



Ispravljačka dioda kao temperaturni senzor¹

Antonio Svedružić², Danijel Ptičar³, Juraj Crneković⁴

Uvod

Temperatura je fizičko obilježje čije je mjerenje sastavni dio gotovo svakog eksperimentalnog istraživanja u fizici. S druge strane, pn diode su neizostavan element mnogih elektroničkih uređaja, vrlo su jeftine i dostupne. U radu ćemo pokazati može li se pad napona na ispravljačkoj pn diodi u zavisnosti o temperaturi uz stalnu struju kroz diodu iskoristiti kao pouzdan termometarski parametar. Drugim riječima, provjerit ćemo može li ispravljačka pn dioda poslužiti kao jednostavan, brz, točan i osjetljiv temperaturni senzor.

Teorija [1]

Strujno naponska karakteristika pn diode, za propusnu polarizaciju $U > 0$ V, može se prikazati jednadžbom

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

gdje je: I_0 – struja zasićenja (za napon nepropusne polarizacije $U \rightarrow -\infty$), U – napon na diodi, q – naboj elektrona, T – temperatura u Kelvinima i k – Boltzmannova konstanta.

Prema jednadžbi (1) proizlazi da je dioda nelinearan (ne Ohmski) elektronički element – iznad napona "praga" struja eksponencijalno raste s porastom napona – pa se nameće pitanje može li zavisnost napona o temperaturi diode uz određene uvjete biti linearna.

Kao prvo, uzmemo li pretpostavku da faktor $e^{\frac{qU}{kT}} \gg 1$, koja je opravdana za napone na diodi od 0.1 V na temperaturi 297 K, kad faktor $e^{\frac{qU}{kT}}$ iznosi ≈ 50 . Drugo, valja uzeti u obzir struju zasićenja I_0 . Ona zavisi o temperaturi, parametrima materijala i geometriji pn spoja, a neznatno raste s povećanjem napona. Struja zasićenja za nepropusnu polarizaciju $U < 0$ V prikazana je jednadžbom

$$I_0 = AT^{3+\frac{\gamma}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (2)$$

gdje je: E_g – energija potrebna da elektron prijeđe iz valentne u vodljivu zonu ili energija procjepa (E_g za poluvodiče 1 – 2 eV). S obzirom na relativno niske temperature koje

¹ Dio rada prikazan je na Državnoj smotri eksperimentalnih radova iz fizike 2014. godine.

² Autor je profesor fizike u OŠ Ljudevita Gaja, Zaprešić, e-pošta: antonio.svedruzic@skole.hr

³ Autor je profesor matematike i informatike u ŠS "Ban Josip Jelačić", Zaprešić, e-pošta: danijel.pticar@zg.t-com.hr

⁴ Učenik Gimnazije "Ban Josip Jelačić", Zaprešić.

se koriste u eksperimentu, faktor $AT^{3+\frac{\gamma}{2}}$ neznatno doprinosi struji I_0 pa uzimamo da je gotovo konstantan (označimo s B). Uvrštavanjem (2) u (1) dobivamo

$$I = Be^{\left(\frac{-E_g}{kT} + \frac{qU}{kT}\right)}. \quad (3)$$

Uz uvjet da struju u eksperimentu održavamo stalnom, izraz (3) možemo pojednostaviti

$$C = \frac{qU}{kT} - \frac{E_g}{kT} \quad (4)$$

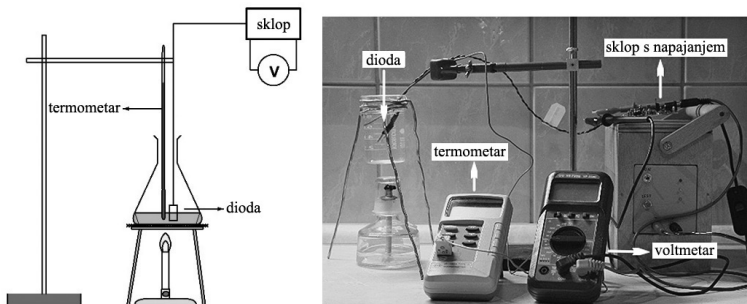
gdje je $C = \ln\left(\frac{I}{B}\right)$ približno konstantna. Ako izraz (4) zapišemo kao

$$T = \frac{q}{kC}U - \frac{E_g}{kC} \quad (5)$$

dobili smo linearnu zavisnost temperature i napona uz uvjet da je energija procjepa stalna. Prema tome, uz uvjet da je struja u eksperimentu stalna $I = \text{konst.}$, uz gore navedena pojednostavnjenja, moguće je pokazati da je zavisnost napona o temperaturi diode linearna. To omogućuje izradu grafičkog prikaza $T(U)$ zavisnosti (U je nezavisna varijabla jer se dioda koristi kao termometar), a potom metodom najmanjih kvadrata određivanje kalibracijskog pravca u linearnom dijelu zavisnosti za određen tip diode.

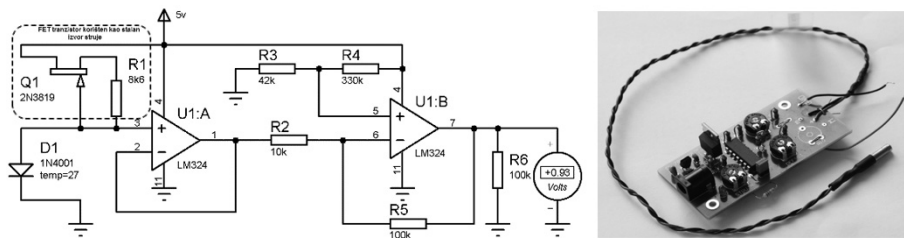
Eksperiment

Kod većine poluvodiča energetski procjep se smanjuje s povećanjem temperature što u ovom eksperimentu ima za posljedicu smanjivanje otpora pn diode. Zbog toga je važno imati stalnu struju kroz diodu, uz mali toplinski doprinos diode, koju je moguće stabilizirati korištenjem odabranog tipa *JFET* tranzistora [2]. Alternativa tranzistoru s obzirom na cijenu je otpornik velikog otpora $\geq 0.5 \text{ M}\Omega$ koji bi u seriji s diodom bio dovoljan da za potrebe ovog eksperimenta daje gotovo konstantnu struju sve dok je otpor diode zanemariv u odnosu na otpornik ($\Delta I = 10 \mu\text{A}$ za $\Delta t = 70^\circ\text{C}$) [3].



Slika 1. Postava eksperimenta za mjerenja temperature i napona na diodi.

Mjerenja se provode *Si*, *Ge* i *LE_{crvena}* diodom zatvorenom u zataljeno metalno kućište postavljenom u staklenu mikro epruvetu koja je zajedno sa sondom termometra zatvorena vatom kako bi se toplinski izolirala. Sve zajedno se postavlja u laboratorijsku čašu s vodom ili tekućim parafinom – omogućuje više temperature mjerenja ($t_{\text{vrelište}} > 350^\circ\text{C}$) – koja se zagrijava električnim grijačem ili plamenikom. Nakon zagrijavanja vode i kratke stabilizacije temperature diode, mjeri se napon i struja kroz diodu (slika 1). Promjena napona od $2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ i manje precizan voltmetar nameću potrebu za pojačalom koje omogućuje dobivanje i mjerenje većeg izlaznog napona (slika 2).



Slika 2. Shema i izrađeni sklop s kojim su izvršena mjerenja.

Opis rada sklopa

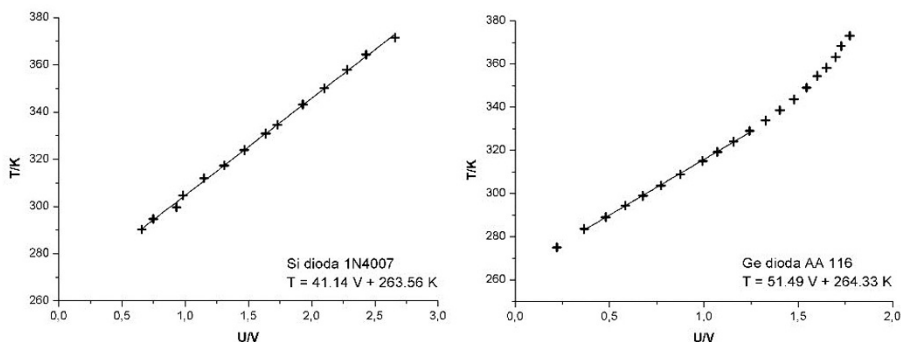
Napajanje sklopa je $U = 5 \text{ V}$, a struje kroz diodu $D1$ ne prelaze vrijednosti od $100 \mu\text{A}$. Mala struja omogućuje da temperatura diode zavisi isključivo o vanjskoj temperaturi, a ne o zagrijavanju diode prolaskom struje. Operacijsko pojačalo $U1 : A$ je naponsko slijedilo. Na izlazu $U1 : A$ pojačala je isti napon kao na neinvertirajućem ulazu u $U1 : A$. Zbog velikog ulaznog otpora operacijskog pojačala struja kroz neinvertirajući ulaz $U1 : B$ je vrlo mala zbog čega ne utječe na struju kroz diodu. Operacijsko pojačalo $U1 : B$ spojeno je kao diferencijalno pojačalo koje pojačava razliku napona između neinvertirajućeg i invertirajućeg ulaza na pojačalu $U1 : B$. Faktor pojačanja je $R5/R2$ (za sklop sa slike 2 pojačanje je 10). Napon na neinvertirajućem ulazu $U1 : B$ je $R3/(R3 + R4) \cdot VCC$ (u sklopu sa slike 2 $\approx 0.566 \text{ V}$). Ako je napon na izlazu neinvertirajućeg sklopa jednak 0.566 V na temperaturi 10°C , onda je na izlazu $U1 : B$ napon 0.566 V jer je razlika napona na ulazima u $U1 : B$ 0 V . Kad bi se dioda zagrijala na 100°C , tada bi napon na diodi iznosio 0.367 V . Razlika napona na neinvertirajućem i invertirajućem ulazu u $U1 : B$ tada bi bila 0.199 V . Na izlazu iz $U1 : B$ bio bi napon $0.556 + 0.199 \cdot 10 = 2.556 \text{ V}$. Suprotno, kad bi diodu ohladili na -10°C napon na diodi bi bio 0.608 V . Razlika napona na ulazima u $U1 : B$, -0.042 V , a na izlazu 0.142 V .

Za prikazani sklop važan je faktor pojačanja i napon na neinvertirajućem ulazu $U1 : B$. Te vrijednosti određuju prikaz temperatura diode na izlazu pojačala te ih treba podesiti ovisno o rasponu temperature u kojem mjerimo. Na primjer, ako je faktor pojačanja 30 tada je na $t = 100^\circ\text{C}$ napon 6.5 V (cijeli sklop $U = 5 \text{ V}$). Isto tako, naponi na ulazima u pojačala ne smiju biti blizu 0 V i 5 V jer pojačalo dozvoljava napone na ulazima od do 0 V do $VCC = 1.5 \text{ V}$.

Mjerenja

Izmjerene vrijednosti pokazuju da se porastom temperature povećava napon na diodi (slika 3a). Pritom valja podsjetiti da se u eksperimentu koristi naponsko pojačalo zbog čega su rezultati prividno u suprotnosti s činjenicom da vodljivost poluvodiča raste s porastom temperature, a napon na diodi se smanjuje. Dobiveni rezultati za Si diodu pokazuju linearnu zavisnost temperature i napona ($0^\circ\text{C} < t < 100^\circ\text{C}$) što znači da je moguće iz mjerenih podataka metodom najmanjih kvadrata odrediti kalibracijski pravac za Si diodu ($T = 41.14 \text{ V} + 263.56 \text{ K}$). Međutim, rezultati mjerenja napona i temperature za drugu Si diodu istog tipa, ne daju identičan kalibracijski pravac. Uzrok razlike je u koncentraciji dodanih atoma nečistoća u n i p tipu poluvodiča zbog čega je svaka dioda, iako istog tipa (u našem slučaju $1N4007$), jedinstvena s obzirom na $T(U)$ karakteristiku. Do spomenute razlike dolazi u procesu proizvodnje dioda, a varijacije

u naponu na diodi pri određenoj temperaturi i struji kroz diodu razlikuju se najviše do ± 5 mV. Kako bi se uklonila ta nepouzdanost nužna je kalibracija *svake* diode. Navedeni nedostatak *Si* diode kao mogućeg temperaturnog senzora donekle umanjuje njene dobre strane provjerene eksperimentom, a to su: relativno velika osjetljivost na promjene temperature (2.4 mV/ $^{\circ}$ C) i brza reakcija na promjenu temperature (≈ 2 s do stabilizacije).

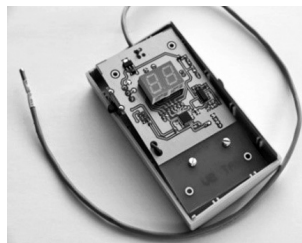


Slika 3. Eksperimentalni graf zavisnosti temperature o naponu na a) silicij i b) germanij diodi.

Za *Ge* diodu primjećuje se da $T - U$ zavisnost nije linearna za cijeli opseg mjerenih temperatura (slika 3b). Razlog je nizak radni napon (≤ 0.04 V) na diodi za temperature (≥ 60 $^{\circ}$ C). Za navedeni napon faktor $e^{\frac{qU}{kT}}$ iz izraza (1) više nije $\gg 1$ ($e^{\frac{qU}{kT}} \approx 4$) pa ga ne možemo zanemariti. Na temperaturama višim od 60 $^{\circ}$ C dioda nije upotrebljiva kao linearni senzor temperature.

Kao treća dioda korištena je *LE* crvena dioda koja se zbog velikog ulaznog otpora ne može koristiti uz gore opisani sklop s pojačalom. Ipak, mjerenja napona na *LE* diodi mogu se provesti izravno na samoj diodi, što značajno pojednostavnjuje izradu i cijenu sklopa te se može izraditi uz manju cijenu i s manje iskustva u izradi elektroničkih komponenti.

Kao opcija moguće je izlaz prikazanog sklopa s pojačalom spojiti na *ADC* (analogno-digitalni pretvarač) ulaz mikrokontrolera. Rezolucija tog sklopa iznosila bi oko 0.15 $^{\circ}$ C za temperature između -10 $^{\circ}$ C i 120 $^{\circ}$ C (bez sklopa rezolucija bi bila 1.2 $^{\circ}$ C za 10 bitni *ADC* i 3.3 V referentni napon). Nakon kalibracije senzora i spajanjem s mikroprocesorom izrađen je diodni termometar (slika 4) s kojim je moguće precizno mjeriti temperaturu.



Slika 4. Diodni termometar.

Literatura

- [1] J. W. PRECKER, M. A. DASILVA, *Experimental estimation of the band gap in silicon and germanium from the temperature-voltage curve of diode thermometers*, American Journal of Physics, **70** (11), (2002).
- [2] www.vishay.com/docs/70596/70596.pdf
- [3] www.rst-engr.com/rst/articles/KP90APR.pdf
- [4] www.ti.com/cn/lit/pdf/sbaa073