

Pracovní úkol

1. Změřte charakteristiky vakuové (EZ 81) a Zenerovy (KZ 703) diody bod po bodu.
2. Určete dynamický vnitřní odpor Zenerovy diody v propustném směru při proudu 200 mA a v závěrném směru pro proud 400 mA.
3. Určete odpovídající Zenerovo napětí při tomto proudu.
4. Pro tento proud (pracovní bod) zakreslete do grafu zatěžovací přímku pro napětí zdroje $U_1 = 9\text{ V}$.
5. Určete odpovídající stabilizační činitel.

Teoretický úvod

V úloze budeme zkoumat diody, což jsou zjednodušeně součástky, které v jednom směru proud propouštějí a v opačném nikoli. Budeme zkoumat dvě různé realizace diody – vakuovou a Zenerovu diodu. Charakteristikou diody nazýváme závislost proudu diodou I na napětí U na ní. Pro součástky s odporem závislejícím na proudu, jako jsou např. diody, se dále zavádí veličina dynamický odpor

$$r = \frac{dU}{dI}, \quad (1)$$

která ovšem též závisí na proudu, resp. napětí.

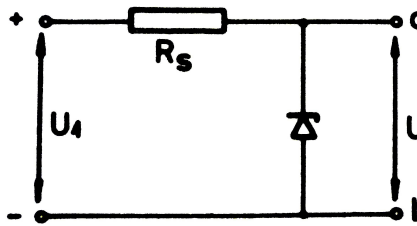
Vakuová dioda sestává z katody a anody oddělené vakuem, přičemž katoda je žhavená. Následkem toho unikají z jejího povrchu elektrony a vytváří kolem katody záporný elektronový oblak. I při nulovém přiloženém napětí některé z těchto elektronů dopadnou na anodu a pokud je tato s katodou vodivě spojená, obvodem protéká nějaký malý proud.

Pokud na anodu přiložíme kladné napětí, jsou elektrony odsávány z okolí katody a proud tekoucí obvodem roste s napětím. Podle [1] je tato závislost dána tzv. *třípolovinovým* zákonem

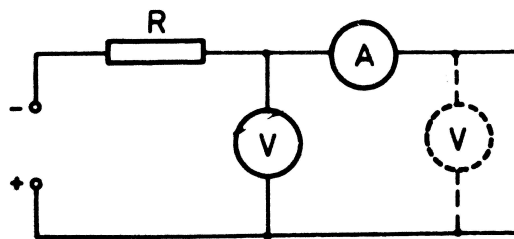
$$I = aU^{3/2}, \quad (2)$$

kde a závisí na geometrickém uspořádání elektrod. Pokud naopak na anodu přiložíme už jen malé záporné napětí, žádné elektrony ji nedosáhnou a obvodem neprotéká žádný proud.

Zenerova dioda je speciální případ polovodičové diody. To je součástka tvořená k sobě přiloženými polovodiči typu P a N. Na jejich rozhraní se utvoří tzv. P–N přechod, který v jednom směru proud propouští a v druhém nikoli. V propustném směru je závislost proudu na napětí exponenciální. Zatímco schopnost vakuové diody držet závěrné napětí je omezena pouze možným výbojem elektronů ve vakuu, P–N přechod v polovodičových diodách lze zničit již závěrným napětím přesahujícím 10 V, přičemž tento průraz je ireverzibilní.



Obrázek 1: Stabilizační obvod



Obrázek 2: Měření napětí a proudu

Zenerova dioda se od obyčejné polovodičové liší tím, že ještě před ireverzibilním průrazem dojde při tzv. *průrazném* napětí k náhlému poklesu odporu o několik řádů a závislost proudu na napětí je dále lineární.

Vlastnosti Zenerovy diody lze s úspěchem využít pro stabilizaci stejnosměrného napětí. Příklad stabilizačního obvodu je na Obrázku 1. Výstupní napětí zde označené U_o je vlastně napětí na diodě, které značíme U . Kvalitu stabilizačního obvodu vyjadřuje tzv. *stabilizační* činitel

$$S = \frac{U}{U_1} \frac{dU_1}{dU}. \quad (3)$$

Závislost proudu I_S stabilizačním obvodem na napětí na diodě se nazývá zátěžová přímka a platí

$$I_S = -\frac{U_1 + U}{R_S}. \quad (4)$$

Pro současné měření napětí a proudu na nějaké součástce v obvodu můžeme zvolit dvě různá zapojení podle Obrázku 2. Při zapojení voltmetru plnou čarou (a) zanedbáváme nenulový odpor ampérmetru vůči diodě a tato chyba se projeví v určení většího napětí, než jaké na diodě skutečně je. Při zapojení voltmetru přerušovanou čarou (b) zanedbáváme konečný odpor voltmetru vůči diodě a dostaneme větší proud, než jaký diodou prochází. Z uvedeného plyne, že první zapojení je vhodné pro velké odpory, tedy závěrný směr diody, zatímco druhé spíše pro malé odpory, tedy propustný směr.

Statistické zpracování

Chybu veličiny $u = f(x_i)$ počítáme ze vztahu

$$\delta_u = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \delta_{x_i} \right)^2},$$

kde x_i jsou nezávislé veličiny a δ_{x_i} jejich chyby.

Při fitování vztahu na naměřená data používáme program *Gnuplot*. Ten aplikuje metodu nejmenších čtverců. V případě lineárního fitování jsou parametry dopočítány algebraicky, v případě nelineárního iterativně. Chyby parametrů fitování mají stejné vlastnosti jako standardní směrodatné odchylky.

Výsledky měření

Teplota vzduchu během celého experimentu byla $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$. Pro měření napětí jsme používali analogový voltmetr třídy přesnosti 0.5 se 120-dílkovou stupnicí a digitální přístroj s přesností $0.8\% + 2 \text{ dig}$. Pro měření proudu jsme používali analogový ampérmetr třídy přesnosti 0.5 se 120-dílkovou stupnicí, digitální přístroj s přesností $1.2\% + 2 \text{ dig}$ a analogový mikroampérmetr třídy přesnosti 1 se 100-dílkovou stupnicí. Chyby všech naměřených hodnot plynou pouze z těchto uvedených chyb měřidel.

Měření charakteristik obou diod bod po bodu zachycuje Tabulka 1. Při měření obou diod jsme pro propustný směr použili zapojení (b), pro závěrný směr u vakuové diody zapojení (a). Při měření závěrného směru Zenerovy diody jsme začali se zapojením (a) a přestali tehdy, když se při změně rozsahu ampérmetru změnil při daném napětí proud dvojnásobně. Změnili jsme zapojení na (b), vrátili se s napětím o 0.3 V zpět a pokračovali dále. Získané dvě sady hodnot jsme potom napojili tak, aby byla závislost spojitá. Do -6.06 V jsou tak hodnoty ze zapojení (a), od -6.51 V ze zapojení (b) a mezi nimi jsou hodnoty z obou zapojení.

Charakteristika vakuové diody je na Obrázku 3, kde jsme data proložili vztahem (2). Pro fitování jsme použili hodnoty od 13 V výše, protože (2) je přibližný vztah platný spíše pro vyšší napětí. Charakteristika Zenerovy diody je na Obrázku 4. Z proložení Zenerovy oblasti funkcí $A(B+U)$ dostaneme $A = (4.1 \pm 0.4) \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$, $B = (6.69 \pm 0.01) \text{ V}$, z čehož podle vztahu (1) $r = 1/A$, takže

$$r(-400 \text{ mA}) = (0.24 \pm 0.03) \Omega,$$

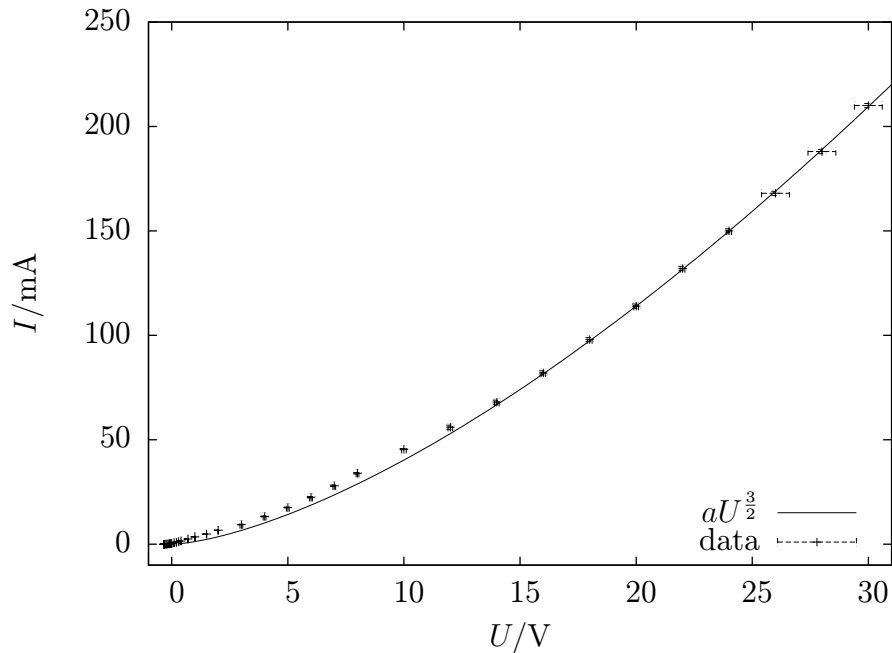
Ze stejného proložení můžeme získat i Zenerovo napětí $U = I/A - B$, takže

$$U(-400 \text{ mA}) = (-6.79 \pm 0.02) \text{ V}.$$

Na Obrázku 5 je zobrazena propustná oblast charakteristiky Zenerovy diody v logaritmické škále. Vidíme, že exponenciální závislost platí dobře, ale až od asi

Vakuová dioda EZ 81		Zenerova dioda KZ 703	
U/V	I/mA	U/V	I/mA
-0.350 ± 0.006	0.00 ± 0.02	-6.84 ± 0.07	-640 ± 6
-0.320 ± 0.006	0.02 ± 0.02	-6.79 ± 0.07	-440 ± 6
-0.300 ± 0.006	0.04 ± 0.02	-6.75 ± 0.07	-220 ± 1
-0.250 ± 0.006	0.06 ± 0.02	-6.70 ± 0.07	-84 ± 1
-0.200 ± 0.006	0.10 ± 0.02	-6.67 ± 0.07	-38.5 ± 0.3
-0.150 ± 0.006	0.16 ± 0.02	-6.65 ± 0.07	-21.6 ± 0.1
-0.100 ± 0.006	0.24 ± 0.02	-6.62 ± 0.07	-10.2 ± 0.1
-0.050 ± 0.006	0.32 ± 0.02	-6.57 ± 0.07	-2.40 ± 0.03
0.000 ± 0.006	0.42 ± 0.03	-6.51 ± 0.07	-1.20 ± 0.03
0.100 ± 0.006	0.68 ± 0.03	-6.45 ± 0.07	-0.75 ± 0.03
0.200 ± 0.006	0.98 ± 0.03	-6.37 ± 0.07	-0.65 ± 0.03
0.300 ± 0.006	1.26 ± 0.04	-6.06 ± 0.07	-0.250 ± 0.005
0.400 ± 0.006	1.58 ± 0.04	-5.50 ± 0.06	-0.088 ± 0.001
0.700 ± 0.006	2.52 ± 0.05	-5.00 ± 0.06	-0.057 ± 0.001
1.000 ± 0.006	3.56 ± 0.06	-4.00 ± 0.06	-0.0220 ± 0.0005
1.50 ± 0.01	4.86 ± 0.08	-3.00 ± 0.06	-0.0080 ± 0.0005
2.00 ± 0.01	6.7 ± 0.1	-2.00 ± 0.06	-0.0020 ± 0.0005
3.00 ± 0.06	9.4 ± 0.1	-1.00 ± 0.06	-0.0005 ± 0.0005
4.00 ± 0.06	13.3 ± 0.2	0.000 ± 0.006	0.00 ± 0.02
5.00 ± 0.06	17.6 ± 0.2	0.100 ± 0.006	0.06 ± 0.02
6.00 ± 0.06	22.5 ± 0.3	0.200 ± 0.006	0.14 ± 0.02
7.00 ± 0.06	28.0 ± 0.4	0.300 ± 0.006	0.24 ± 0.02
8.00 ± 0.06	34.0 ± 0.4	0.400 ± 0.006	0.34 ± 0.02
10.0 ± 0.1	45.5 ± 0.3	0.500 ± 0.006	0.54 ± 0.03
12.0 ± 0.1	56 ± 1	0.530 ± 0.006	0.74 ± 0.03
14.0 ± 0.1	68 ± 1	0.570 ± 0.006	1.18 ± 0.03
16.0 ± 0.1	82 ± 1	0.600 ± 0.006	2.56 ± 0.05
18.0 ± 0.1	98 ± 1	0.630 ± 0.006	5.48 ± 0.09
20.0 ± 0.1	114 ± 1	0.660 ± 0.006	11.2 ± 0.2
22.0 ± 0.1	132 ± 1	0.680 ± 0.006	17.6 ± 0.2
24.0 ± 0.1	150 ± 1	0.700 ± 0.006	35.0 ± 0.4
26.0 ± 0.6	168 ± 1	0.730 ± 0.006	102 ± 1
28.0 ± 0.6	188 ± 1	0.760 ± 0.006	234 ± 1
30.0 ± 0.6	210 ± 1	0.770 ± 0.006	340 ± 6
		0.800 ± 0.006	650 ± 6

Tabulka 1: Měření charakteristik diod



Obrázek 3: Charakteristika vakuové diody

0.55 V. Tuto oblast jsme proložili funkcí $A \exp(BU)$, která je v grafu vynesena též. Ze vztahu (1) je potom $r = 1/B I$. Z fitu jsme získali $B = (29.3 \pm 0.7) \text{ V}^{-1}$, takže

$$r(200 \text{ mA}) = (0.171 \pm 0.004) \Omega.$$

V Obrázku 4 je zanesena též zátěžová přímky podle (4) pro $I_S = 400 \text{ mA}$. Vhodný odpor R_S dostaneme právě z rovnice přímky jako

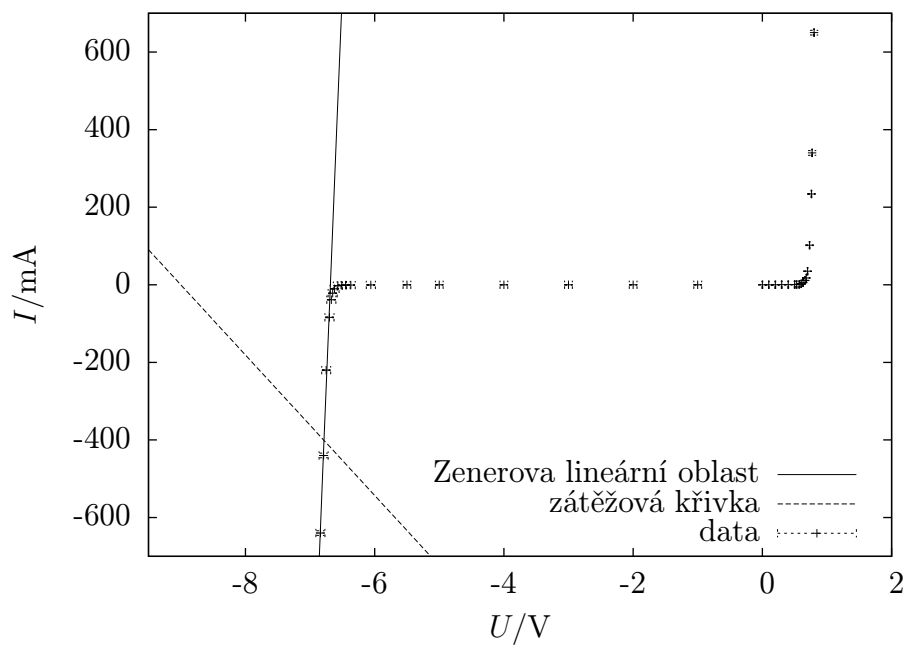
$$R_S = -\frac{U_1 + U}{I_S} = 5.53 \Omega.$$

Sestavili jsme stabilizační obvod na Obrázku 1 s $R_S = (5.50 \pm 0.01) \Omega$. Měření závislosti výstupního na vstupním napětí ukazuje Tabulka 2, graficky Obrázek 6. Vidíme, že za průrazným napětím už roste výstupní napětí mnohem pomaleji než vstupní. V této oblasti jsme daty proložili funkcí $A + Bx$, $A = (6.46 \pm 0.02) \text{ V}$, $B = 0.038 \pm 0.002$, z čehož podle vztahu (3) $S = A/BU_1 + 1$, takže

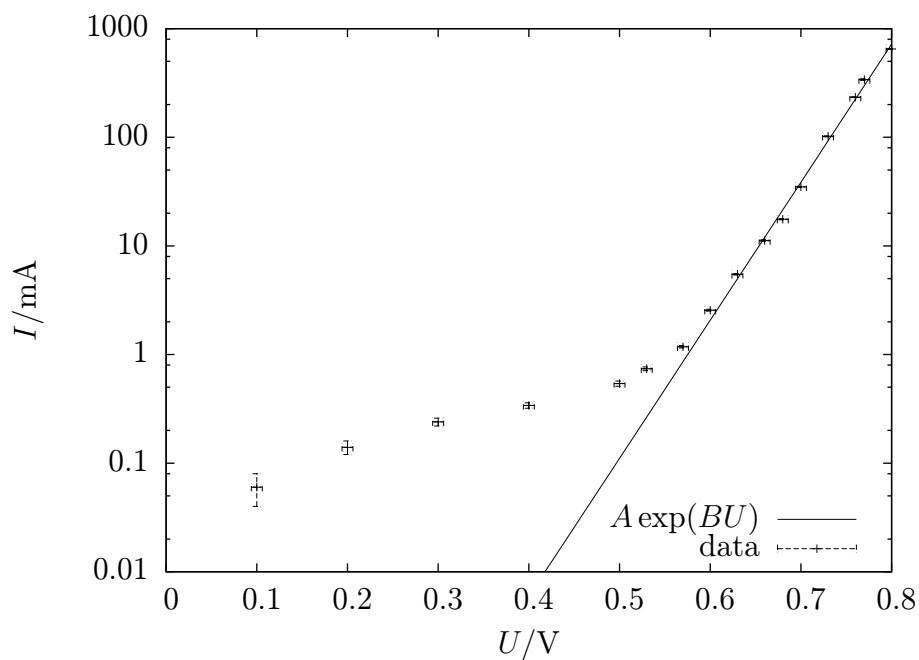
$$S(9 \text{ V}) = 20 \pm 1.$$

Diskuse výsledků

Z naměřené charakteristiky vakuové diody vidíme, že třípolovinový zákon je pro větší napětí splněn velmi dobře. Pro menší napětí je závislost mírně odchýlená,



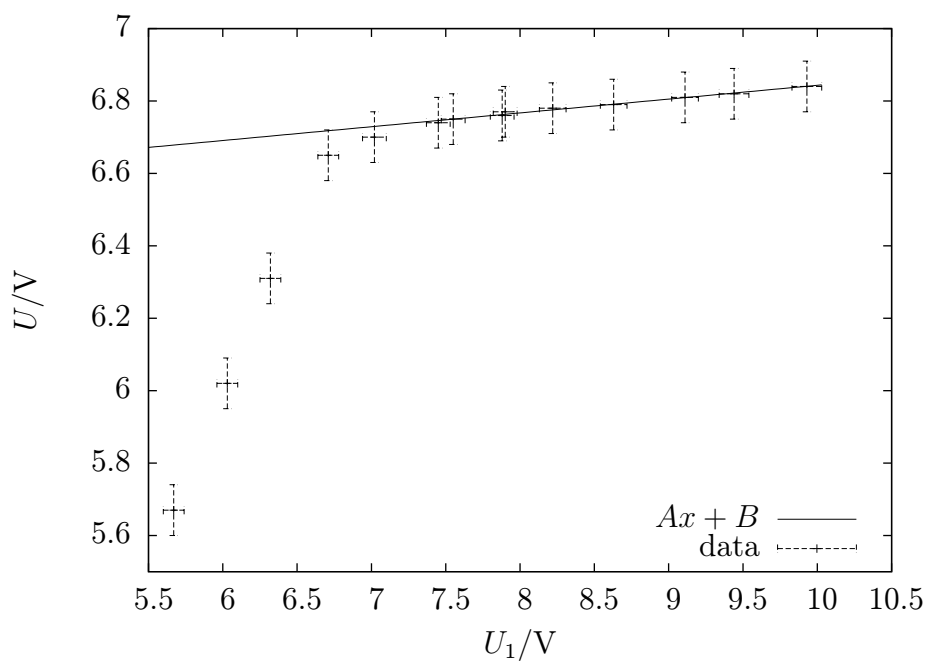
Obrázek 4: Charakteristika Zenerovy diody



Obrázek 5: Zenerova dioda v propustném směru

U_1/V	U_1/V
5.67 ± 0.07	5.67 ± 0.07
6.03 ± 0.07	6.02 ± 0.07
6.32 ± 0.07	6.31 ± 0.07
6.71 ± 0.07	6.65 ± 0.07
7.02 ± 0.08	6.70 ± 0.07
7.45 ± 0.08	6.74 ± 0.07
7.55 ± 0.08	6.75 ± 0.07
7.88 ± 0.08	6.76 ± 0.07
7.90 ± 0.08	6.77 ± 0.07
8.22 ± 0.09	6.78 ± 0.07
8.63 ± 0.09	6.79 ± 0.07
9.11 ± 0.09	6.81 ± 0.07
9.44 ± 0.10	6.82 ± 0.07
9.93 ± 0.10	6.84 ± 0.07

Tabulka 2: Měření stabilizačního obvodu



Obrázek 6: Chování stabilizačního obvodu

pro napětí blízká nule je zcela špatně. To je očekávatelné už z toho, že třípolovinný vztah předpovídá při nulovém napětí nulový proud, což je v rozporu s teorií i naměřenými daty.

Zajímavá je propustná oblast Zenerovy diody. Teoretická exponenciální závislost by měla být velmi přesná a pro napětí vyšší než 0.55 V skutečně je. Pro nižší je závislost spíše lineární, čemuž odpovídá logaritmický vývoj na logaritmické škále. Dioda má v oblasti do 0.4 V přibližně konstantní odpor 1200 Ω. Z toho vidíme, že tuto oblast lze změřit velmi obtížně, protože tento odpor řádově odpovídá vnitřním odporům voltmetrů i mikroampérmetrů, takže měřící zapojení (a) i (b) dává systematickou chybu. Tuto úzkou oblast by tak bylo vhodné proměřit např. substituční metodou.

Podobně je napojení dat získaných v zapojení (a) a (b) v oblasti průrazného napětí ne zcela korektní, protože v této oblasti nastává stejný problém zmíněný v předchozím odstavci. Skutečná charakteristika by tak v místě průrazu měla mnohem ostřejší přechod, systematická chyba vnesená měřícími přístroji tento jev vyhlazuje. Teoretická linearita v Zenerově oblasti se velmi dobře potvrdila.

Ověřili jsme chování stabilizačního obvodu. Ze závislosti $U(U_1)$ vidíme, že bychom s úspěchem využili voltmetry schopné měřit na čtyři platné číslice. Také dobře vidíme, že chyba použitých voltmetrů je systematická, nikoli náhodná.

Závěr

Naměřili jsme charakteristiky vakuové diody EZ 81 (Obrázek 3) a Zenerovy diody KZ 703 (Obrázek 4) bod po bodu. Naměřené závislosti odpovídají až na menší odchylky uvedené v Diskuzi očekávaným.

Určili jsme dynamický vnitřní odpor Zenerovy diody při dvou proudech

$$r(-400 \text{ mA}) = (0.24 \pm 0.03) \Omega, \quad r(200 \text{ mA}) = (0.171 \pm 0.004) \Omega.$$

Určili jsme Zenerovo napětí při závěrném proudu 400 mA

$$U(-400 \text{ mA}) = (-6.79 \pm 0.02) \text{ V}.$$

Dále jsme pro tento proud vynesli do Obrázku 4 zátěžovou přímkou pro vstupní napětí 9 V.

Z měření stabilizačního obvodu jsme určili stabilizační činitel

$$S(9 \text{ V}) = 20 \pm 1.$$

Reference

- [1] Bakule, R. – Šternberk, J. *Fyzikální praktikum II. Elektřina a magnetismus*. Státní pedagogické nakladatelství. Praha.