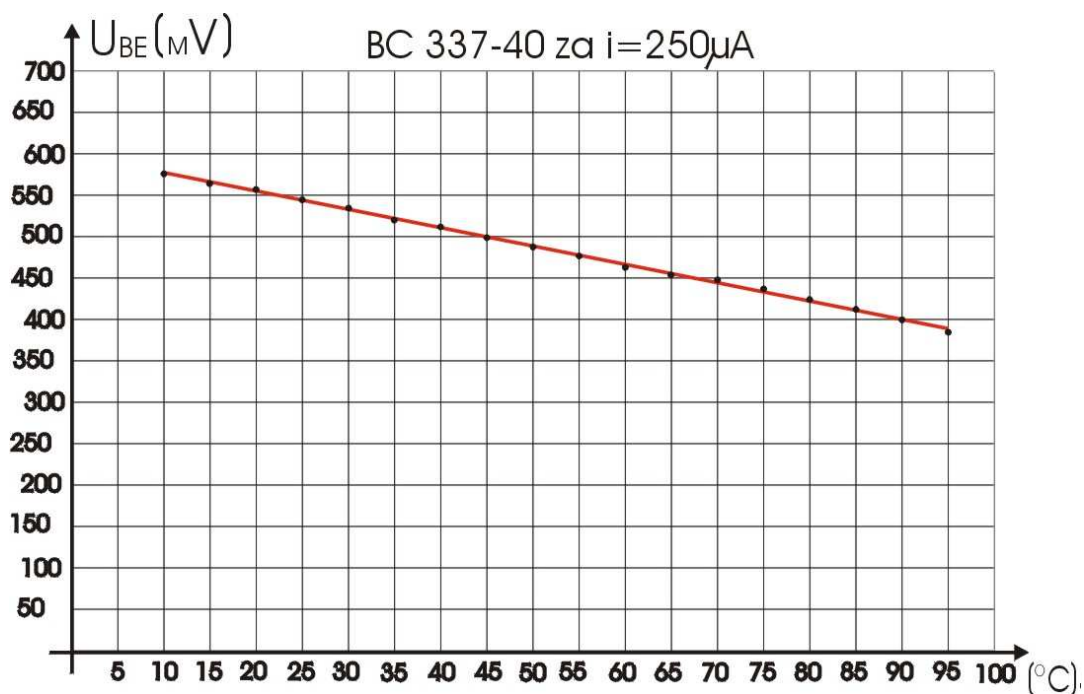
Slika 9, grafik za tranzistor BC 546B pri struji od $250\mu A$

Osetljivost je $\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{428 - 621}{95 - 10} = \frac{-193}{85} = -2,270588 \frac{mV}{K}$



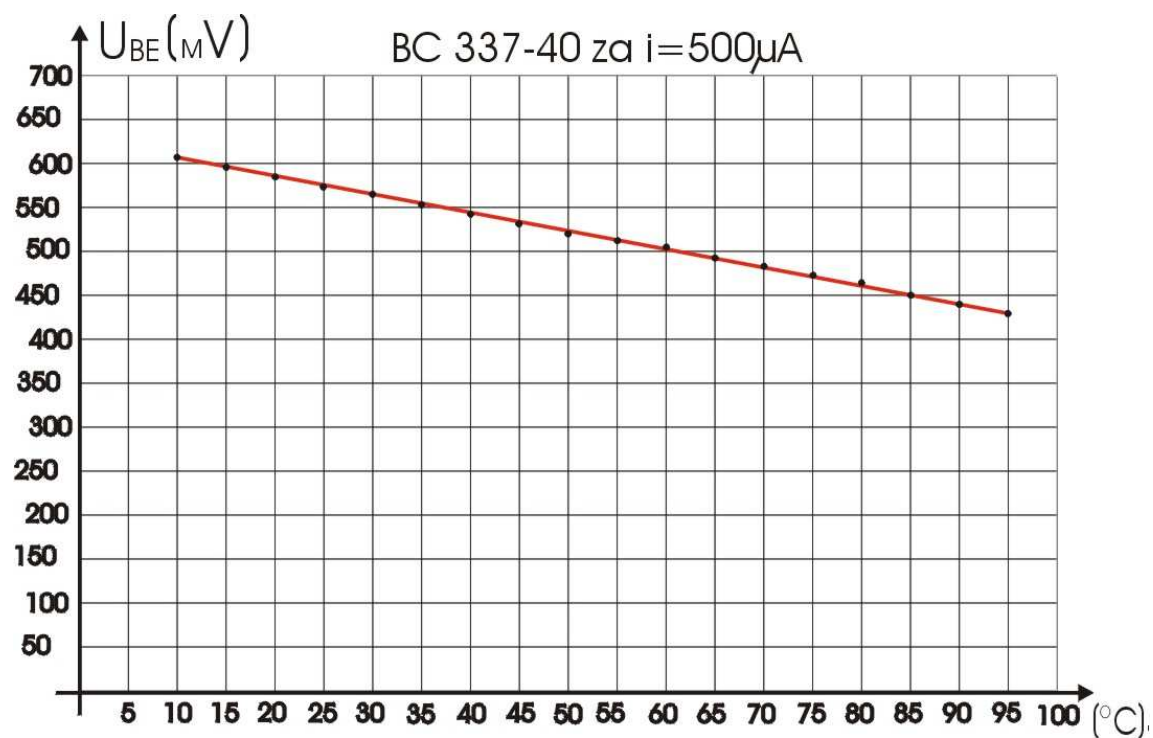
Slika 10, grafik za tranzistor BC 546B pri struji od $500\mu A$

osetljivost je $\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{450 - 635}{95 - 10} = \frac{-185}{85} = -2,176470 \frac{mV}{K}$



Slika 11, grafik za tranzistor BC 337-40 pri struji od $250\mu A$

osetljivost je $\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{390 - 574}{95 - 10} = \frac{-184}{85} = -2,164705 \frac{mV}{K}$

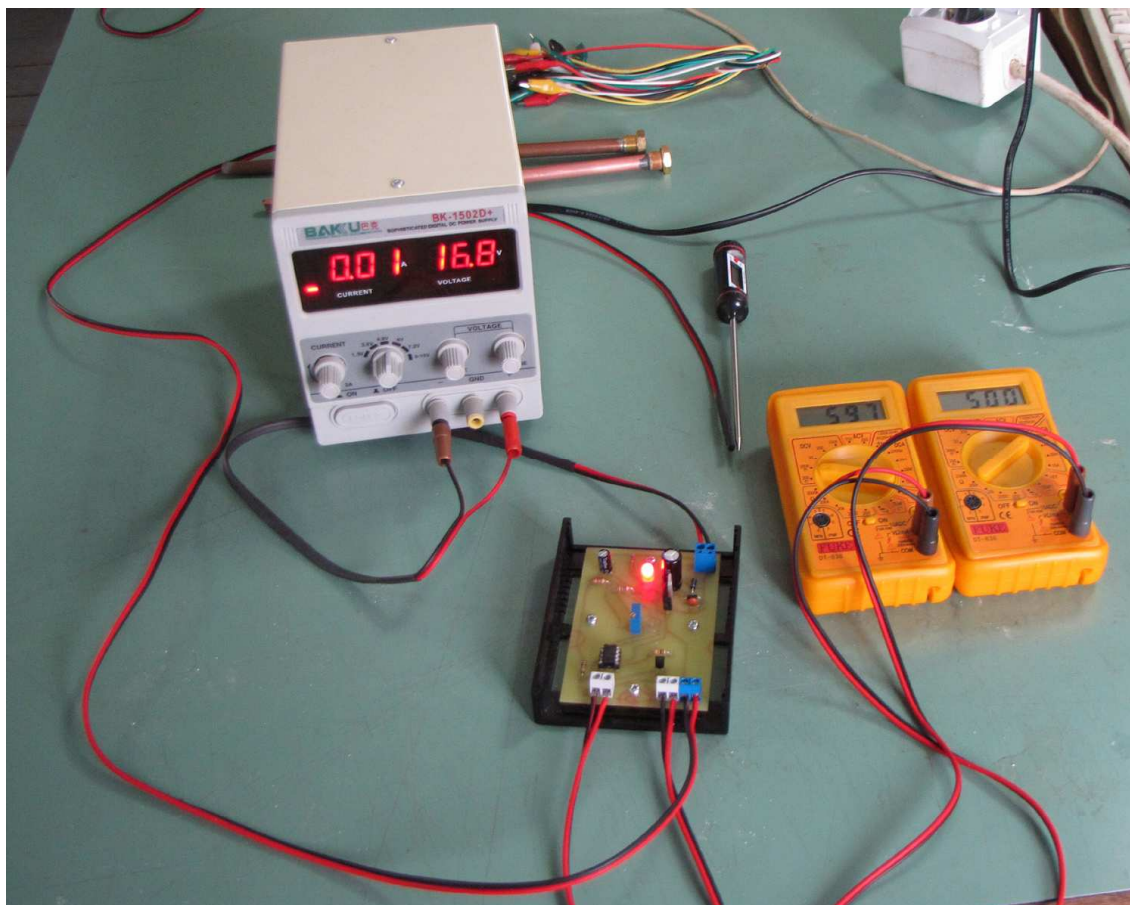


Slika 12, grafik za tranzistor BC 337-40 pri struji od $500\mu A$

osetljivost je $\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{429 - 605}{95 - 10} = \frac{-176}{85} = -2,070588 \frac{mV}{K}$



Slika 13, autori i aparatura za merenje



Slika 14, izgled aparature za merenje

ZAHVALNOST

Zahvaljujemo se mentoru Novici Stojilkoviću koji nam je posudio izvor napajanja, termometar, izvor konstantne struje kao i sonde koje su napravljene sa diodom 1N 4148 i tranzistorima BC 546B i BC 337-40.

ZAKLJUČAK

Ovim radom je pokazano da poluprovodničke diode i bipolarni tranzistori mogu uspešno biti iskorišćeni za merenje temperature. Visok stepen linearnosti napona u funkciji temperature je naročito interesantan podatak, jer dopušta da kalibracija bude izvedena korišćenjem dve fiksne temperaturne tačke. Merene karakteristike za poluprovodničku diodu 1N 4148 i bipolarne tranzistore BC 546B i BC 337-40 mogu poslužiti nekome pri izradi termometra. Osetljivost je negativna i nešto je veća od -2mV/K , što znači da sa porastom temperature napon opada.

LITERATURA

- [1] S. M. Lazović, V. B. Litovski, *Elektronika I*, Naučna knjiga Beograd, 1989.