

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 [1], medtem ko je njihovo fizikalno ozadje opisano v [4].

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 – kolektorskoga toka I_C od napetosti med bazo in emitorjem U_{BE} . Teoretična napoved te odvisnosti je podana z Ebers-Mollovo enačbo [3]

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

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

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

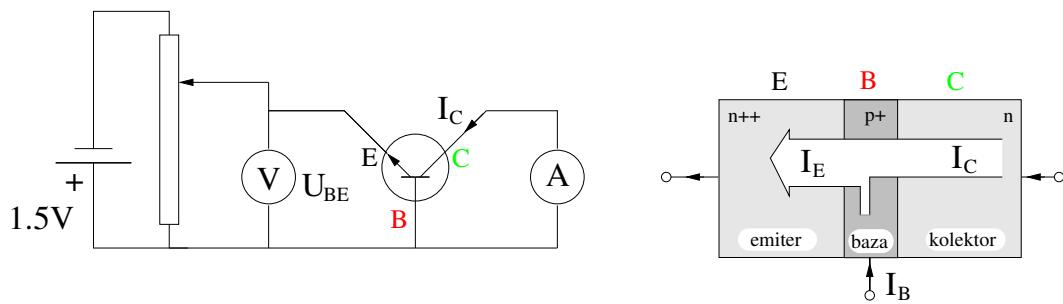
Pri večini silicijevih tranzistorjev ta relacija drži točneje od 1% v območju več kot 6 dekad toka kolektorja t.j. od nA do mA. V praksi pogosto razmišljamo o tranzistorju kot ojačevalcu toka skozi bazo t.i. baznega toka I_B in ga zato povežemo s kolektorskim tokom I_C preko faktorja ojačanja β v obliki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



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

- površinski efekti, kjer površinski ioni tvorijo zrcalne naboje znotraj polprevodnika, itd.

Vsek 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_{rec} , se pojavi pri večjih gostotah tokov in je sorazmeren z nekoliko drugačnim eksponentom $J_{rec} \sim \exp(e_0 U_{BE}/(2k_B T))$. Drugi prispevki imajo bolj komplificirane odvisnosti od napetosti. Pri diodah, ki vsebujejo le en p-n stik, prispevajo k prevodnosti vsi prej našteti 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 (1).

Potrebščine

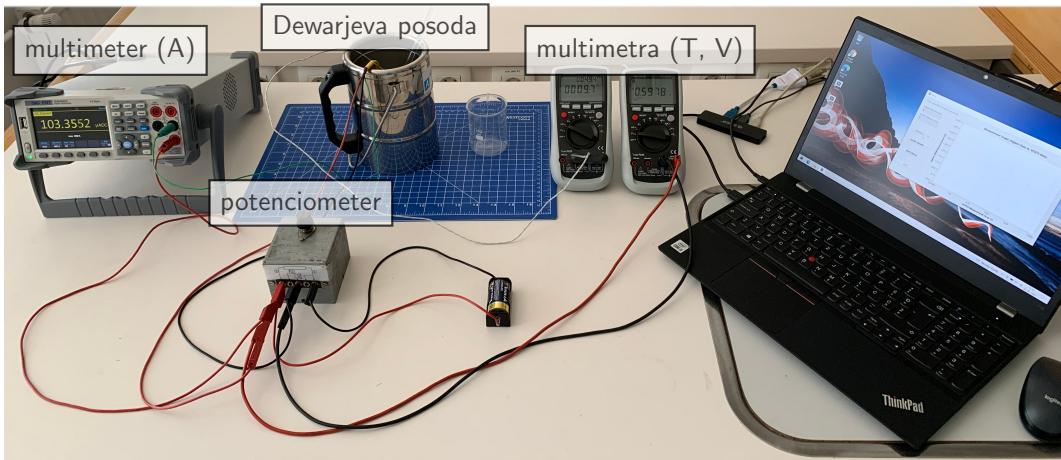
- bipolarni n-p-n tranzistor tipa BC182B,
- potenciometer in baterija ali drug stabilen vir enosmerne napetosti do 1.5 V,
- voltmeter (Voltcraft 870), namizni multimeter (SigLent SDM 3065X), žice,
- termometer, Dewarjeva posoda in čaše za vodo,
- prenosnik št. 6. s programom Boltz, napisanim v LabView-u.

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. Izmerite temperaturno odvisnost kolektorskega toka tranzistorja pri dveh napetostih U_{BE} približno 0.5 in 0.58 V.

Navodilo

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 topote. Postavitev vaje je prikazana na sliki 2.



Slika 2: Postavitev vaje Boltz na mizi v praktikumu.

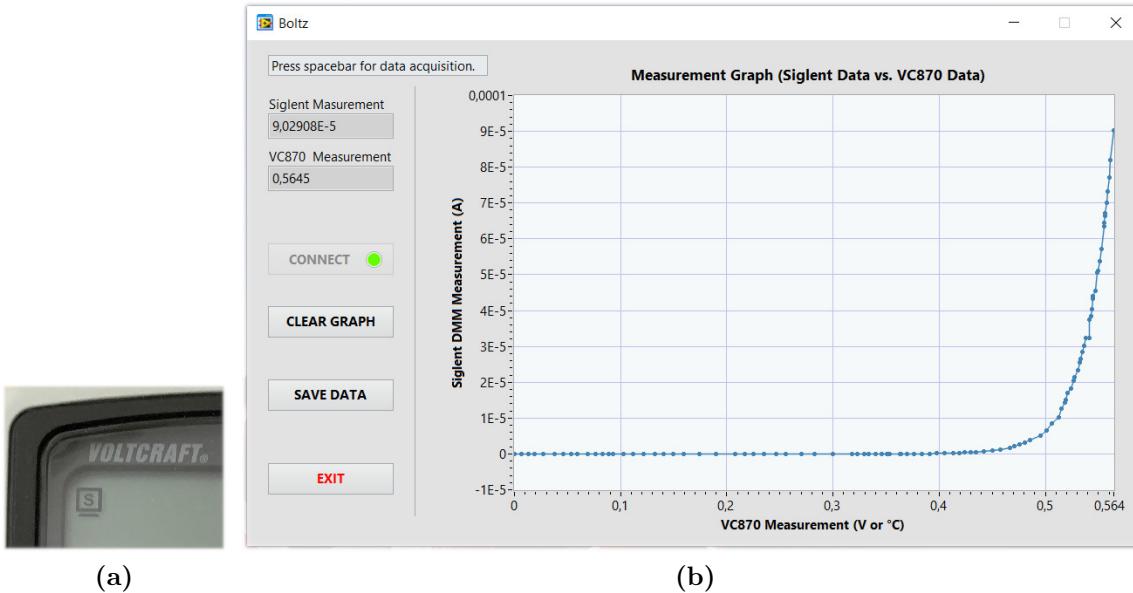
i Na prenosniku se vpišite z uporabniškim imenom **student** in geslom **praktikum2**. Na namizju najdete programom **Boltz**, s katerim si pomagate pri zajemanju podatkov iz multimetrov, kot so napetost, temperatura in tok.

Prenosnik je z USB kabli povezan z multimetri: namizni multimeter SigLent SDM 3065X in ročni multimeter Voltcraft 870. Prvega uporabimo za natančno merjenje kolektorskega toka I_C in drugega za merjenje napetosti U_{BE} ali temperature vode. Slednjega pripravimo na zajemanje, s strani računalnika, preko serijske povezave z daljšim pritiskom na tipko **REL/PC**. V zgornjem levem kotu ekrana se pojavi znak **S**, kot to prikazuje slika 3.a.

Slika 3.b prikazuje okno programa za izvedbo in zajem meritev. Program se pritiskom na gumb **Connect** poveže z obema napravama. S pritiskom na tipko **Space** sprožite sočasni zajem podatkov iz obeh naprav, ki se prikažejo na grafu program. Zbrane podatke lahko nato shranite v tekstovno datoteko s pritiskom na gumb **Save**, kjer so podatki urejeni v dve koloni: v prvi koloni je podatek iz Voltcraft 870, v drugi pa tok prebran iz SigLent SDM 3065X.

Pred začetkom vaje vklopite ledomat in ga napolnite z vodo in pred zagonom programa preverite, da sta namizni in ročni multimeter pričgan in je slednji pripravljen na serijski povezavo. Preverite vezavo tranzistorja in ostalega električnega kroga, kot je prikazano na sliki 1. Največji tok naj ne preseže 10 mA. Za temperaturno stabilizacijo zadostuje Dewarjeva posoda z vodo, v katero potopimo tranzistor. Različne temperature dosežemo z mešanjem ledu, tople in hladne vode. Tekom vaje je namizni multimeter je nastavljen na meritev enosmernega toka DC I .

1. Meritev $I - U$ karakteristike pri treh temperaturah T . Ročni multimeter Voltcraft 870, ki je priklopljen na prenosnik, prestavimo na merjenje enosmerne napetosti DC U in ga uporabimo za merjenje U_{BE} . Napetost U_{BE} nastavljamo s potenciometrom od približno 0.4 do 0.6 V. Za posamezno temperaturo s pomočjo programa izmerite



Slika 3: Oznaka za serijsko komunikacijo na ročnem Voltcraft multimetrju (a) in izgled programa **Boltz** (b).

odvisnost I_C od U_{BE} . 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 odčitajte in ocenite njegovo natančnost. Iz dobljenih odčitkov izračunajte končno oceno razmerja e_0/k_B in natančnost.

2. Meritev $I - T$ karakteristiko pri dveh različnih napetostih U_{BE} . Ročni multimeter Voltcraft 870, ki je priklopil na prenosnik, prestavimo na merjenje temperature in nataknemo nastavek za merjenje temperature, ki je termočlen tipa K. Za izbrano napetost med bazo in emitorjem U_{BE} s programom pomerite kolektorski tok I_C v čim večjem obsegu temperature T , približno od ledišča do vrelišča vode, pri čemer si pomagajte z ledom iz ledomata in vrelo vodo iz kuhalnika. Pazite, da se temperatura pred meritvijo toka in napetosti ustali. Za obe napetosti narišite grafa I_C in $\ln(I_C/I_1)$ v odvisnosti od temperature, kjer si lahko poljubno izberete tok I_1 . Pri teh meritvah posredno merimo t.i. saturacijski tok $I_S(T)$, katerega temperaturna odvisnost je približno podana z nastavkom [5]

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

kjer sta α in n praktično neodvisna od temperature in močno zavisa 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 [2].

Dodatek

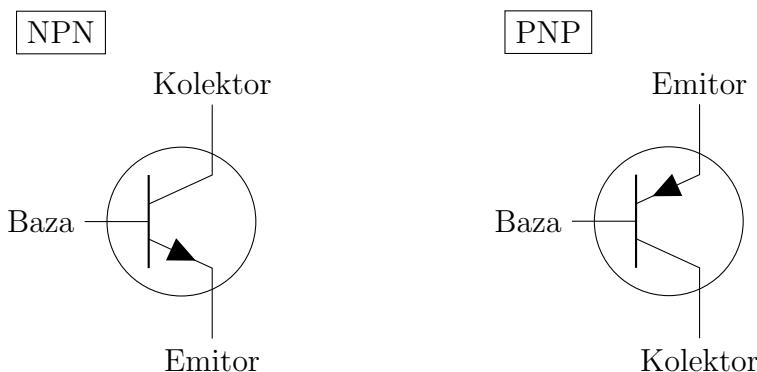
Ločujemo dve vrsti bipolarnih tranzistorjev n-p-n in p-n-p, ki se po delovanju nekoliko razlikujeta. Pri npn tranzistorju:

- 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 4, drugače označujemo. V splošnem pa napetost na bazi kontrolira količino toka skozi tranzistor.



Slika 4: Elektrotehnična oznaka za npn in pnp tranzistor.

Literatura

- [1] Thomas L. Floyd. *Electronic Devices (Conventional Flow Version) (7th Edition)*. USA: Prentice-Hall, Inc., 2004. ISBN: 0131140809.
- [2] I. B. Fogel'son. „Measuring temperature with germanium transistor thermoelements“. V: *Measurement Techniques* (7 1964), str. 1053–1058. DOI: [10.1007/BF00983164](https://doi.org/10.1007/BF00983164). URL: <https://doi.org/10.1007/BF00983164>.
- [3] Paul Horowitz in Winfield Hill. *The Art of Electronics*. 3rd. USA: Cambridge University Press, 2015. ISBN: 0521809266.
- [4] S. M. Sze in K. K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons, Inc., 2006. ISBN: 9780470068304.
- [5] R.D. Thornton in Semiconductor Electronics Education Committee. *Characteristics and Limitations of Transistors*. Semiconductor Electronics Education Committee books. Wiley, 1966. ISBN: 9780471864981.