

Kabinet výuky obecné fyziky MFF UK  
**Fyzikální praktikum II.**

Úloha č.: 11

**Název.:** Charakteristiky diod.....

**Měřil.:**.....*Michal Švanda*..... dne: ..23října 2000.....

odevzdal dne:..... vráceno:.....

odevzdal dne:..... vráceno:.....

odevzdal dne:.....

---

**Posuzoval:**..... dne:.....

**Výsledek klasifikace:**.....

---

Připomínky:

## Pracovní úkol

1. Změřte charakteristiky křemíkové (KY 721) a vakuové (EZ 81) diody pomocí zapisovače 4106.
2. Změřte charakteristiky Zenerovy diody (KZ 703) bod po bodu.
3. Určete její dynamický vnitřní odpor v propustném směru při proudu 200 mA a v závěrném směru pro proud 400 mA.
4. Určete odpovídající Zenerovo napětí při tomto proudu.
5. Pro tento proud (pracovní bod) zakreslete do grafu zatěžovací přímku pro napětí zdroje  $U_1 = 9 \text{ V}$ .
6. Určete odpovídající stabilizační činitel.

## Teoretický úvod

### Křemíková dioda

Čistý polovodič se chová jako lineární prvek. Jeho odpor není závislý na velikosti ani polaritě napětí. Vhodnou technologií výroby lze ale dosáhnout toho, že se uvnitř polovodiče utvoří dvě oblasti s různými typy vodivosti. V jedné z nich je vodivost typu  $N$ , tedy vodivost způsobená elektrony, zatímco v druhé z nich je vodivost typu  $P$ , tedy vodivost děrová. Pokud na sebe uvedené oblasti přímo navazují, mluvíme o  $PN$  přechodu. Voltampérová charakteristika takového přechodu je nesouměrná. Je-li k vrstvě  $P$  přiložen kladný pól zdroje a k vrstvě  $N$  záporný, je odpor polovodiče malý a polovodičem protéká proud; polovodič je zapojen v *propustném směru*. Přehodíme-li polaritu zdroje, vzroste odpor  $PN$  přechodu o několik řádů; polovodič je zapojen v *závěrném směru*.

Polovodičové diody se používají především jako usměrňovače střídavého proudu. Usměrňovací schopnosti charakterizuje usměrňovací poměr  $\eta$ , který je dán vzorcem:

$$\eta = \frac{I_p}{I_z}, \quad [\text{R1}]$$

kde  $I_p$  je proud v propustném a  $I_z$  proud v závěrném směru při stejné absolutní hodnotě napětí.

### Vakuová dioda

je tvořena baňkou, ve které jsou umístěny dvě elektrody, katoda a anoda. Elektronka je vakuována, takže zbytkový plyn neovlivňuje pohyb elektronů. Zdrojem elektronů je vrstva obsahující oxidy bária, stroncia nebo vápníku, která je pak žhavena a emituje elektrony podle *Richardson-Dushmanova zákona* (viz [L1]). Pokud není mezi anodou a katodou elektrické pole, nestačí všechny elektrony emitované z katody přejít na anodu. V okolí katody se vytvoří záporný prostorový náboj. Na anodu se dostanou jen ty elektrony, které mají dostatečnou rychlost k překonání potenciálové bariéry. Je-li vně propojena katoda s anodou, teče mezi katodou a anodou nepatrný proud. Při záporném napětí na anodě vůči katodě se tento proud zmenšuje a při napětí kolem 1 V už je neměřitelný. V opačném směru dochází k odsávání

elektronů elektronů k anodě a proud se zvětšuje. Vakuové diody se používají k usměrňování proudu ve vysokonapěťových obvodech.

### Zenerova dioda

Zenerova dioda je polovodičová dioda, v níž dochází k elektrickému průrazu přechodu PN zapojenému v záporném směru, při kterém ještě nedojde ke zničení přechodu PN.

K průrazu dochází buď mechanismem *Zenerova jevu* (vnitřní emise vyvolaná vnějším polem) nebo *lavinového násobení nositelů v oblasti přechodu*. Diody, u kterých se projevuje převážně Zenerův jev, mají záporný teplotní součinitel průrazného napětí, diody, u kterých dochází k Zenerovu průrazu mají kladný teplotní součinitel průrazného napětí.

Podle polarity zdroje a fyzikálních podmínek lze voltampérovou charakteristiku Zenerovy diody rozdělit na tři oblasti - na oblast *propustnou*, *závěrnou* a *průraznou*. Charakteristiku Zenerovy diody zobrazuje obr. 6.

Propustná část je podobná propustné části běžné usměrňovací diody. V závěrné části má dioda značný vnitřní odpor. Diodou teče nepatrný závěrný proud. Při překročení závěrného napětí nad velikost tzn. *Zenerova napětí* začne dioda náhle propouštět proud. její odpor klesne až o šest řádů. Zenerovo napětí se udává pro pracovní bod doporučený výrobcem. Poloha pracovního bodu se předepisuje pomocí proudu  $I_z$  z rozmezí  $0,2 I_{zm}$  do  $I_{zm}$  tak, aby ležel v lineární části průrazné oblasti. Proud  $I_{zm}$  je určen maximálním ztrátovým výkonem (daným výrobcem) a je přibližně roven:

$$I_{zm} = \frac{P_{zm}}{U_z}. \quad [R2]$$

Zenerovy diody se používají jako stabilizační prvky v obvodech. Takový stabilizační obvod je načrtnutý například na obr. 5. Jako stabilizátor bude obvod pracovat v následujících případech: 1) vstupní napětí  $U_1$  je větší než Zenerovo napětí  $U_z$ ; 2) odpor  $R_s$  je zvolen tak, aby zatěžovací přímka protínala charakteristiku v průrazné oblasti. Pak zvětší-li se vstupní napětí  $\Delta U_1$ , posune se natěžovací přímka a napětí na diodě vzroste jen o mnohem menší hodnotu.

Vlastnosti stabilizačního obvodu pak popisují dvě veličiny:

- 1) *stabilizační činitel*  $S_U$ , který je dán vzorcem:

$$S_U = \frac{U_0 \Delta U_1}{U_1 \Delta U_0} \quad [R3]$$

- 2) *vnitřním odporem*  $r_i$ , daným vzorcem:

$$r_i = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} \quad [R4]$$

Protože změnu napětí zdroje lze vyjádřit přes změnu proudu, můžeme pro stabilizační činitel psát vztah:

$$S_U = \frac{U_0(R_S+r_i)\Delta I}{U_1 r_i \Delta I} = \frac{U_{z0}(R_S+r_i)}{U_1 r_i} \quad [R5]$$

### Měření voltampérové charakteristiky

Voltampérové charakteristiky diod můžeme měřit například bod po bodu voltmetrem a amérmetrem. Protože však mají diody v jednotlivých částech charakteristiky různé vnitřní odpory, nelze v jednom zapojení měřit celou charakteristiku.

V závěrném směru měříme charakteristiku podle zapojení na *obr. 1*. Statický odpor diody je v této oblasti velký, takže kdyby byl voltmetr zařazen až za ampérmetr, měřili bychom pak proud voltmetrem a ne diodou. Odpor  $R$  zapojujeme do obvodu při proměřování Zenerovy diody, aby se tak zabránilo poškození ampérmetru při přechodu ze závěrné do průrazné oblasti. V průrazné oblasti musíme změnit rozsah ampérmetru o několik řádů a zařadit voltmetr až za ampérmetr (podle *obr. 2*), abychom měřili napětí na diodě. Kromě toho zmenšíme odpor  $R$ .

V propustném směru měříme voltampérovou charakteristiku v zapojení podle *obr. 3*.

Voltampérovou charakteristiku můžeme také měřit souřadnicovým zapisovačem. Zapisovač má dva nezávislé napěťové vstupy, které mohou zařízením pohybovat v dvou na sebe kolmých směrech. Problematika je stejná jako metodou měření bod po bodu. Vyhneme se však hrubým chybám při odečítání hodnot a jejich vynášením zpět do grafu. Protože oba vstupy jsou napěťové, převedeme měření proudu na měření napětí na odporu o známé hodnotě. Zapojení schématu podle *obr. 4*.

## Výsledky měření

**1)** Pomocí elektronického zapisovače jsem zobrazil voltampérovou charakteristiku křemíkové diody KY721 a vakuové EZ81. Obě charakteristiky shrnuje graf [G1]. Z naměřených charakteristik je vidět, že ani jedna z diod nevede proud v závěrném směru. Zajímavý je jev na vakuové diodě při velmi malém závěrném napětí (*křivka 3 v grafu*), kdy dioda přesto vede velmi malý proud. Tento jev odpovídá naší představě o funkci vakuové elektronky a je vysvětlen v části "Teoretický úvod".

**2)** Bod po bodu jsem pomocí schémat na obrázcích 1, 2 a 3 jsem proměřoval voltampérovou charakteristiku bod po bodu. Měření shrnuje tabulka [T1]. Takto vzniklá charakteristika je pak zobrazena na grafu [G2].

**3)** Dynamický vnitřní odpor jsem určil pro daný proud tak, že jsem změřil několik hodnot proudu a napětí kolem této hodnoty a dynamický vnitřní odpor určil lineární regresí. Pro proud  $I=200 \text{ mA}$  v propustné oblasti jsem stanovil dynamický vnitřní odpor  $r_i=(0,58\pm 0,02) \Omega$ , pro proud  $I=400 \text{ mA}$  v závěrné oblasti pak  $r_i=(0,13\pm 0,02) \Omega$ .

Obě měření shrnuje tabulka [T2].

**4)** Zenerovo napětí jsem určil jako průsečík tečny k voltampérové charakteristice v pracovním bodě. Provedl jsem lineární regresi programem Origin 5.0, která jako průsečík stanovila hodnotu  $U_z=(6,7\pm 0,2) \text{ V}$ .

**5** Pro napětí zdroje  $U_1=9\text{ V}$  jsem změřil napětí i proud na odporu a zanesl ji do grafu [G2]. Napětí na odporu činilo  $U=(6,9\pm 0,2)\text{ V}$  a proud obvodem  $I=(400\pm 12)\text{ mA}$ .

**6** Podle vzorce [R5] jsem určil stabilizační činitel pro tuto situaci, tedy s těmito hodnotami fyzikálních veličin:

$$U_{z0}=(6,7\pm 0,2)\text{ V}, R_s=4,6\ \Omega, r_i=(0,13\pm 0,02)\ \Omega, U_1=9\text{ V}.$$

Stabilizační činitel pak nabývá hodnoty:  $S_U=27,1\pm 0,8$

## Diskuse

Zjistil jsem, že tvary změřených voltampérových charakteristik různých typů diod souhlasí s teorií. Bohužel (již pohledem do grafu [G1]) již s teorií nesouhlasí vypočtené měřítko na osách  $Y$  (tedy na osách proudu). Teorie udává, že v případě vakuové elektronky by v závěrném směru měl proud při nulovém potenciálu být řádově  $10^{-4}$  až  $10^{-5}\text{ A}$ , zatímco odečtením z grafu dostaneme hodnoty o řád až dva větší. Pravděpodobně je to způsobeno našikovní volbou odporu, na němž se měří napětí a výpočtem pak převádí na proud procházející obvodem a tedy i diodou - byl nastaven na hodnotu  $0,1\ \Omega$ , ale pravděpodobně se stal jen dílčím odporem, který na odběr proudu přispívá jen malou měrou. Pravděpodobně mnohem větší odpor měly propojovací vodiče. Pokud by takto stanovený odpor činil řádově jednotky ohmů (což je pravděpodobné), již by zobrazené hodnoty odpovídaly teorii. Bylo by zřejmě šikovnější nastavit větší hodnotu odporu (např.  $100\ \Omega$ ; aby odpor vodičů byl vůči tomuto odporu zanedbatelný) a změnit pak napěťové konstanty na zapisovači.

Proměrování Zenerovy diody probíhalo podle teorie.

### Zdroje chyb

- při měření charakteristiky bod po bodu je pravděpodobně velkým zdrojem chyb přepínání rozsahů měřících přístrojů, kdy se díky změně vnitřního odporu změní odporové poměry v celém obvodě. Bohužel není možné proměřit celou charakteristiku (zejména v závěrném směru) na jeden rozsah.
- pro přesnější měření je nutné mít stabilizovaný zdroj stejnosměrného proudu. V případě mého měření bylo nutné ke zdroji ještě připojit paralelně kondenzátor a napětí tak vyhladit a zbavit pulsů, které jinak činily problém především při měření zapisovačem.

## Závěr

Pomocí experimentů jsem si ověřil teorii polovodičové vodivosti a základů nelineárních obvodů.

Voltampérové charakteristiky vakuové a křemíkové diody jsou zobrazeny zapisovačem na grafu [G1].

Pro Zenerovu diodu byly získány jejím proměřováním následující hodnoty:

Dynamický vnitřní odpor v propustném směru při 200 mA  $r_i=(0,58\pm0,02) \Omega$

Dynamický vnitřní odpor v závěrném směru při 400 mA  $r_i=(0,13\pm0,02) \Omega$

Zenerovo napětí  $U_z=(6,7\pm0,2) V$

Stabilizační činitel při napětí  $U_I=9 V$  v pracovním bodě  $S_U=27,1\pm0,8$

## Literatura

- [L1] Bakule,R. a Šterneberk, J. - Fyzikální praktikum II.
- [L2] Brož J. a kol. - Základy fyzikálních měření I.
- [L3] Mikulčák J. a kol. - Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro SŠ

### **Poznámka:**

Všechny chyby (není-li uvedeno jinak) použité a vypočtené v tomto protokolu jsou chybami na hladině  $\sigma$  (střední kvadratické odchylky). Chyby proudu a napětí jsou stanoveny jako chyby přístrojové, tedy na základě třídy přesnosti. Všechny přístroje, s nimiž jsem v tomto praktiku pracoval byly třídy přesnosti 2.

Křivky v grafech byly prokládány váženou regresí programem Origin 5.0.