

OSJETLJIVOST I TOČNOST TRANZISTORSKOG TEMPERATURNOG SENZORA UZ KONSTANTNU KOLEKTORSKU STRUJU

Petar Stojanovski

KLJUČNE RIJEČI: senzor, temperaturni senzori, bipolarni tranzistori, temperaturne karakteristike, točnost, osjetljivost, poluprovodnici

SAŽETAK: Ovaj se rad odnosi na tranzistorske temperaturne senzore, kod kojih se koristi napon baza-emiter kao temperaturno ovisan parametar, uz konstantnu kolektorsku struju. Na temelju precizne analize temperaturne ovisnosti $I_c - U_{be}$ karakteristika bipolarnih silicijevih tranzistora, određena je osjetljivost i točnost tranzistorskog temperaturnog senzora, u temperaturnom području od -50°C do 150°C .

SENSITIVITY AND ACCURACY OF THE TRANSISTOR TEMPERATURE SENSOR UNDER A CONSTANT COLLECTOR CURRENT

KEY WORDS: sensors, temperature sensors, bipolar transistors, temperature characteristics, accuracy, sensitivity, semiconductors

ABSTRACT: This paper considers a transistor temperature sensor, in which is used a base-emitter voltage as a temperature dependent parametar, under a constant collector current. On the basis of an accurate analysis of the temperature dependence on the $I_c - U_{be}$ characteristics of the bipolar silicon transistor, the sensitivity and accuracy of the transistor temperature sensor in the temperature range from -50°C to 150°C is determined.

1. UVOD

Već je davno bilo poznato da u normalnom aktivnom području rada bipolarnih tranzistora napon baza-emiter približno linearno opada sa porastom temperature. Međutim, tek poboljšanje karakteristika i masovna proizvodnja visokokvalitetnih i jeftinih silicijevih tranzistora omogućili su da se ova osobina iskoristi za proizvodnju temperaturnih senzora. Kod tranzistorskih temperaturnih senzora obično se koriste dva temperaturno ovisna parametra: napon baza-emiter jednog tranzistora, ili razlika napona baza-emiter dvaju tranzistora koji rade uz konstantan omjer gustina kolektorskih struja.

Prvi komercijalni tranzistorski temperaturni senzori pojavili su se pre oko petnaestak godina, međutim još uvijek veoma je mali broj objavljenih radova u vezi njihovih osnovnih karakteristika kao što su: točnost, linearnost i osjetljivost, stabilnost i.t.d. U ovom radu analizira se osjetljivost i točnost senzora koji za temperaturno ovisan parametar koristi napon baza-emiter uz konstantnu kolektorsku struju, u temperaturnom području od 223,15K (-50°C) do 423,15K (150°C). Za razliku od dosadašnjih radova, a s ciljem da se poveća točnost analize, uzeta je u obzir i nelinearnost temperaturne ovisnosti širine zabranjenog pojasa silicija.

2. TEMPERATURNNA OVISNOST NAPONA BAZA-EMITER

U normalnom aktivnom području rada n-p-n tranzistora, u uvjetima niske injekcije, ako se zanemari modulacija

širine baze i kada za manjinske nosioce u bazi vrijedi Boltzmannova statistika, kolektorska struja I_c , može se precizno odrediti pomoću dobro poznatih relacija^{(1), (2)}:

$$I_c = I_0 \exp(qU_{be}/kT) \quad (1)$$

$$I_0 = \frac{AkT\mu n_i^2}{N_b} \quad (2)$$

gdje su: U_{be} -napon baza emiter, T -apsolutna temperatura; q -naboj elektrona; k - Boltzmannova konstanta, $k/q = 86,1708 \cdot 10^{-6} \text{V/K}$; A -površina emitera; μ -efektivna vrijednost pokretljivosti manjinskih nosioca u bazi; n_i -intrinsicna koncentracija nosioca; N_b -ukupan broj atoma primjesa u bazi po jedinici površine.

Za nedegenerirane poluvodiče kvadrat intrinzične koncentracije određen je izrazom⁽¹⁾:

$$n_i^2 = ET^3 \exp(-qU_g(T)/kT) \quad (3)$$

gdje je E temperaturno neovisna konstanta, a $U_g(T)$ je napon širine zabranjenog pojasa silicija, koji je temperaturno ovisan.

U dosadašnjim radovima u izrazu(3) umjesto temperaturno ovisan napon $U_g(T)$, koristi se konstantna vrijednost, U_{g0} , za njegovu ekstrapoliranu vrijednost do apsolutne nule. Lako se može pokazati da to implicitno u sebi sadrži pretpostavku o linearnoj ovisnosti ovog napona o temperaturi. Ova pretpostavka o linearnosti kod analiza za široka temperaturna područja dovodi do pogrešaka

koje se ne mogu zanemariti^{(3), (4)}. U ovom radu uzeta je u obzir nelinearna temperaturna ovisnost, pri čemu su korišćeni slijedeći izrazi⁽³⁾:

Za temperaturno područje $150\text{K} \leq T \leq 300\text{K}$

$$U_g(T) = 1,1785 - 9,025 \cdot 10^{-5}T - 3,05 \cdot 10^{-7}T^2 \quad (4a)$$

za temperaturno područje $T \geq 300\text{K}$

$$U_g(T) = 1,20595 - 2,7325 \cdot 10^{-4}T, \quad (4b)$$

Pokretljivost nosioca može se aproksimirati izrazom^{(1),(2)}:

$$\mu = CT^{-\eta} \quad (5)$$

gdje su C i η parametri koji ovise o koncentraciji primjesa, a ne i o temperaturi.

Iz relacija (1), (2), (3), (5) i uvođenjem kratica:

$$\gamma = 4 - \eta \quad (6)$$

$$B = \frac{AkCE}{N_b} \quad (7)$$

za određivanje napona baza-emiter može se dobiti slijedeći izraz:

$$U_{be} = U_g(T) + \frac{k}{q} T \ln \frac{I_c}{B} - \gamma \frac{k}{q} T \ln T \quad (8)$$

Jednadžbom (8) data je temperaturna ovisnost napona baza-emiter bipolarnih tranzistora. Ako su ispunjene već spomenute pretpostavke i ako se zanemare efekti usljed uvedenih aproksimacija, parametri B i γ su temperaturno neovisne konstante, koje ovise o tehnološkom profilu i geometriji zadanog tranzistora. Ako je kolektorska struja konstantna, a to je pretpostavka u ovom radu, onda napon baza-emiter ovisi samo o temperaturi.

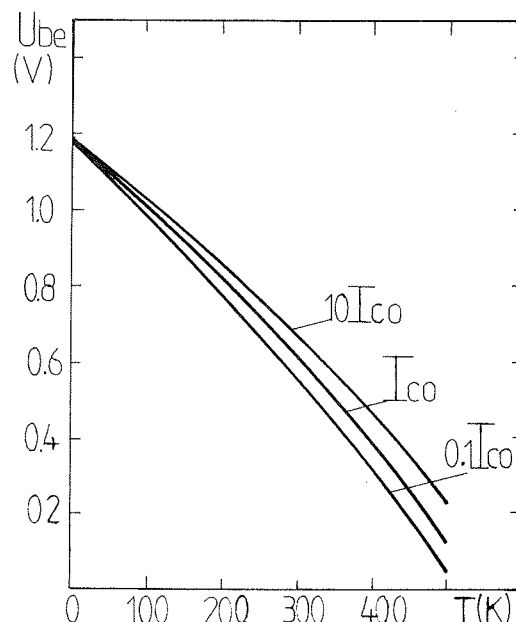
Parametar η određuje se na temelju temperaturne ovisnosti pokretljivosti nosioca. Tako na primjer, pomoću krivulja u (1, str. 39,41) i (2, str. 859) za tranzistore standardnog profila primjesa u bazi može se dobiti približna vrijednost $\eta = 1,6$ odnosno $\gamma = 2,4$, koju ćemo koristiti u nastavku ovog rada.

Parametar B može se dobiti i eksperimentalnim putem mjerenjem temperaturne ovisnosti napona baza-emiter i korišćenjem izraza (8). Međutim, za određivanje temperaturne ovisnosti U_{be} nije neophodno znati i kolektorsku struju i parametar B, nego je dovoljno da se zna samo njihov omjer I_c/B . Ako sa I_{co} označimo jačinu kolektorske struje kod koje je $U_{be} = 0,6\text{V}$ za temperaturu $T = 300\text{K}$, onda pomoću izraza (8) dobija se slijedeća vrijednost omjera $I_{co}/B = 1,388 \cdot 10^{-3}$.

Ako se jačina kolektorske struje promjeni od I_{co} na vrijednost I_c , napon baza-emiter promjenit će se za vrijednost ΔU_{be} , koju možemo odrediti pomoću (8).

$$\Delta U_{be} = \frac{k}{q} T \ln (I_c / I_{co}) \quad (9)$$

Na sl. 1. prikazana je temperaturna ovisnost napona baza-emiter za tri vrijednosti kolektorske struje: I_{co} , $10I_{co}$ i $I_{co}/10$.



Slika 1: Ovisnost $U_{be} = f(T)$ uz I_c kao parametar

3. OSJETLJIVOST SENZORA

Osjetljivost senzora S, određena je strminom karakteristike $U_{be} = f(T)$:

$$S = - \frac{dU_{be}}{dT} \quad (10)$$

a negativni predznak je uzet zbog toga što napon U_{be} opada sa temperaturom. Iz jednačbe (8) dobija se:

$$S = - \frac{dU_g(T)}{dT} - \frac{k}{q} \ln (I_c/B) + \gamma \frac{k}{q} (\ln T + 1) \quad (11)$$

Ako se promjeni jačina kolektorske struje od vrijednosti I_{co} na vrijednost I_c , strmina će se promijeniti za neku vrijednost ΔS , koju možemo dobiti pomoću relacije⁽¹¹⁾:

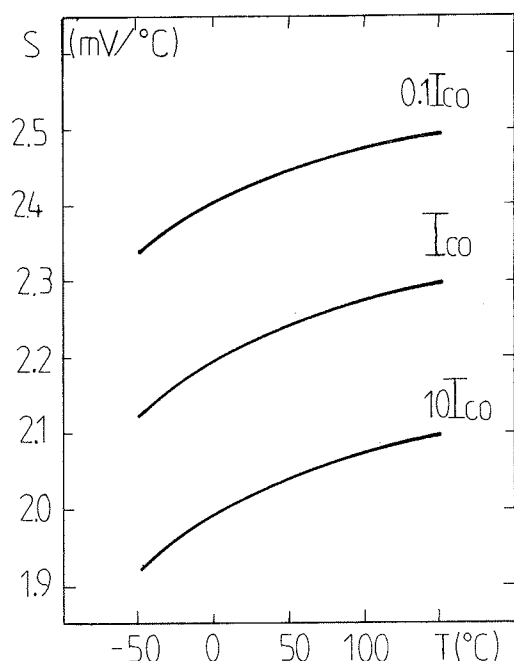
$$\Delta S = - \frac{k}{q} \ln (I_c / I_{co}) \quad (12)$$

Na sl. 2 prikazana je ovisnost osjetljivosti senzora o temperaturi za tri konstantne vrijednosti kolektorske struje: I_{co} , $10I_{co}$ i $I_{co}/10$. Vidimo da osjetljivost senzora ovisi o temperaturi i o jačini kolektorske struje.

Za kolektorsku struju jačine I_{co} ona se povećava od 2,12 mV/C kod $T = -50^\circ\text{C}$, na 2,30 mV/C kod $T = 150^\circ\text{C}$. Povećanje kolektorske struje uzrokuje smanjenje osjetljivosti senzora. Tako na primjer, ako se kolektorska struja poveća deset puta, osjetljivost se smanjuje za 0,20 mV/C.

4. TOČNOST SENZORA

Pogreška temperaturnog senzora, koja je mjerilo točnosti, je rezultat nelinearnosti karakteristike $U_{be} = f(T)$. Ova nelinearnost je rezultat nelinearnosti prvog i trećeg pribrojnika na desnoj strani izraza (8). Prvi član, $U_g(T)$, je nelinearan za temperature niže od 300K, a treći je nelinearan u čitavom temperaturnom području zbog faktora $T \ln T$.



Slika 2: Osjetljivost senzora uz I_c kao parametar

Pogreška senzora određuje se na temelju odstupanja karakteristike $U_{be} = f(T)$ od pravca:

$$U = a + bT \quad (13)$$

Parametri a i b pravca (13) ovise o načinu podešavanja senzora. Ako se podešavanje vrši u dvije točke t.j. na temperaturama T_1 i T_2 , onda se ovi parametri određuju iz uvjeta: $U(T_1) = U_{be}(T_1)$ i $U(T_2) = U_{be}(T_2)$, i dobijaju se slijedeći izrazi:

$$a = \frac{T_2 U_{be}(T_1) - T_1 U_{be}(T_2)}{T_2 - T_1} \quad (14)$$

$$b = \frac{U_{be}(T_2) - U_{be}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (15)$$

Za jačinu kolektorske struje I_{co} i ako se podešavanje vrši na granicama temperaturnog područja koje se analizira u ovom radu: $T_1 = 223,15K$ i $T_2 = 423,15K$, dobijaju se slijedeće vrijednosti: $a = 1,265V$ i $b = -2,230 \cdot 10^{-3} V/°C$.

Apsolutna pogreška senzora određuje se pomoću izraza:

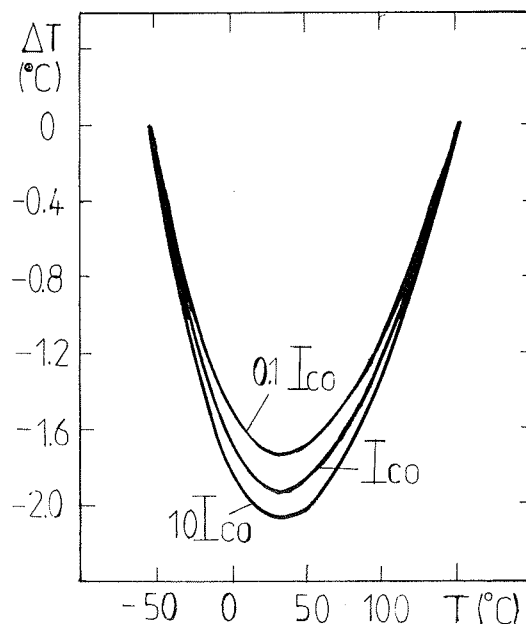
$$\Delta T = \frac{U_{be} - U}{b} \quad (16)$$

Ako se kolektorska struja promjeni od vrijednosti I_{co} na vrijednost I_c , promjenit će se i apsolutna pogreška senzora za neku vrijednost ΔT . Pomoću izraza: (8), (13), (14), (15) i (16) možemo dobiti promjenu apsolutne pogreške senzora:

$$\Delta(\Delta T) = \Delta T(I_c) - \Delta T(I_{co}) = - \frac{\frac{k}{q} \ln(I_c/I_{co})}{b(I_{co}) + \frac{k}{q} \ln(I_c/I_{co})} \cdot \Delta T(I_{co}) \quad (17)$$

Na sl. 3 prikazana je ovisnost apsolutne pogreške senzora o mjerenoj temperaturi, uz kolektorsku struju kao parametar za tri vrijednosti kolektorske struje: I_{co} , $10I_{co}$ i $I_{co}/10$. Za jačinu kolektorske struje I_{co} , pogreška je

maksimalna kod temperature $T = 31,18°C$ i iznosi $\Delta T = -1,92°C$. To znači, uz odgovarajuće temperature podešavanja maksimalna pogreška senzora iznosila bi $\pm 0,96°C$, u čitavom temperaturnom području. Povećanje kolektorske struje povećava pogrešku senzora. Na primjer, ako se kolektorska struja poveća deset puta pogreška će se povećati za 9,8%.



Slika 3: Pogreška senzora uz I_c kao parametar

5. ZAKLJUČAK

Na temelju precizne analize utjecaja temperature na napon baza-emiter bipolarnih silicijevih tranzistora, izvedeni su analitički izrazi za određivanje osjetljivosti i točnosti tranzistorskih temperaturnih senzora, uz konstantnu kolektorsku struju i U_{be} kao temperaturno ovisan parametar.

Za tranzistore standardnog profila primjese u bazi i za zadani režim rada, određeni su i grafički prikazani osjetljivost i apsolutna pogreška senzora u temperaturnom području od $-50°C$ do $150°C$, te njihova ovisnost o jačini kolektorske struje.

6. LITERATURA

1. S.M. Sze: Physics of semiconductor Devices, New York, Wiley, 1969
2. J.W. Slotboom, H.C. de Graaff: Measurements of bandgap narrowing in Si bipolar transistors, Solid-State Electronics, Vol 19, pp 857-862, 1976.
3. Y.P. Tsividis: Accurate Analysis of Temperature Effects in I_c - V_{be} characteristics with Application to Bandgap Reference Sources, IEEE J. Solid-State, Circuits, Vol. Sc-15, No. 6, December, 1980
4. P. Stojanovski: Utjecaj temperaturne nelinearnosti napona zabranjenog pojasa silicija na bandgap referentni napon, Zbornik referata XIII Jugoslavenskog savetovanja o mikroelektronici, knjiga II, str. 170-177, Niš, maj, 1984.

Prof. Mr. Petar Stojanovski, dipl.ing.,
Tehnički fakultet-Bitola
97000 Bitola

Prispelo: 10. 3. 1990 Sprejeto: 30. 05. 1990