

# DOLOČANJE BOLTZMANNOVE KONSTANTE $k_B$

## Uvod

Meritev Boltzmannove konstante  $k_B$  je osnovana na diskusiji tokov znotraj bipolarnega tranzistorja (angl. bipolar-junction transistors – BJT) z oznako **n-p-n** razložena v dodatku. Bipolarni tranzistorji so najbolj klasični tip tranzistorja sestavljeni iz dveh **p-n** stikov. Tehnične in aplikativne podrobnosti različnih tipov polprevodniških elektronskih elementov najdete predstavljene v [2], medtem ko je njihovo fizikalno ozadje opisano v [3].

Naš bipolarni tranzistor ima tri kontakte imenovane kolektor, emitor in baza. Kolektor in bazo v vaji kratko sklenemo kot je to prikazano na sliki 1 in merimo odvisnost toka skozi kolektor – kolektorskega toka  $I_C$  od napetosti med bazo in emitorjem  $U_{BE}$ . Teoretična napoved te odvisnosti je podana z Ebers-Mollovo enačbo [1]

$$I_C = I_S(T) \left[ \exp \left( \frac{e_0 U_{BE}}{k_B T} \right) - 1 \right] ,$$

kjer je  $e_0$  osnovni naboj,  $T$  absolutna temperatura,  $U_{BE}$  pozitivna napetost med bazo in emitorjem ter  $I_S(T)$  velikost nasičenega toka v zaporni smeri. Že za majhne pozitivne napetosti  $U_{BE}$  je eksponentni člen v zgornji enačbi dosti večji kot 1 in zato lahko v tem režimu enačbo brez prave izgube natančnosti poenostavimo v

$$I_C \doteq I_S(T) \exp \left( \frac{e_0 U_{BE}}{k_B T} \right) . \quad (1)$$

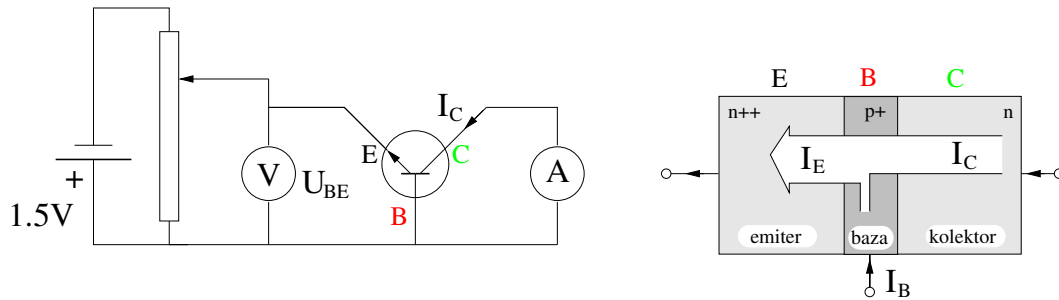
Pri večini silicijevih tranzistorjev ta relacija drži točneje od 1% v območju več kot 6 dekad toka kolektorja t.j. od nA do mA. V praksi pogosto razmišljamo o tranzistorju kot ojačevalcu toka skozi bazo t.i. baznega toka  $I_B$  in ga zato povežemo s kolektorskim tokom  $I_C$  preko faktorja ojačanja  $\beta$  v obliki zveze

$$I_C = \beta I_B .$$

Tipične vrednosti za faktor ojačanja se gibljejo od 20 do 200. Bazni in kolektorski tok pa skupaj tvorita tok skozi emitor – emitorski tok  $I_E = I_C + I_B$ . Predstavljeno tokovno-napetostno (IU) karakteristiko tranzistorja (1) lahko uporabimo za hitro in enostavno merjenje razmerja dveh osnovnih konstant  $e_0/k_B$ ; lahko pa ta odvisnost služi za merjenje temperature, kakor bomo videli kasneje. Shematično je električna vezava pri meritvi prikazana na sliki 1.

Električno prevodnost **p-n** stika pri napetosti v prevodni smeri določa več mehanizmov, med drugimi so to

- difuzija nosilcev naboja preko zaporne plasti,
- generacija in rekombinacija nosilcev naboja znotraj zaporne plasti,
- tuneliranje nosilcev naboja med nivoji v vrzeli,
- površinski efekti, kjer površinski ioni tvorijo zrcalne naboje znotraj polprevodnika, itd.



Slika 1: Shema meritve tokovno-napetostne karakteristike **n-p-n** tranzistorja. Z baterijo preko nastavljivega upora določimo napetost med bazo in emitorjem **npn** tranzistorja in merimo kolektorski tok. Barvne oznake priključkov tranzistorja so: E - črna, B - rdeča in C - zelena.

Vsak od teh mehanizmov zavisi na različen način od napetosti in prispeva svoj delež toka preko stika. Difuzija nabojev oz. difuzijski tok je za nizke gostote toka dobro opisan z enačbo (1). Tok zaradi generacije in rekombinacije nosilcev naboja, t.i. rekombinacijski tok  $I_{\text{rec}}$ , se pojavi pri večjih gostotah tokov in je sorazmeren z nekoliko drugačnim eksponentom  $J_{\text{rec}} \sim \exp(e_0 U_{\text{BE}} / (2k_B T))$ . Drugi prispevki imajo bolj komplicirane odvisnosti od napetosti. Pri diodah, ki vsebujejo le en **p-n** stik, prispevajo k prevodnosti vsi prej naštetni mehanizmi, zato diode niso primerne za določanje  $e_0/k_B$ .

Na našem bipolarnem tranzistorju kratko sklenemo bazo in kolektor. S tem dosežemo, da z napetostjo med bazo in emitorjem v prevodni smeri kolektorski tok določa le difuzija elektronov preko zaporne plasti od baze na kolektor (oz. nosilev naboja v drugo smer) in zato njegovo karakteristko dobro opiše enačba (1).

## Potrebščine

- bipolarni **n-p-n** tranzistor tipa BC182B
- potenciometer in baterija ali drug stabilen vir enosmerne napetosti do 1.5 V
- voltmeter, mikroampermeter, žice
- termometer, Dewarjeva posoda in čaše za vodo.

## Naloga

1. Izmerite kolektorski tok tranzistorja  $I_C$  v odvisnosti od  $U_{\text{BE}}$  pri treh temperaturah: približno 15, 35 in 55 °C.
2. Določite razmerje  $e_0/k_B$ .
3. Izmerite temperaturno odvisnost kolektorskega toka tranzistorja pri dveh napetostih  $U_{\text{BE}}$  približno 0.5 in 0.58 V.

## Navodilo

1. Preverite vezavo tranzistorja in ostalega električnega kroga, kot je prikazano na sliki 1. Napetost  $U_{BE}$  nastavljamo s potenciometrom od približno 0.4 do 0.6 V. Največji tok naj ne preseže 10 mA. Pri vaji uporabljamo n-p-n bipolarni tranzistor za splošno uporabo. Tak tranzistor je temperaturno bolj stabilen in dovoljuje nekoliko večje tokove ter s tem večjo generacijo toplote. Kolektorski tok merimo z mikroampermetrom. Za temperaturno stabilizacijo zadostuje Dewarjeva posoda z vodo, v katero potopimo tranzistor. Različne temperature dosežemo z mešanjem tople in hladne vode, ki jo dobimo iz pipe. Za posamezno temperaturo narišite diagram  $\ln(I_C/I_1)$  proti  $U_{BE}$ , ki bi naj bil po teoriji premica

$$\ln(I_C/I_1) = \ln(I_S(T)/I_1) + \frac{e_0}{k_B T} U_{BE}.$$

z naklonom  $e_0/k_B T$ , ki ga odčitaj in oceni njegovo natančnost. Iz dobljenih odčitkov izračunajte končno oceno razmerja  $e_0/k_B$  in natančnost.

2. Pri meritvi temperaturne odvisnosti kolektorskega toka merimo le-tega približno vsako stopinjo v čim širšem temperaturnem območju pri neki napetosti  $U_{BE}$ . To storite tako, da najprej stabilizirate temperaturo na iskano vrednost in nato za obe napetosti  $U_{BE}$  izmerite kolektorski tok  $I_C$ . Za obe napetosti narišite grafa  $I_C$  in  $\ln(I_C/I_1)$  v odvisnosti od temperature, kjer si tok  $I_1$  izberite poljubno. Pri teh meritvah posredno merimo t.i. saturacijski tok  $I_S(T)$ , katerega temperaturna odvisnost je približno podana z nastavkom [4]

$$I_S(T) \approx \alpha T^n \exp\left(\frac{-E_g(T)}{k_B T}\right),$$

kjer sta  $\alpha$  in  $n$  praktično neodvisna od temperature in močno zavisita od načina izdelave tranzistorja,  $E_g$  pa je širina energetske vrzeli nedopiranega silicija, ki je odvisna od temperature. Za parameter  $n$  se v literaturi pojavljajo vrednosti od 2 do 4. Podoben eksperiment je opisan v članku [5].

## Dodatek

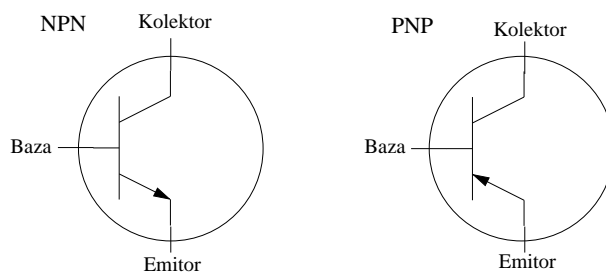
Ločujemo dve vrsti bipolarnih tranzistorjev n-p-n in p-n-p, ki se po delovanju nekoliko razlikujeta. Pri npn tranzistorju:

- Tok iz kolektorja na emitor teče, če je baza na višjem potencialu kot emitor.
- Majhen tok teče tudi iz baze na emitor.

Pri pnp tranzistorju:

- Tok iz emitorja na kolektor teče, če je baza na nižjem potencialu kot emitor.
- Majhen tok teče prav tako iz emitorja na bazo.

Prav tako jih na električnih shemah, glej sliko 2, drugače označujemo. V splošnem pa napetost na bazi kontrolira količino toka skozi tranzistor.



Slika 2: Elektrotehnična oznaka za npn in pnp tranzistor.

## Literatura

- [1] P. Horowitz, W. Hill, *The Art of Electronics* (druga izdaja, Cambridge University Press, 1989)
- [2] T. L. Floyd. *Electronic Devices* (7. izdaj, Prentice Hall, 2005)
- [3] S. M. Sze, K. Ng. Kwok *Physics of Semiconductor Devices* (tretja izdaja, Wiley, 2006)
- [4] R. D. Thornton et.al, *Characteristics and limitations of transistors* (John Wiley & Sons, 1966,)
- [5] I. B. Folgenson, Measuring temperature with Germanium transistor thermoelements, *Measurement Techniques* **7** (1964) 1053-1058.