

## Úkol

1. Proměřte vstupní charakteristiku křemíkového tranzistoru **BD 139** (NPN) v zapojení se společným emitorem pro nulový proud kolektorem ( $R_2 = \infty$ ) a odpor  $R_2 = 1000 \Omega$ .
2. Proměřte výstupní charakteristiku tranzistoru **BD 139** pro proudy báze  $I_B = 0,1 \text{ mA}$ ,  $0,2 \text{ mA}$  a  $0,3 \text{ mA}$ .
3. Změřte závislost kolektorového proudu  $I_{CE}$  na proudu báze  $I_{BE}$  pro kolektorové napětí  $U_{CE} = 2 \text{ V}$ ,  $6 \text{ V}$  a  $10 \text{ V}$ .
4. Pomocí lineární regrese určete činitel proudového zesílení  $\beta$  v zapojení se společným emitorem.

## Teorie

Tranzistor je polovodičová součástka složená ze dvou PN přechodů se třemi elektrodami - emitor, kolektor a báze. V tomto praktiku měříme vlastnosti tranzistoru se společným emitorem NPN.

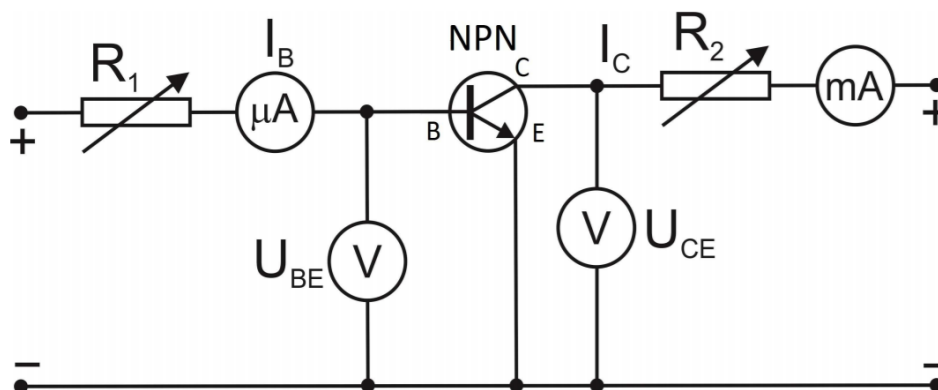
Vstupní charakteristika tranzistoru je funkční závislost proudu tekoucího báze na napětí mezi báze a emitorem,

$$I_{BE} = f(U_{BE}), \quad (1)$$

výstupní charakteristika je závislost proudu tekoucího kolektorem na napětí mezi kolektorem a emitorem,

$$I_{CE} = f'(U_{CE}). \quad (2)$$

Typické průběhy obou jsou uvedeny v [1], tyto závislosti měříme pomocí zapojení 1.

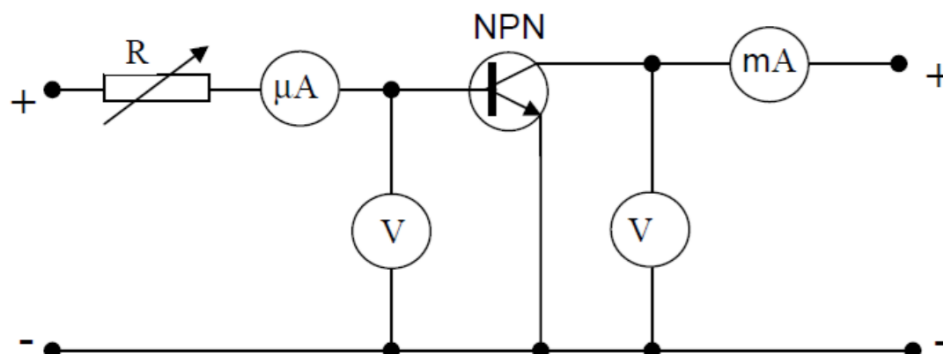


Obrázek 1: Zapojení použité pro úkol 1 a 2

V zapojení se společným emitorem funguje tranzistor jako zesilovač proudu. Přivedení malého proudu na bázi se projeví tokem většího proudu v kolektorovém obvodu. Toto zesílení je popsáno činitelem proudového zesílení  $\beta$ ,

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

Tento činitel získáme lineární regresí závislosti  $I_{CE}$  na  $I_{BE}$  měřené pomocí 2.



Obrázek 2: Zapojení použité pro úkol 3

## Výsledky měření

Tabulky 1 a 2 obsahují hodnoty vstupní charakteristiky tranzistoru. Pro měření v bázevém obvodu byly použity dva multimetry **METEX MXD-4660A**. Chyby hodnot byly určeny chybami těchto přístrojů. Nekonečný odpor byl realizován rozpojením kolektorového obvodu.

$U_{BE}$ [V]	$\sigma_{U_{BE}}$ [V]	$I_{BE}$ [mA]	$\sigma_{I_{BE}}$ [mA]
0,543 80	0,000 03	0,001	0,003
0,585 70	0,000 03	0,004	0,003
0,616 10	0,000 04	0,082	0,003
0,631 00	0,000 04	0,222	0,003
0,664 60	0,000 04	0,818	0,003
0,682 90	0,000 04	1,474	0,003
0,691 40	0,000 04	1,922	0,004
0,705 80	0,000 04	2,989	0,004
0,715 70	0,000 04	4,039	0,005
0,731 10	0,000 04	6,400	0,006
0,746 20	0,000 04	9,987	0,008
0,764 20	0,000 04	16,57	0,02
0,780 90	0,000 04	25,64	0,02
0,788 20	0,000 04	30,69	0,02
0,799 50	0,000 04	39,84	0,03

Tabulka 1: Naměřené hodnoty napětí a proudu v bázevém obvodu zapojení 1 při odporu  $R_2 = 1000 \Omega$

$U_{BE}$ [V]	$\sigma_{U_{BE}}$ [V]	$I_{BE}$ [mA]	$\sigma_{I_{BE}}$ [mA]
0,376 60	0,000 02	0,000	0,003
0,502 70	0,000 03	0,043	0,003
0,559 00	0,000 03	0,033	0,003
0,608 60	0,000 04	0,169	0,003
0,619 90	0,000 04	0,241	0,003
0,642 20	0,000 04	0,472	0,003
0,662 00	0,000 04	0,851	0,003
0,678 90	0,000 04	1,404	0,003
0,689 70	0,000 04	1,933	0,004
0,716 10	0,000 04	4,234	0,005
0,730 30	0,000 04	6,435	0,006
0,744 10	0,000 04	9,600	0,008
0,757 90	0,000 04	14,15	0,01
0,769 20	0,000 04	19,20	0,02
0,784 20	0,000 04	28,12	0,02
0,792 70	0,000 04	34,47	0,02
0,800 50	0,000 04	41,18	0,03

Tabulka 2: Naměřené hodnoty napětí a proudu v bázevém obvodu zapojení 1 při odporu  $R_2 = \text{inf}$

V tabulkách 3, 4 a 5 jsou zaznamenány hodnoty naměřené v rámci úkolu 2, tedy výstupní charakteristiky tranzistoru. Měření bylo v kolektorovém obvodu provedeno multimetry **KEITHLEY 2010**, v bázevém jako výše. Chyby hodnot opět sestávají z chyb měřicích přístrojů.

$U_{CE}$ [V]	$\sigma_{U_{CE}}$ [V]	$I_{CE}$ [mA]	$\sigma_{I_{CE}}$ [mA]
0,014 14	0,000 04	0,238	0,001
0,050 64	0,000 06	2,139	0,009
0,070 92	0,000 07	4,04	0,02
0,101 84	0,000 08	7,62	0,03
0,119 58	0,000 09	9,51	0,03
0,1351	0,0001	10,85	0,04
0,1422	0,0001	11,34	0,04
0,1587	0,0001	12,23	0,04
0,1884	0,0001	13,11	0,04
0,2051	0,0004	13,36	0,04
0,2190	0,0004	13,48	0,04
0,2540	0,0004	13,62	0,04
0,3260	0,0005	13,70	0,04
0,4000	0,0005	13,73	0,04
0,5501	0,0006	13,75	0,04
0,6090	0,0006	13,75	0,04
0,8037	0,0007	13,77	0,04
1,2062	0,0009	13,80	0,04
1,992	0,001	13,85	0,04
2,691	0,004	13,89	0,04
3,703	0,005	13,94	0,04
4,562	0,005	13,99	0,04
5,699	0,006	14,04	0,05
6,501	0,006	14,08	0,05
8,530	0,007	14,17	0,05
9,971	0,008	14,23	0,05

Tabulka 3: Naměřené hodnoty napětí a proudu v kolektorovém obvodu zapojení 1 při proudu báze  $I_{BE} = 0,1$  mA

$U_{CE}$ [V]	$\sigma_{U_{CE}}$ [V]	$I_{CE}$ [mA]	$\sigma_{I_{CE}}$ [mA]
0,010 11	0,000 04	0,311	0,001
0,021 27	0,000 04	1,083	0,004
0,030 87	0,000 05	1,975	0,006
0,046 86	0,000 05	4,01	0,02
0,059 97	0,000 06	6,20	0,02
0,079 02	0,000 07	10,06	0,03
0,093 73	0,000 08	13,28	0,04
0,116 08	0,000 09	17,88	0,06
0,1410	0,0001	21,8	0,1
0,1558	0,0001	23,5	0,1
0,1764	0,0001	25,1	0,1
0,2013	0,0004	26,3	0,1
0,2616	0,0004	27,5	0,1
0,3620	0,0005	27,9	0,1
0,4110	0,0005	28,0	0,1
0,5020	0,0006	28,0	0,1
0,6512	0,0006	28,0	0,1
0,7683	0,0007	28,1	0,1
0,8641	0,0007	28,1	0,1
1,487	0,001	28,2	0,1
2,525	0,004	28,4	0,1
3,475	0,005	28,5	0,1
5,057	0,006	28,7	0,1
6,868	0,006	28,9	0,1
8,241	0,007	29,1	0,1
9,485	0,008	29,3	0,1
10,003	0,008	29,4	0,1

Tabulka 4: Naměřené hodnoty napětí a proudu v kolektorovém obvodu zapojení 1 při proudu báze  $I_{BE} = 0,2$  mA

V tabulkách 6, 7 a 8 jsou uvedeny hodnoty závislosti zesíleného proudu  $I_{CE}$  na  $I_{BE}$ . Byly použity stejné přístroje a stejná metoda určení chyb jako výše.

$U_{CE}$ [V]	$\sigma_{U_{CE}}$ [V]	$I_{CE}$ [mA]	$\sigma_{I_{CE}}$ [mA]
0,009 51	0,000 03	0,464	0,002
0,012 36	0,000 04	0,737	0,003
0,015 71	0,000 04	1,086	0,004
0,024 11	0,000 04	2,119	0,009
0,031 53	0,000 05	3,24	0,01
0,041 28	0,000 05	5,03	0,02
0,050 19	0,000 06	6,98	0,02
0,065 24	0,000 06	10,89	0,04
0,079 67	0,000 07	15,16	0,05
0,096 00	0,000 08	20,14	0,09
0,114 67	0,000 09	25,5	0,1
0,1351	0,0001	30,2	0,1
0,1660	0,0001	35,1	0,1
0,1936	0,0001	37,5	0,1
0,2274	0,0004	39,1	0,1
0,4040	0,0005	41,8	0,2
0,6030	0,0006	42,1	0,2
0,9710	0,0008	42,2	0,2
1,2860	0,0009	42,3	0,2
2,037	0,004	42,6	0,2
3,123	0,005	42,9	0,2
4,092	0,005	43,1	0,2
5,039	0,006	43,4	0,2
6,680	0,006	43,8	0,2
8,565	0,007	44,2	0,2
9,920	0,008	44,6	0,2

Tabulka 5: Naměřené hodnoty napětí a proudu v kolektorovém obvodu zapojení 1 při proudu bázi  $I_{BE} = 0,3 \text{ mA}$

$I_{BE}$ [mA]	$\sigma_{I_{BE}}$ [mA]	$I_{CE}$ [mA]	$\sigma_{I_{CE}}$ [mA]
0,050	0,003	7,01	0,02
0,096	0,003	13,53	0,04
0,160	0,003	22,5	0,1
0,215	0,003	29,9	0,1
0,248	0,003	34,1	0,1
0,301	0,003	40,9	0,2

Tabulka 6: Naměřené hodnoty  $I_{BE}$  a  $I_{CE}$  při napětí  $U_{CE} = 2 \text{ V}$

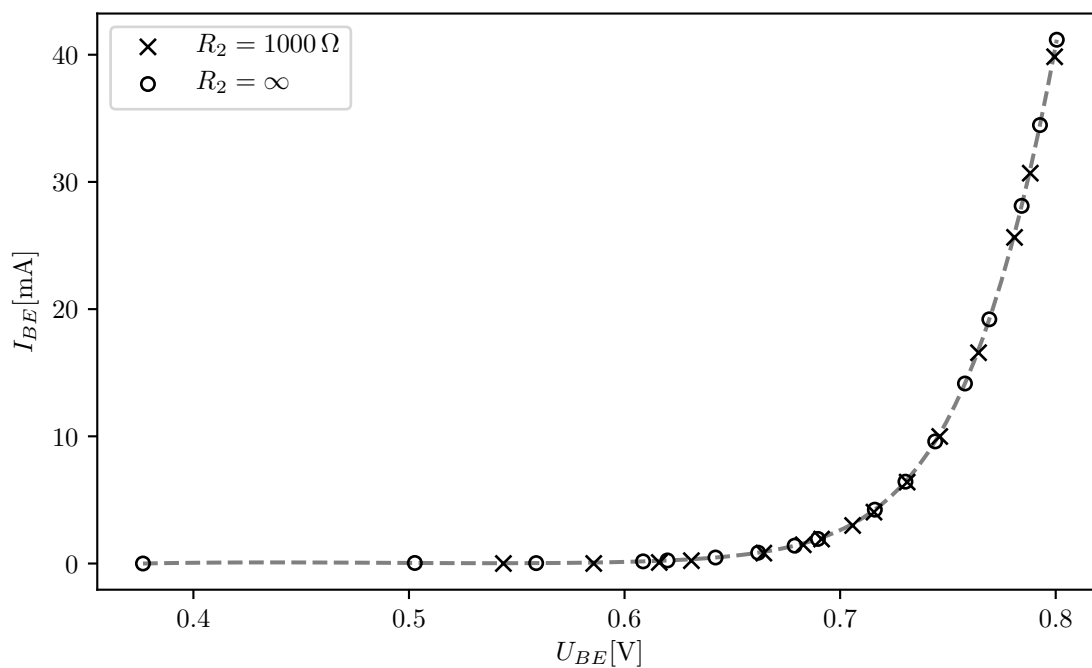
$I_{BE}$ [mA]	$\sigma_{I_{BE}}$ [mA]	$I_{CE}$ [mA]	$\sigma_{I_{CE}}$ [mA]
0,050	0,003	7,19	0,02
0,106	0,003	15,22	0,05
0,150	0,003	21,50	0,09
0,205	0,003	29,1	0,1
0,253	0,003	35,8	0,1
0,302	0,003	42,6	0,2

Tabulka 7: Naměřené hodnoty  $I_{BE}$  a  $I_{CE}$  při napětí  $U_{CE} = 6 \text{ V}$

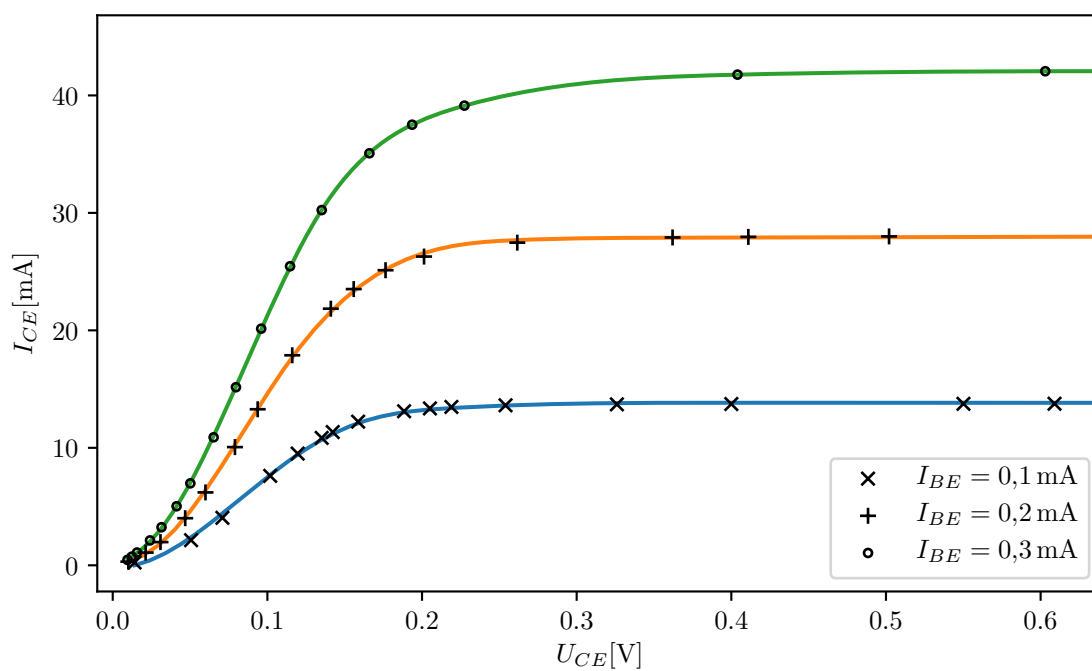
$I_{BE}$ [mA]	$\sigma_{I_{BE}}$ [mA]	$I_{CE}$ [mA]	$\sigma_{I_{CE}}$ [mA]
0,052	0,003	7,56	0,03
0,100	0,003	14,55	0,05
0,151	0,003	21,9	0,1
0,198	0,003	28,6	0,1
0,249	0,003	36,0	0,1
0,297	0,003	42,6	0,2

Tabulka 8: Naměřené hodnoty  $I_{BE}$  a  $I_{CE}$  při napětí  $U_{CE} = 10 \text{ V}$

Graf 3 zobrazuje vstupní charakteristiky tranzistoru. V grafu 4 jsou zaznamenány přibližní prvních částí výstupních charakteristik tranzistoru, z tabulek 3, 4 a 5 lze snadno vyčíst, že zbytek závislosti je téměř konstantní a tedy nikterak zajímavý.

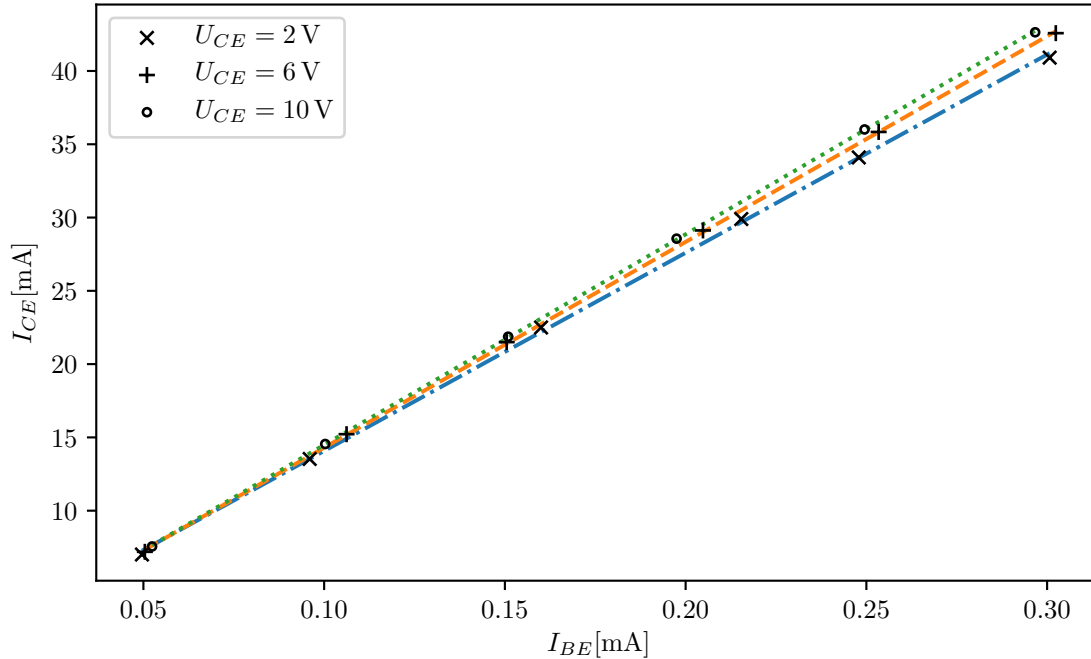


Obrázek 3: Závislost proudu tekoucího bází na napětí mezi bází a emitorem



Obrázek 4: Část závislosti proudu tekoucího kolektorem na napětí mezi kolektorem a emitorem

Graf 5 znázorňuje lineární závislost zesíleného proudu  $I_{CE}$  na  $I_{BE}$  při třech napětích v kolektorovém obvodu. Tyto závislosti byly proloženy lineárním fitem.



Obrázek 5: Závislost zesíleného proudu  $I_{CE}$  na vstupním  $I_{BE}$

Směrnice lineárních regresí odpovídají činiteli proudového zesílení

$$\beta_{U_{CE}=2V} = 135,2 \pm 1,3,$$

$$\beta_{U_{CE}=6V} = 140,3 \pm 0,6,$$

$$\beta_{U_{CE}=10V} = 143,7 \pm 0,4.$$

## Diskuse

Naměřená vstupní i výstupní charakteristika tranzistoru v zapojení se společným emitorem má charakter předpovězený literaturou, díky velkému množství naměřených hodnot se je navíc podařilo zachytit v poměrně velkém detailu. Jak je z grafu 3 poznat, vstupní charakteristika tranzistoru při použití odporu  $R_2 = 1000\Omega$  se takřka neliší od charakteristiky při rozpojení kolektorového obvodu. Naopak výstupní charakteristika je vysoce citlivá na změny proudu tekoucí bází.

Naměřená závislost zesíleného proudu  $I_{CE}$  na  $I_{BE}$  má podle teoretického předpokladu lineární charakter s minimální odchylkou. Taktéž v souladu s teorií je skutečnost, že pro různé hodnoty napětí  $U_{CE}$  se směrnice od sebe jen málo liší. Všechny tři použité hodnoty napětí  $U_{CE}$  se totiž zřejmě nacházejí v druhé, téměř nerostoucí části výstupní charakteristiky tranzistoru, tudíž pro každou hodnotu  $I_{BE}$  proud kolektorem  $I_{CE}$  jen málo závisí na  $U_{CE}$ .

Lineární závislosti  $I_{CE}$  na  $I_{BE}$  si lze povšimnout i z grafu 4. V celém průběhu charakteristiky jsou hodnoty  $I_{CE}$  při  $I_{BE} = 0,1$  mA zhruba dvakrát resp. třikrát menší než při  $I_{BE} = 0,2$  mA a  $0,3$  mA.

Při vyhodnocení měření nebyly v úvahu brány drobné systematické chyby způsobené odpory vodičů či drobnými změnami okolních podmínek, jejich hodnoty se totiž nemohou vedle chyb měřicích přístrojů znatelně projevit.

## Závěr

Naměřená vstupní i výstupní charakteristika tranzistoru odpovídá teoretické předpovědi.

Pomocí lineární regrese byly určeny činitele proudového zesílení tranzistoru

$$\beta_{U_{CE}=2\text{ V}} = 135,2 \pm 1,3,$$

$$\beta_{U_{CE}=6\text{ V}} = 140,3 \pm 0,6,$$

$$\beta_{U_{CE}=10\text{ V}} = 143,7 \pm 0,4.$$

## Literatura

- [1] Studijní text "Měření vlastností tranzistoru", dostupné z [http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_203.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_203.pdf), 30. 11. 2017