

# Določanje Boltzmannove konstante $k_B$

Bor Kokovnik

April 2024

## 1 Uvod

Meritev Boltzmannove konstante  $k_B$  je osnovana na diskusiji tokov znotraj bipolarnega tranzistorja z oznako **n-p-n** razložena v dodatku. Bipolarni tranzistorji so najbolj klasični tip tranzistorja sestavljeni iz dveh **p-n** stikov.

Naš bipolarni tranzistor ima tri kontakte imenovane kolektor, emitor in baza. Kolektor in bazo v vaji kratko sklenemo 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

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

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

$$I_C \doteq I_S(T) \exp\left(\frac{e_0 U_{BE}}{k_B T}\right). \quad (2)$$

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

$$I_C = \beta I_B. \quad (3)$$

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 (2) 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.

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.

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 (2). Tok zaradi generacije in rekombinacije nosilcev naboja, t.i. rekombinacijski tok  $I_{rec}$ , se pojavi pri večjih gostotah tokov in je sorazmeren z nekoliko drugačnim eksponentom  $Jr_{rec} \sim \exp(e_0 U_{BE}/(2k_B T))$ . Drugi prispevki imajo bolj komplicirane odvisnosti od napetosti. Pri diodah, ki vsebujejo le en p-n stik, prispevajo k prevodnosti vsi prej naštetih 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 karakteristiko dobro opiše enačba (2).

## 2 Potrebščine

- bipolarni n-p-n tranzistor tipa BC182B,
- potenciometer in baterija ali drug stabilen vir enosmerne napetosti do 1,5 V,
- voltmeter (Votcraft 870), namizni multimeter (SigLent SDM 3065X), žice,
- termometer, Dewarjeva posoda in čaše za vodo,
- prenosnik št. 6. s programom Boltz, napisanim v LabView-u.

## 3 Naloga

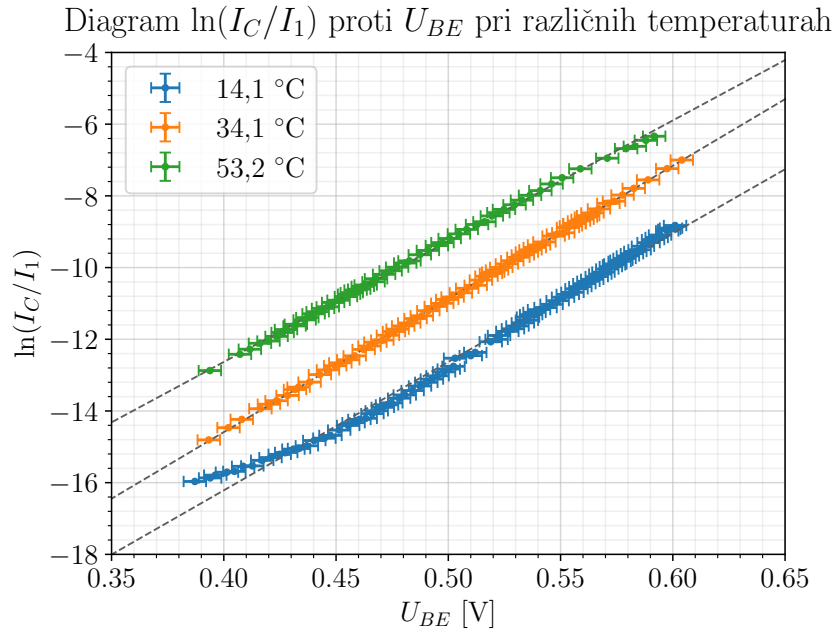
1. Izmerite kolektorski tok tranzistorja  $I_C$  v odvisnosti od  $U_{BE}$  pri treh temperaturah: približno 15, 35 in 55 °C.
2. Določite razmerje  $e_0/k_B$ .
3. zmerite temperaturno odvisnost kolektorskega toka tranzistorja pri dveh napetostih  $U_{BE}$  približno 0,5 in 0,58 V.

## 4 Meritve

Iz enačbe (1) vidimo, da naklon fitane premice na grafu 1 ustreza vrednosti  $e_0/k_B$ , z znano vrednostjo  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  As pa lahko izrazimo iskano  $k_B$ . Vrednosti  $k_B$  pri posamezni temperaturi so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: Tabela izračunanih vrednosti  $k_B$  pri različnih temperaturah

$T$ [K]	$k_B$ [J/K]
14,1	$1,56 \pm 0,02$
34,1	$1,403 \pm 0,002$
14,1	$1,456 \pm 0,006$

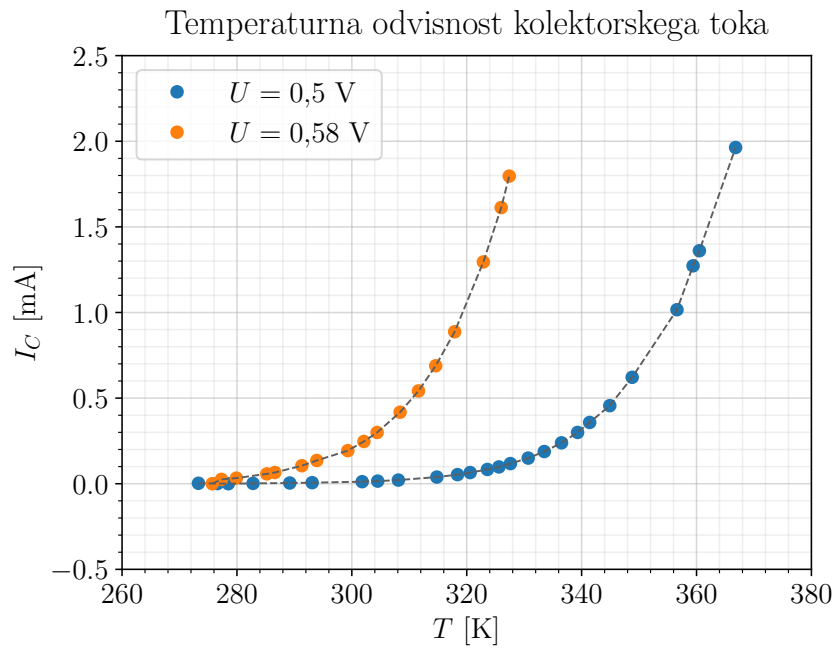


Slika 1: Logaritmirane vrednosti kolektorskega toka v odvisnosti od napetosti. Vrednost  $I_1$  je arbitrarna.

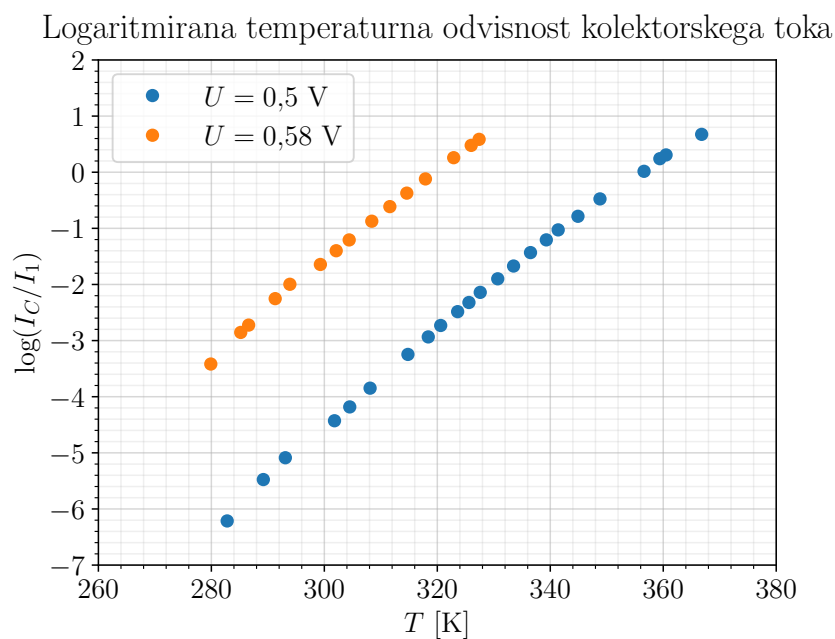
Iz vrednosti v tabeli 1 lahko izračunamo obteženo povprečje, kjer za uteži vzamemo inverze kvadratov negotovosti. Tako pridemo do končne vrednosti za  $k_B$ :

$$k_B = (1,410 \pm 0,002) \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

V drugem delu naloge smo morali opazovati kolektorski tok  $I_C$  pri konstantni napetosti  $U_{BE}$  in spreminjajoči temperaturi. To je prikazano na grafih 2 in 3.



Slika 2: Vrednosti kolektorskega toka v odvisnosti od temperature.



Slika 3: Logaritmirane vrednosti kolektorskega toka v odvisnosti od temperature. Vrednost  $I_1$  je arbitrarna.

## 5 Zaključek

Cilj vaje je bil, da izboljšamo razumevanje p-n spojev in da vidimo, kakšen vpliv imata napetost in temperatura. Pri tem smo izmerili vrednost znane konstante. Izmerjena vrednost odstopa od prave vrednosti,  $k_B = 1,381 \frac{\text{J}}{\text{K}}$ , saj ta ne pade v interval negotovosti. Vidimo, da so vse tri posamezne meritve višje od pričakovane, kar namiguje na nekakšno sistemsko napako.