

**Úloha**

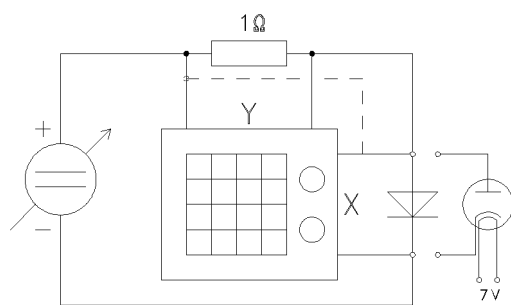
1. Zmerajte charakteristiky kremíkovej (KY 721) a vákuovej (EZ 81) diódy pomocou zapisovača 4106.
2. Zmerajte charakteristiky Zenerovej diódy (KZ 703) bod po bode.
3. Určte jej dynamický vnútorný odpor v priepustnom smere pri prúde 200 mA a v závernom smere pre prúd 400 mA.
4. Určte odpovedajúce Zenerovo napätie pri tomto prúde.
5. Pre tento prúd (zapažovací bod) zakreslite do grafu zapažovacu priamku pre napätie zdroja  $U_1 = 9\text{ V}$ .
6. Určte odpovedajúci stabilizačný činiteľ.

**Teória**

Diódy sa používajú najmä na usmerňovanie prúdu. Vo vákuovej dióde sa využíva termoemisía elektrónov z katódy, ktoré sú následne urýchľované priloženým elektrickým napätím. Vďaka termoemisii sa dá vysvetliť malý nenulový prúd medzi elektródami aj pri nulovom priloženom napätí. Výhodou vákuových diód je možnosť dosiahnutia vysokého inverzného napätia, pri ktorom ešte nedochádza k prierazu. Nevýhodou je vyšší odpor a spotreba elektrického prúdu na žeravenie. Polovodičové diódy využívajú usmerňovacie vlastnosti PN prechodu v polovodičoch - vysoký priestorový náboj a malá koncentrácia minoritných nosičov náboja. Vhodným usporiadaním možno dosiahnuť záverné napätie rádovo 1000 V. Úmyselným ztenšením PN priechodu naopak možno dosiahnuť zníženie prierazného napätia v závernom smere až na hodnoty rádu voltov. Pieraz sa uskutočňuje nasledujúcimi mechanizmami:

1. Zenerov jav (do 6 V) - elektróny tunelujú z valenčného pásu (v P) do vodivostného pásu (v N) v oblasti PN prechodu.
2. lavínový jav - minoritné nosiče náboja urýchlené elektrickým poľom (vysokej hodnoty kvôli nízkej hrúbke PN prechodu) vyraďajú v oblasti PN prechodu nové nosiče náboja.

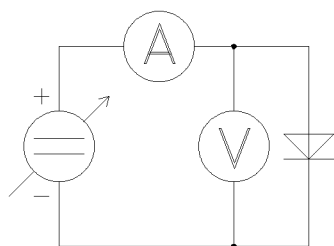
K prierazu dochádza v pomerne úzkom intervale napätia, čo sa využíva na stabilizáciu napätia.



Obr. 1: Meranie so zapisovačom

Charakteristiku kremíkovej diódy KY721 a vákuovej diódy EZ 81 som meral pomocou zapisovača 4106, ktorý fungoval v oboch osiach ako voltmeter, preto som v osi Y zapojil referenčný odpor  $1\ \Omega$ , teda napätie na zapisovači vo voltoch odpovedalo prúdu v ampéroch. Vnútorný odpor prístroja bol asi  $100\text{ k}\Omega$ , preto pri meraní pri inverznom napätí na vákuovej dióde som použil čiarkované zapojenie osi X (obr. 1), čím som zabránil meraniu prúdu (na osi Y) pretekajúceho voltmetrom (na osi X).

Závernu charakteristiku polovodičovej diódy som nemeral, lebo už pri orientačnom meraní digitálnym ampérmetrom prechádzal pri napätí  $-25\text{ V}$  diódou prúd zhruba  $-10\text{ nA}$ . (Najcitlivejší rozsah zapisovača bol  $100\ \mu\text{V}/\text{cm}$ , teda  $100\ \mu\text{A}/\text{cm}$ .)



Obr. 2: Meranie bod po bode

Dynamický vnútorný odpor možno určiť zo smernice voltampérovej charakteristiky v danom bode  $R_d = \frac{dU_d}{dI_d}$ , kde  $U_d$  je napätie na dióde a  $I_d$  je prúd diódou. Dynamický vnútorný odpor možno priamo zistiť preložením priamky niekoľkými bodmi z okolia skúmaného bodu (voltampérová charakteristika sa príliš prudko mení a navyše nemám dostatok hodnôt na preloženie inou krivkou):

$$I_d = \frac{1}{R_d} \cdot (U_d - U_{d,0}) + I_{d,0} \quad (1)$$

kde  $U_{d,0}, R_d$  sú neznáme parametre a  $I_{d,0}$  prúd, pri ktorom určujem odpor. V prípade grafu v závernom smere  $U_{d,0}$  predstavuje Zenerovo napätie pri zvolenom prúde  $I_{d,0}$ .

Zaťažovacia priamka (2) je závislosť napätia zdroja  $U_o$  (zloženého z ideálneho zdroja napätia  $U_1$  a sériovo pripojeného odporu  $R_s$ ) na odoberanom prúde  $I_o$ .

$$U_o = U_1 - R_s \cdot I_o \quad (2)$$

V mojom prípade (úloha 5) mám zadané  $U_1$  a bod  $U_o = -U_{d,0}$ ,  $I_o = -I_{d,0}$  z predchádzajúcej úlohy.

Stabilizačný činiteľ je podiel relatívnej zmeny napätia na vstupe k relatívnej zmene napätia na výstupe [1]. Pre daný obvod (s pripojenou Zenerovou diódou a bez ďalšej záťaže) sa vypočíta:

$$S_u = \frac{U_o}{U_1} \cdot \frac{\Delta U_1}{\Delta U_o} = \frac{U_o}{U_1} \cdot \frac{(R_s + R_d)\Delta I}{R_d \Delta I} = \frac{(-U_{d,0}) \cdot (R_s + R_d)}{U_1 \cdot R_d} \quad (3)$$

## Meranie

Použil som mikroampérmeter triedy presnosti 1 s rozsahmi 50, 100, 500  $\mu A$ , ampérmeter triedy presnosti 0.5 s rozsahmi 0,006; 0,024; 0,06; 0,24 a 1,2 A a digitálny voltmeter. U digitálneho voltmetra predpokladám triedu presnosti aspoň 0.1 podľa počtu desatinných miest (použil som rozsahy 2 V a 20 V), a jeho chybu nebudem ďalej uvažovať. V tabuľke 1 a grafoch 1, 2 (chyby som kvôli prehľadnosti nevynášal) je uvedená voltampérová charakteristika nameraná pre Zenerovu diódu KZ 703. Čísla v zátvorkách uvádzajú chybu na poslednom desatinnom mieste.

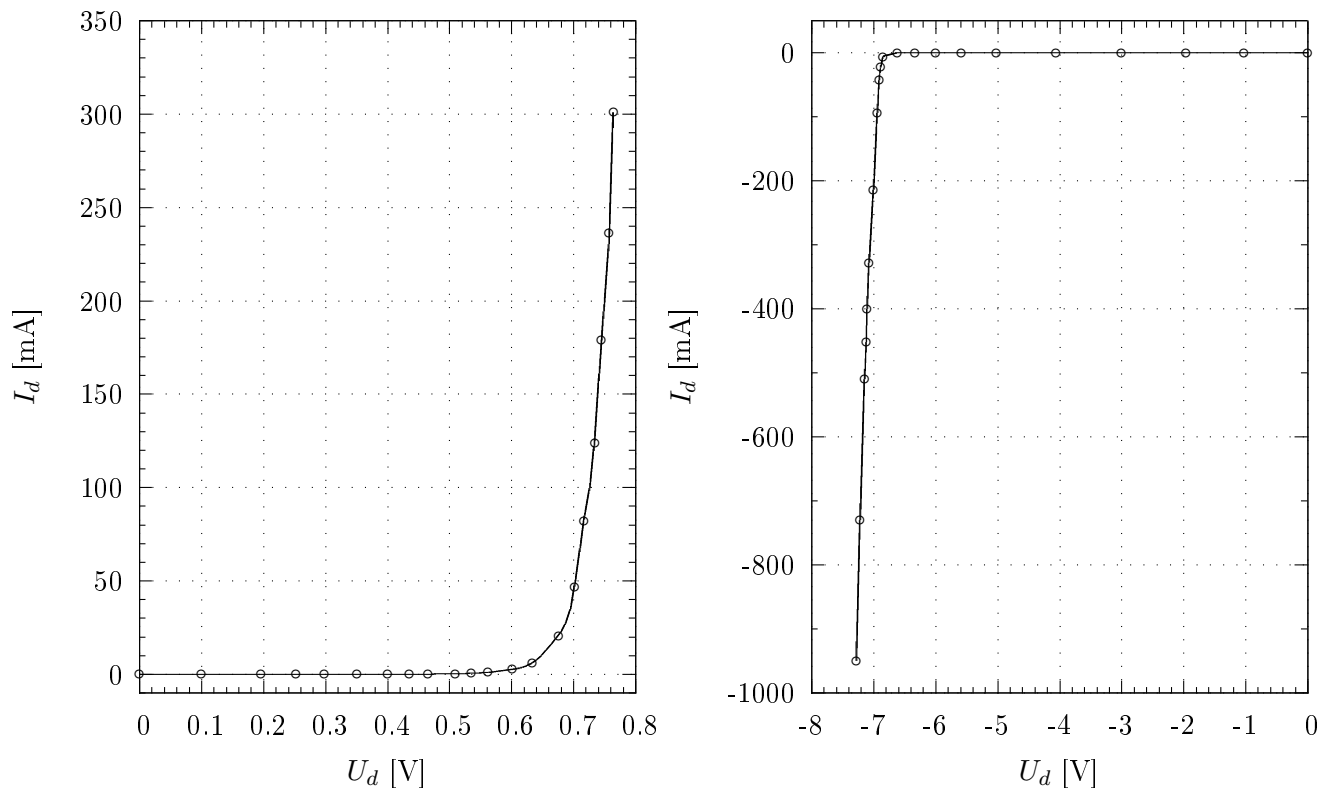
Niekoľko blízkych bodov okolo požadovaných hodnôt prúdu, ktoré sa zdali byť v lineárnej závislosti som preložil priamkou (1) v grafoch 3, 4.

Pri meraní Zenerovej diódy KZ 703 som postupoval bod po bode s pomocou ručičkového ampérmetra a digitálneho voltmetra. Digitálny voltmeter mal vnútorný odpor 20 M $\Omega$  (t.j. 0,05  $\mu A/V$ ) a neovplyvnil meranie pri zapojení podľa obrázka 2 ani v závernom smere (kedy bola dióda zapojená s opačnou polaritou ako na obrázku).

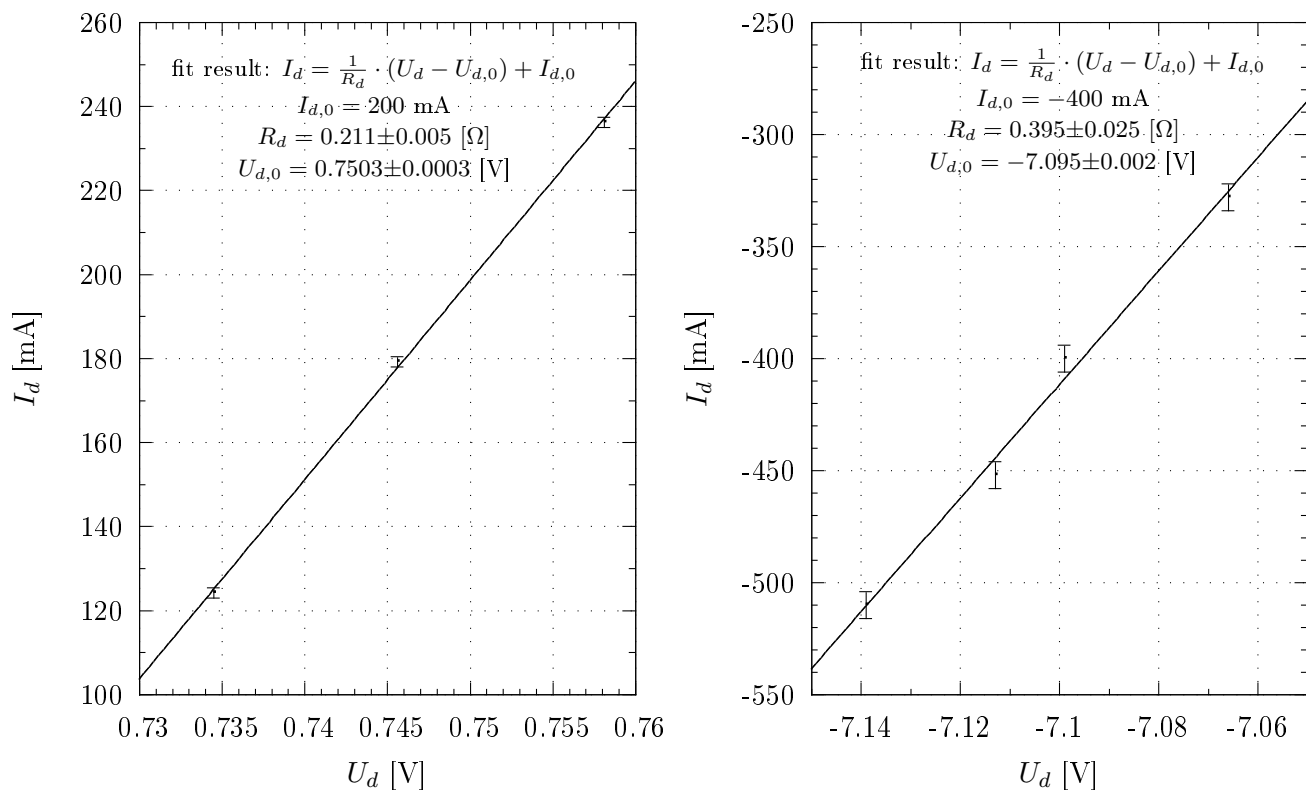
$U_d$ [V]	$I_d$ [mA]	$U_d$ [V]	$I_d$ [mA]
0,0000	0,0000(5)	0,000	0,0000(5)
0,1000	0,0000(5)	-1,018	-0,0001(5)
0,1957	0,0003(5)	-1,961	-0,0006(5)
0,2528	0,0010(5)	-3,003	-0,0019(5)
0,2986	0,0026(5)	-4,054	-0,0060(5)
0,3508	0,0080(5)	-5,012	-0,0191(5)
0,4000	0,0229(5)	-5,586	-0,0463(5)
0,4354	0,0500(5)	-5,994	-0,0990(10)
0,4658	0,0983(10)	-6,332	-0,211(5)
0,5103	0,272(5)	-6,614	-0,485(5)
0,5358	0,497(5)	-6,845	-5,90(3)
0,5627	0,97(3)	-6,885	-23,40(12)
0,6016	2,67(3)	-6,907	-42,7(3)
0,6337	5,96(3)	-6,938	-94,4(12)
0,6757	20,56(12)	-6,995	-214,4(12)
0,7023	46,6(3)	-7,066	-328(6)
0,7172	82,2(12)	-7,099	-400(6)
0,7345	124,2(12)	-7,113	-452(6)
0,7456	179,2(12)	-7,139	-510(6)
0,7581	236,2(12)	-7,212	-730(6)
0,7650	301(6)	-7,281	-950(6)

Tabuľka 1: V-A charakteristika KZ 703

Graf 1, 2: Voltampérová charakteristika KZ 703



Graf 3, 4: Určenie dynamického odporu KZ 703



Graf 5: Zatažovacia priamka pre KZ 703

Na nakreslenie zatažovacej priamky potrebujem vypočítať hodnotu  $R_s$  podľa (2):

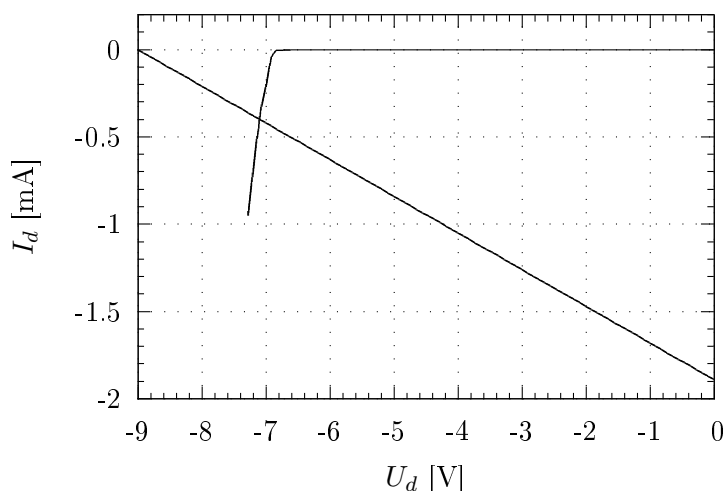
$$R_s = \frac{9-7,095}{0,4} = 4,76 \, \Omega$$

Zatažovacia priamka je potom

$$I_d = \frac{-9-U_d}{4,76}.$$

Stabilizačný činiteľ je:

$$S_u = \frac{7,095 \cdot (4,76 + 0,395)}{9 \cdot 0,395} = 10,3 \pm 0,7$$



Kremíková dióda KY 721 bola meraná na zapisovači v priepustnom smere s rozsahmi X: 200 mV/cm, Y: 50 mA/cm. Vákuová dióda EZ 81 bola meraná v kladnom napätí s rozsahmi X: 2 V/cm, Y: 10 mA/cm a v inverznom napätí s rozsahmi X: 200 mV/cm, Y: 0,2 mA/cm. Výsledky sú na priloženom grafe.

## Diskusia

Použité meracie prístroje boli pomerne presné, napriek tomu však sú na grafoch viditeľné odchýlky, čo je spôsobené veľmi strmými závislosťami. Presnosť merania Zenerovej diódy v závernom smere bola značne obmedzená vysokým stratovým výkonom a zahrievaním diódy, čo zrejme spôsobilo odchýlky na grafe 4. Väčší počet meraní a preloženie závislosti lepšou krivkou (napr. kvadratickou) by preto zrejme nevedli k výraznému zlepšeniu presnosti určenia  $R_d$  (chyba tohto parametra najviac prispievala k nepresnosti určenia  $S_p$ ). Odhad chyby Zenerovho napätia som so zarátaním pravdepodobnej presnosti voltmetra zväčšil na 0,01 V.

Získané výsledky dávajú pomerne dobrú predstavu o parametroch meraných súčiastok pre ďalšie použitie v elektrických obvodoch. Diskutovaný stabilizátor so Zenerovou diódou nie je príliš účinný a má vysoký stratový výkon, pomohlo by použitie tranzistora.

Grafy zo zapisovača mali očakávané priebehy, v kladnom smere vákuovej diódy sa však objavil „hrb“, ktorý mal zrejme mechanický dôvod, pretože pri návrate hrotu (v zdvihnutej polohe - nezapisovalo sa) sa už neobjavil.

## Záver

Voltampérové charakteristiky diód KY 721 a EZ 81 sú na priloženom milimetrovom papieri. Zenerova dióda KZ 703 mala dynamický vnútorný odpor  $(0,211 \pm 0,005) \, \Omega$  pri 200 mA a  $(0,40 \pm 0,03) \, \Omega$  pri -400 mA. Zenerovo napätie pri -400 mA bolo  $(7,10 \pm 0,01) \, \text{V}$ . Stabilizačný činiteľ pre zdroj s napätím na prázdno 9 V bol  $10,3 \pm 0,7$ .

## Literatúra

[1] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II. SPN, Praha 1989