

# Določanje Boltzmannove konstante $k_B$

Meritev Boltzmannove konstante  $k_B$  je osnovna na delovanju tokov znotraj bipolarnega tranzistorja (ang. Bipolar-junction transistor - BJT) z oznako n-p-n. Bipolarni tranzistorji so najbolj klasični tip tranzistorja, sestavljeni iz dveh p-n stikov. ~~skupaj~~

Naš bipolarni tranzistor ima tri kontakte imenovane kolektor, emitor in baza. Kolektor in baza v vaji lahko slučimo in merimo odvisnost toka skozi kolektor, kolektorskega toka  $I_C$  od napetosti med bazo in emitorji  $U_{BE}$ . Teoretična napoved te odvisnosti je podana z Ebers-Mollovo enačbo:

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

Kjer je  $T$  nasičena temperatura,  $U_{BE}$  pozitivna napetost med bazo in emitorjem ter  $I_S(T)$  velikost nasičenega toka v zaporni smeri. Če za majhne pozitivne napetosti  $U_{BE}$  je eksponentni člen v zgornji enačbi dosti večji kot 1, zato lahko poenostavimo:

$$I_C = I_S(T) \exp\left(\frac{e_0 U_{BE}}{k_B T}\right)$$

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

$$I_C = \beta I_B$$

Tipične vrednosti za  $\beta$  so med 20 in 200. Bazni in kolektorski tok pa skupaj tvorita tok skozi emitor -  $I_E = I_C + I_B$ . Predstavljeno tokovno-napetostno (IV) karakteristično tranzistorja lahko uporabimo za hitro in enostavno merjenje razmerja dveh osnovnih konstant  $\beta_{FE}$ ; lahko pa merimo temperaturo.

Električno prevodnost p-n stika pri napetosti v prevodni smeri določa več mehanizmov. Med drugimi

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

Vsaki od teh mehanizmov zavisi na različni način od napetosti in prispeva svoj delež toka preko stika. Difuzija nabojev oz. difuzijski tok je za nizke gostote toka dobro opisan z približkom od prof. Tok zaradi generacije in rekombinacije nosilcev naboja  $I_{rec}$ , se pojavi pri večjih gostotah toka in je sorazmeren z nekoliko drugačnim eksponentom:

$$I_{rec} \sim \exp\left(\frac{e_0 V_{BE}}{2k_B T}\right)$$

Druge prispevke imajo bolj komplicirane odvisnosti od napetosti. Pri diodah, ki vsebujejo le en p-n stik, prispevajo k prevodnosti vsi prof. nasteti mehanizmi, zato diode niso primerne za določanje  $\beta_{FE}$ .

Na našem tranzistorju sukamo bazo in kolektor s čim dosežemo, da napetost med Bazo in Emitorjem v prevodni smeri kolektorski tok določa le difuzija elektronov preko zaporne plasti od baze na kolektor.

## Potrebščine

- bipolarni n-p-n tranzistor tipe BC182B
- potenciometer in baterija (oz vir 1.5V)
- Voltmeter, mikroamper metru, žice
- termometer, Dewarjeva posoda in čase za vodo

## Naloga:

- Izmerite kolektorski tok tranzistorja  $I_c$  v odvisnosti  $U_{BE}$  pri 15, 35, 55°C
- Določite razmerje  $I_0/I_B$
- Izmerite temp. odvisnost kolektorskega toka pri dveh napetostih 0,5 in 0,58 V.

## Navodila

Zvezemo električni krog. Napetost  $U_{BE}$  nastavimo s potenciometerom od približno 0,5 do 0,6 V. Največji tok ne preseže 10 mA. Uporabljamo tranzistor za splošno rabo, ki je temperaturno bolj stabilen in dovoljuje nekoliko večje tokove ter s tem večjo generacijo toplinskih tokov. Tok merimo z mikroampermetrom. Temperaturo stabiliziramo z Dewarjevo posodo vode.

Pri meriti temp. odvisnosti  $I_c$  merimo za vsako stopinjo v čim širšem temp. območju pri fiksni  $U_{BE}$ . Pri vseh meritvah posredno merimo saturacijski tok, ki je približno podan:

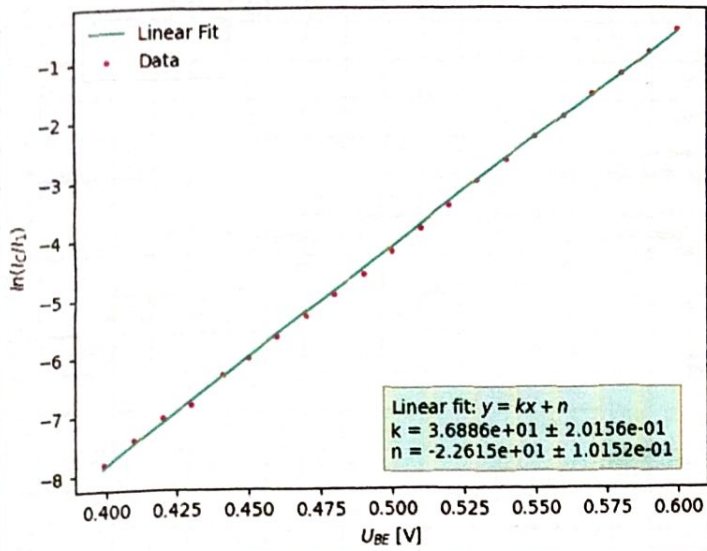
$$I_s(T) \approx \alpha T^2 \exp\left(-\frac{E_g(T)}{k_B T}\right)$$

$E_g$  ... širina en. vrzeli nedopranega Si

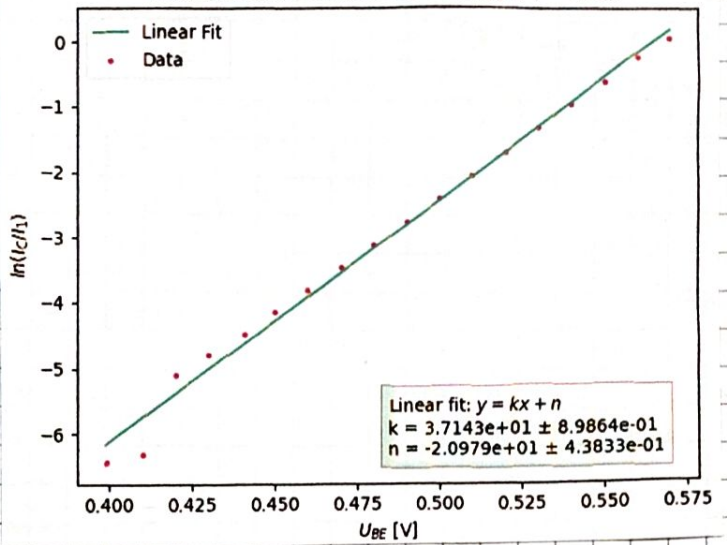
$n, \alpha$  ... parametra odvisna

od izklate tranzistorja

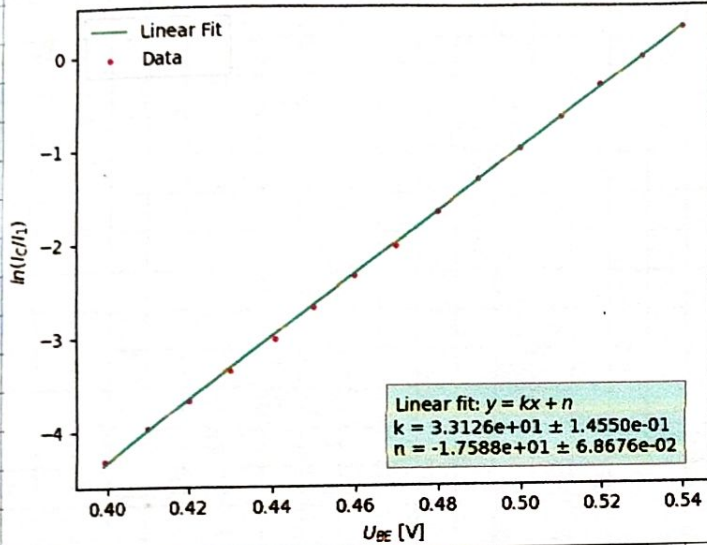
Linearizirana odvisnost  $I_C$  od  $U_{BE}$  pri  $T = 297K$



Linearizirana odvisnost  $I_C$  od  $U_{BE}$  pri  $T = 316K$



Linearizirana odvisnost  $I_C$  od  $U_{BE}$  pri  $T = 333K$



Iz odvisnosti od napetosti

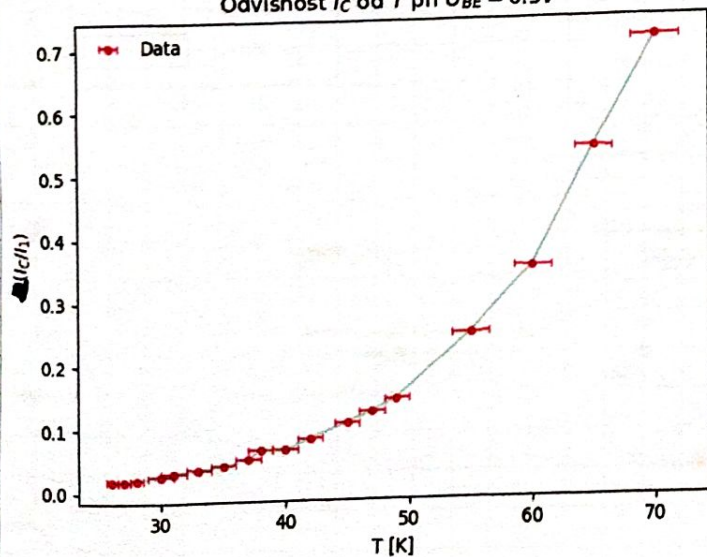
T [K]	k [As/J]	dk	$e_0/k_B$ [AsK/J]	$d(e_0/k_B)$
297	36,9	0,2	10959,3	59,4
316	37,1	0,8	11723,6	252,8
333	33,1	0,1	11022,3	33,3
Value:			11235	100

$$\frac{e_0}{T k_B} U_{BE} + \ln\left(\frac{I_s(T)}{I_1}\right) = \ln\left(\frac{I_C}{I_1}\right)$$

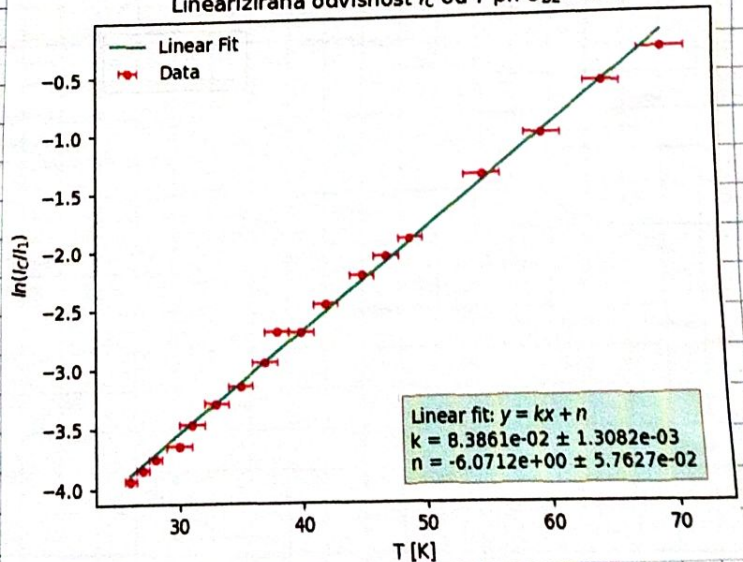
$$kx + n = y$$

$$\Rightarrow \frac{e_0}{k_B} = T k \quad \frac{e_0}{k_B} = (11200 \pm 100) \frac{\text{AsK}}{\text{J}}$$

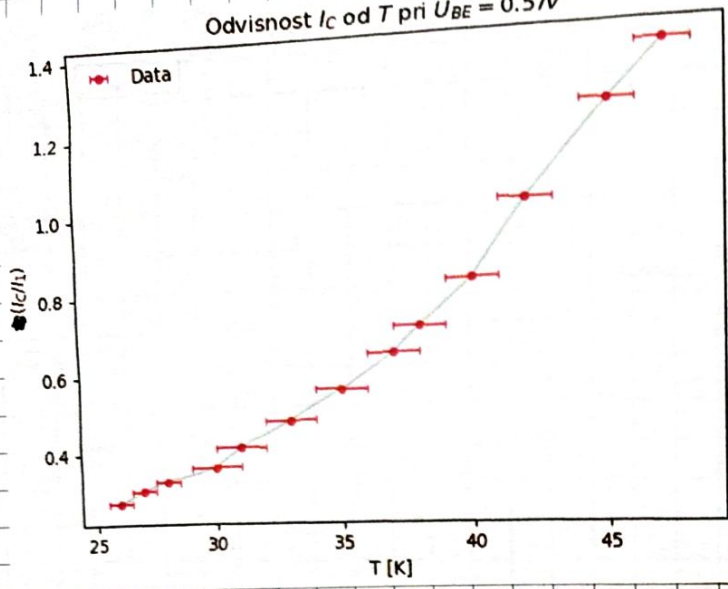
Odvisnost  $I_C$  od  $T$  pri  $U_{BE} = 0.5V$



Linearizirana odvisnost  $I_C$  od  $T$  pri  $U_{BE} = 0.5V$



Odvisnost  $I_C$  od  $T$  pri  $U_{BE} = 0.57V$



Linearizirana odvisnost  $I_C$  od  $T$  pri  $U_{BE} = 0.57V$

