

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

## Fyzikální praktikum II



Úloha č. 3

Název úlohy: Měření vlastností tranzistoru

Jméno: Vojtěch Votruba

Datum měření: 2023-11-20

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Použitá literatura	0–1	
<b>Celkem</b>	max. 17	

Posuzoval:

dne:

# Pracovní úkoly

1. Proměřte vstupní charakteristiku křemíkového tranzistoru BD 139 (NPN) v zapojení se společným emitorem pro odpor  $R_2 = 1000 \Omega$ .
2. Proměřte výstupní charakteristiku tranzistoru BD 139 pro dva proudy báze  $I_B = 0,2 \text{ mA}$  a  $0,3 \text{ mA}$ .
3. Změřte závislost kolektorového proudu  $I_C$  na proudu báze  $I_B$  pro kolektorová napětí  $U_{CE} = 2 \text{ V}$  a  $6 \text{ V}$ .
4. Pomocí lineární regrese určete činitel proudového zesílení  $\beta$  v zapojení se společným emitorem. Naměřené charakteristiky zpracujte graficky přímo v praktiku.

## 1 Teoretická část

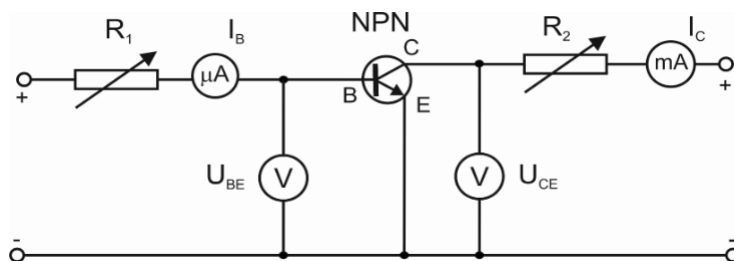
Tranzistor je polovodičová součástka velmi používaná ve všech moderních elektronických zařízeních. Obecně je dělíme na dva typy podle polovodičových přechodů, ze kterých jsou postaveny: tranzistory typu PNP a tranzistory typu NPN [1]. Z tranzistoru dále typicky vedou tři elektrody označeny E – *emitor*, C – *kolektor* a B – *báze*, podle vzájemného zapojení těchto elektrod rozlišujeme např. zapojení se společným kolektorem a zapojení se společným emitorem [1]. Právě zapojení se společným emitorem budeme proměřovat v této úloze. Tranzistor se dá v technické praxi pak použít například jako elektronický spínač nebo zesilovač.

### 1.1 Vstupní charakteristika

Vstupní charakteristikou nazveme závislost bázevého proudu  $I_B$  na napětí mezi bázi a emitorem  $U_{BE}$ . Pro tranzistor typu NPN jde tedy vlastně o charakteristiku přechodu PN [1]. Pro tu je odvozen vztah nazývaný Shockleyho diodová rovnice

$$I = I_0 \exp \left( \frac{qV}{k_B T} - 1 \right), \quad (1)$$

kde  $I_0$  je proud PN přechodem,  $V$  je napětí přiložené na PN přechod,  $q$  je elementární náboj,  $k_B$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je teplota [1]. Vstupní charakteristiku v zapojení se společným emitorem budeme měřit podle schématu na obr. 1.



Obrázek 1: Schéma zapojení NPN tranzistoru se společným emitorem [1].

### 1.2 Výstupní charakteristika

Obdobně, jako jsme v předchozí podsecei definovali vstupní charakteristiku, definujeme pro zapojení se společným emitorem výstupní charakteristiku tranzistoru jako závislost kolektorového proudu  $I_C$  na napětí mezi kolektorem a emitorem  $U_{CE}$  [1]. Zde už proud prochází přes oba přechody PN a proud na kolektoru můžeme tak spočítat jako lineární kombinaci charakteristik obou přechodů

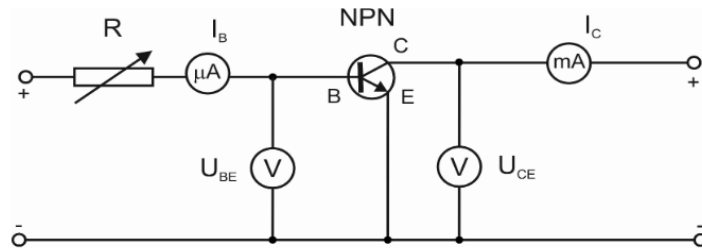
$$I_C = A \exp \left( \frac{qU_E}{k_B T} - 1 \right) + B \exp \left( \frac{qU_C}{k_B T} - 1 \right), \quad (2)$$

kde  $U_C$  a  $U_E$  jsou napětí na PN přechodech [1]. Během našeho měření, které bude provedeno znovu pomocí obvodu na obr. 1, budeme napětí  $U_E$  udržovat konstantní. Naopak napětí  $U_C$  zapojené v závěrném směru budeme zvyšovat (resp. snižovat). To povede k tomu, že druhý člen v rovnici (2) se stane pomalu zanedbatelným a proud  $I_C$  se bude v charakteristice saturovat [1].

### 1.3 Zesílení proudu

V této části ověříme zesilovací efekt tranzistoru a použijeme k tomu obvod na obr. 2. Vpouštíme-li jistý proud do emitorové části obvodu, bude proud, který vychází v kolektorové části, tím samým proudem přenásobeným jistou konstantou úměrnosti [1]. Této konstantě říkáme *činitel proudového zesílení* a je definována vztahem [1]

$$\beta = \left( \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{U_{CE}=\text{konst.}} \quad (3)$$



Obrázek 2: Schéma zapojení NPN tranzistoru se společným emitorem pro měření pracovního úkolu 3 [1].

## 2 Výsledky a zpracování měření

### 2.1 Podmínky pokusu

Měření bylo provedeno v místnosti PII v budově MFF UK na Karlově. Změřené podmínky termo-hygrobarometrem při pokusu byly následující: Teplota  $t = 23,0(4)^\circ\text{C}$ , relativní vlhkost  $\Phi = 37(3)\%$ , tlak  $p = 981(2)\text{ hPa}$ .

### 2.2 Vstupní charakteristika

Pro měření vstupní charakteristiky jsme použili obvod na obr. 1. Jako odpor  $R_1$  byl použit posuvný potenciometr a jako odpor  $R_2$  pevný odpor s  $1000\ \Omega$ . Napětí  $U_{CE} = 5,0\text{ V}$  jsme nastavili na pevně, zatímco napětí  $U_{BE}$  jsme postupně měnili. Použili jsme laboratorní zdroj **Straton**(typ 2229).

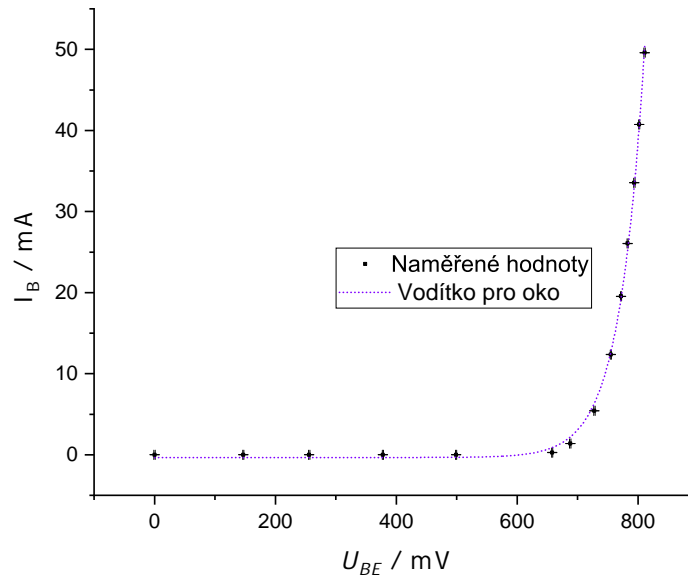
Obě veličiny (napětí i proud) jsme během měření odečítali z displaye dvou multimetrů **Keithley 2100**. Z toho také vyjdou nejistoty, které budeme odhadovat. Výrobce uvádí pro daný rozsah chybu napětí jako  $0,0045\%$  z naměřené hodnoty +  $0,000008\text{ V}$ . Pro proud uvádí chybu  $0,055\%$  z naměřené hodnoty +  $0,0025\text{ mA}$  pro rozsah  $10\text{ mA}$  nebo +  $0,006\text{ mA}$  pro rozsah  $100\text{ mA}$  [1]. Na druhou stranu z měření víme, že hodnoty na multimetru od určitého řádu fluktovali tak, že jsme je již za tento řád nemohli zapsat. Proto nejistotu odhadneme jako jednotku v posledním číselném řádu.

Všechna naměřená data jsou uvedena v tabulce 1

Tabulka 1: Naměřená vstupní charakteristika tranzistoru.

$U_{BE} / \text{mV}$	$\sigma_{U_{BE}} / \text{mV}$	$I_B / \text{mA}$	$\sigma_{I_B} / \text{mA}$
0	1	0,00	0,01
147	1	0,00	0,01
256	1	0,00	0,01
378	1	0,00	0,01
499	1	0,00	0,01
658	1	0,28	0,01
688	1	1,38	0,01
728	1	5,43	0,01
755	1	12,36	0,01
772	1	19,54	0,01
783	1	26,06	0,01
794	1	33,55	0,01
802	1	40,74	0,01
811	1	49,59	0,01

Data byla dále vynesena graficky do obr. 3 programem **Origin** a proložena exponenciálním vodítkem pro oko.



Obrázek 3: Závislost bázevého proudu  $I_B$  na nastaveném napětí mezi emitorem a bází  $U_{BE}$ .

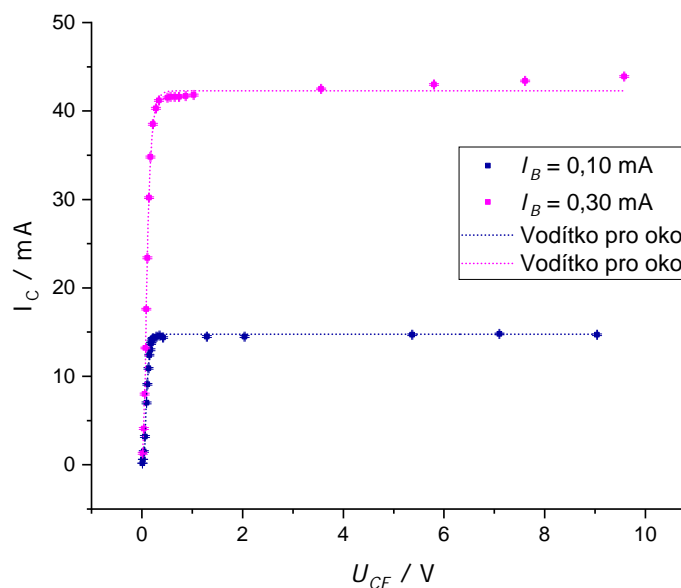
### 2.3 Výstupní charakteristika

V této části bude měření probíhat velmi podobně jako v části předchozí. Znovu vyjdeme z obvodu na obr. 1, leč tentokrát nastavíme  $R_1 = 20\,000\,\Omega$  na odporové dekádě a jako  $R_2$  použijeme posuvný potenciometr. Závislost  $I_C$  na  $U_{CE}$  zde změříme dvakrát při pevném nastavení  $I_B = 0,10\,\text{mA}$  a  $I_B = 0,30\,\text{mA}$ . Používáme stejný laboratorní zdroj jako v předchozí podsekcí.

Tentokrát hodnoty  $I_C$  a  $U_{CE}$  budeme odečítat na laboratorním multimetru Fluke 8808. Podobně jako v předchozí podsekcí je nejistota, kterou nám výrobce uvádí [1], v tomto měření nerealistická. Zapisujeme tedy hodnoty alespoň na dvě platné cifry a jako nejistotu odhadujeme jednotku v posledním řádu, který je zapisujeme.

Data naměřená v této podsekcí jsou uvedena v tabulkách 2 a 3.

Závislost byla také znovu zpracována graficky pomocí programu Origin, tentokrát do obr. 4. Znovu jsme vynesli exponenciální vodítka pro oko.



Obrázek 4: Závislost kolektorového proudu  $I_C$  na nastaveném napětí mezi kolektorem a emitorem  $U_{CE}$ .

Tabulka 2: Naměřená výstupní charakteristika tranzistoru pro  $I_B = 0,10 \text{ mA}$ .

$U_{CE} / \text{mV}$	$\sigma_{U_{CE}} / \text{mV}$	$I_C / \text{mA}$	$\sigma_{I_C} / \text{mA}$
0,011	0,001	0,18	0,01
0,024	0,001	0,61	0,01
0,041	0,001	1,5	0,1
0,061	0,001	3,2	0,1
0,094	0,001	7,0	0,1
0,11	0,01	9,1	0,1
0,13	0,01	10,9	0,1
0,15	0,01	12,4	0,1
0,17	0,01	13,0	0,1
0,18	0,01	13,7	0,1
0,19	0,01	13,9	0,1
0,21	0,01	14,2	0,1
0,22	0,01	14,3	0,1
0,29	0,01	14,5	0,1
0,35	0,01	14,6	0,1
0,42	0,01	14,4	0,1
2,04	0,01	14,5	0,1
1,29	0,01	14,5	0,1
5,37	0,01	14,7	0,1
7,10	0,01	14,8	0,1
9,04	0,01	14,7	0,1

Tabulka 3: Naměřená výstupní charakteristika tranzistoru pro  $I_B = 0,30 \text{ mA}$ .

$U_{CE} / \text{mV}$	$\sigma_{U_{CE}} / \text{mV}$	$I_C / \text{mA}$	$\sigma_{I_C} / \text{mA}$
0,018	0,001	1,3	0,1
0,037	0,001	4,1	0,1
0,055	0,001	8,0	0,1
0,074	0,001	13,2	0,1
0,089	0,001	17,6	0,1
0,11	0,01	23,4	0,1
0,14	0,01	30,2	0,1
0,17	0,01	34,8	0,1
0,22	0,01	38,5	0,1
0,28	0,01	40,3	0,1
0,34	0,01	41,2	0,1
0,51	0,01	41,5	0,1
0,57	0,01	41,6	0,1
0,65	0,01	41,6	0,1
0,74	0,01	41,6	0,1
0,87	0,01	41,7	0,1
1,03	0,01	41,8	0,1
3,56	0,01	42,5	0,1
5,80	0,01	43,0	0,1
7,61	0,01	43,4	0,1
9,58	0,01	43,9	0,1

## 2.4 Zesílení proudu

Finálně prozkoumáme zesilující účinky tranzistoru. Sestavíme obvod podle obr. 2, kde jako odpor  $R$  použijeme dekádu s nastavením na  $20\,000\,\Omega$ . Závislost  $I_C$  na  $I_B$ , kterou předpokládáme lineární, zde znovu měříme dvakrát pro pevné nastavení  $U_{CE} = 3,0 \text{ V}$  a  $U_{CE} = 5,5 \text{ V}$ .

Oba dva proudy měříme na různých multimetrech zmíněných v předchozích podsekcích. Na oba dva multimetry se ovšem vztahuje, že použití nejistoty uváděné výrobcem je v tomto pokusu neadekvátní.

Naměřená data byla zanesena do tabulek 4 a 5.

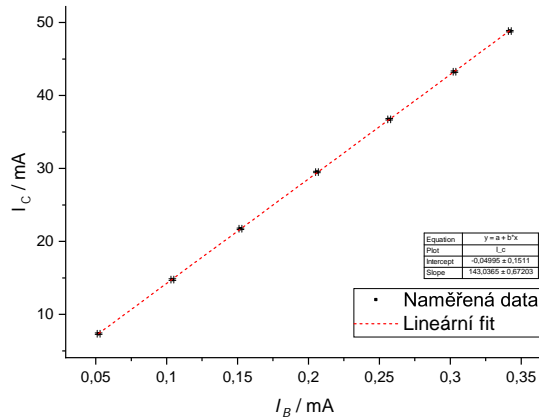
Tabulka 4: Naměřené zesilovací účinky tranzistoru pro konstantní napětí  $U_{CE} = 3,0 \text{ V}$ .

$I_B / \text{mA}$	$\sigma I_B / \text{mA}$	$I_C / \text{mA}$	$\sigma I_C / \text{mA}$
0,052	0,001	7,36	0,1
0,104	0,001	14,77	0,1
0,152	0,001	21,73	0,1
0,206	0,001	29,51	0,1
0,257	0,001	36,74	0,1
0,303	0,001	43,26	0,1
0,342	0,001	48,82	0,1

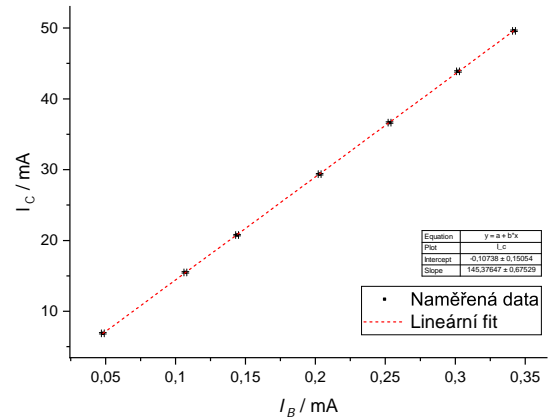
Tabulka 5: Naměřené zesilovací účinky tranzistoru pro konstantní napětí  $U_{CE} = 5,5 \text{ V}$ .

$I_B / \text{mA}$	$\sigma I_B / \text{mA}$	$I_C / \text{mA}$	$\sigma I_C / \text{mA}$
0,048	0,001	6,90	0,1
0,107	0,001	15,49	0,1
0,144	0,001	20,76	0,1
0,203	0,001	29,36	0,1
0,253	0,001	36,65	0,1
0,302	0,001	43,87	0,1
0,342	0,001	49,60	0,1

Dále jsme obě závislosti nafitovali lineární funkcí v programu **Origin** a vynesli je do grafů na obr. 5a a 5b.



(a) Naměřeno pro  $U_{CE} = 3,0 \text{ V}$ .



(b) Naměřeno pro  $U_{CE} = 5,5 \text{ V}$ .

Obrázek 5: Závislost kolektorového proudu  $I_C$  na bázevém proudu  $I_B$ .

**Origin** nám vrátil směrnice fitu, které mají fyzikální význam činitelů proudového zesílení. Vychází tedy jako

$$\beta(3,0 \text{ V}) = 143,03(5), \quad (4)$$

$$\beta(5,5 \text{ V}) = 145,4(1). \quad (5)$$

### 3 Diskuse výsledků

Podle instrukcí jsme změřili obě charakteristiky a zesilovací účinky tranzistoru. Měření charakteristik dopadlo uspokojivě, naměřená data dobře odpovídají teoretickým exponenciálním závislostem, jak je vidět na obr 3 a 4, a není proto nutné v této části hledat další zdroje chyby.

Naopak tomu bylo u měření zesílení. Z teorie víme, že koeficient  $\beta$  by měl vyjít pro obě napětí  $U_{CE}$  stejně, přičemž naše výsledky se neshodují ani v rámci nejistoty. Velmi dobrou orientační shodu však nacházíme, je tedy pravděpodobné, že jsme nejistotu pouze podhodnotili a že nedošlo k velkým systematickým chybám, jež

by zmařily experiment.

Jak bylo zmíněno v příslušné sekci, fitování proběhlo pomocí programu **Origin**, konkrétně funkcí **Fit Linear with X Error**, která zohledňuje chybu naměřených dat na ose  $x$ , na ose  $y$  i statistickou nejistotu. Z toho vyplývá, že nejistota, kterou jsme podhodnotili, musela být nejistota samotných naměřených dat. Jak si můžeme povšimnout, aby se oba činitele shodovali, museli by nejistota být přinejmenším o řád vyšší.

Mezi nezapočtené zdroje chyb může patřit například nezapočtený ohřev vodičů, nepříliš těsné kontakty, koroze na kontaktech nebo parazitní odpory, i když těžko říct, do jaké míry tyto faktory experiment mohly ovlivnit. Odhlédneme-li však od samotných koeficientů, vyšlo měření zesílení také v pořádku. Naměřená data šla dobře proložit lineární funkcí viz obr. 5.

## 4 Závěr

Podařilo se proměřit vstupní i výstupní charakteristiku křemíkového tranzistoru **BD 139** v zapojení se společným emitorem. Tyto charakteristiky byly zpracovány graficky i tabelárně.

Dále se podařilo proměřit zesilovací účinky téhož tranzistoru a zpracovat toto zesílení obdobně k naměřeným charakteristikám. V této části jsme také fitováním stanovili činitel proudového zesílení pro dvě fixní napětí. Pozorujeme u nich alespoň orientační shodu:

$$\beta(3,0\text{ V}) = 143,03(5), \quad (6)$$

$$\beta(5,5\text{ V}) = 145,4(1). \quad (7)$$

## Reference

- [1] *Měření vlastností tranzistoru* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/203>