

11. CHARAKTERISTIKY DIOD

Vakuová dioda

Vakuová dioda je tvořena baňkou, ve které jsou umístěny dvě elektrody, katoda a anoda. Elektronka je evakuována, takže střední volná dráha elektronů je větší než rozměry baňky a zbytkový plyn neovlivňuje pohyb elektronů. Anoda bývá válcovitého tvaru a obklopuje přímo nebo nepřímou žhavenou katodu. Zdrojem elektronů je vrstva obsahující kysličníky barya, stroncia nebo vápníku, která je u přímo žhavených katod nanášena na žhavicí vlákno, u nepřímých na kovový váleček, uvnitř kterého je zabudováno topné vlákno.

Velikost emisního proudu I z katody žhavené na teplotu T je dána Richardsonovým-Dushmanovým zákonem

$$I = AST^2 \exp\{-w_0/kT\}, \quad (1)$$

v němž A a w_0 jsou konstanty charakterizující emisní látku katody, S plocha katody a k Boltzmannova konstanta. Materiál pro emisní vrstvu se volí tak, aby výstupní práce w_0 byla co nejmenší.

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. Jeho působením se část elektronů vrací na katodu. Na anodu se dostanou pouze ty elektrony, které po emisi z vrstvy mají dostatečnou rychlost k překonání potenciálové bariéry prostorového náboje. Je-li vně elektronky anoda s katodou vodivě propojena, teče při nulovém potenciálním rozdílu mezi anodou a katodou nepatrný proud $\approx 10^{-5}$ až $\approx 10^{-4}$ A. Při záporném napětí na anodě vůči katodě se velikost tohoto proudu zmenšuje a při napětí $U_a = -0,5$ až 1 V je již neměřitelný.

Zvětšuje-li se napětí mezi anodou a katodou do kladných hodnot, odsávají se elektrony k anodě. Oblast prostorového náboje se zmenšuje a anodový proud vzrůstá.

Přibližně je možno popsat závislost anodového proudu I_a na anodovém napětí $U_a > 0$ vztahem

$$I_a = aU_a^{3/2}, \quad (2)$$

v němž a je konstanta závislá na geometrickém uspořádání elektrod. Podle vztahu (2) nazývaného Langmuirovým nebo třípolovinovým zákonem by se měl proud I_a zvětšovat při zvyšování anodového napětí až po hodnotu rovnou emisnímu proudu určenému vztahem (1). Další zvyšování napětí by nemělo mít vliv na vzrůst anodového proudu. Tato oblast voltampérové charakteristiky se nazývá oblast nasyceného proudu. Lze ji však dosáhnout pouze u elektronek s katodou z čistých kovů nebo thoriovaného wolframu. Tyto materiály se v současné době používají při výrobě katod jen výjimečně. U běžných kysličníkových katod dojde při průchodu většího anodového proudu k lokálnímu přehřívání vrstvy, které způsobí zvýšení emisního proudu a zabrání dosažení oblasti nasyceného proudu.

Vakuové diody se v současné době používají pouze k usměrňování proudů ve vysokonapěťových obvodech. Vzhledem k tomu, že elektrody jsou ve vakuu, je při vhodné

geometrii elektrod největší dovolený potenciálový rozdíl mezi katodou a anodou (maximální inverzní napětí) řádově až 10^5 V.

Polovodičové diody

Čistý polovodič se chová jako lineární prvek. Jeho odpor není závislý na velikosti a polaritě napětí. Nelineární a nesouměrnou charakteristiku lze získat u polovodiče dopovaného vhodnými příměsemi. Vhodnou technologií výroby lze dosáhnout toho, že se uvnitř polovodičového krystalu vytvoří dvě oblasti s různým typem vodivosti. V jedné z nich je vodivost způsobena zápornými nositeli proudu – elektrony, v druhé kladnými nositeli proudu – děrami. Oblast s děrovou vodivostí nazveme oblastí s vodivostí typu P, oblast s elektronovou vodivostí oblastí typu N. Navazují-li uvnitř monokrystalu polovodiče na sebe oblasti typu P a N, mluvíme o přechodu P – N.

Voltampérová charakteristika přechodu P – N je nesouměrná. Je-li k oblasti typu P přiložen kladný pól zdroje a k vrstvě N záporný, je odpor polovodiče malý, přechod P – N je zapojen v propustném směru. Obrátí-li se polarita napětí, odpor vzroste o několik řádů. Přechod P – N je zapojen v závěrném směru. Takovýmto přechodem pak při dané velikosti napětí protéká daleko větší proud v propustném směru, než v závěrném a polovodič může sloužit jako usměrňovací prvek. Podrobněji je možno se seznámit s polovodiči v knize [2].

V současné době převládá jako základní materiál pro výrobu polovodičových prvků křemík.

Polovodičové diody je možno rozdělit na hrotové a plošné. Hrotové diody slouží především k detekci vysokofrekvenčních signálů. Robustnější plošné diody se používají v silnoproudé technice.

Usměrňovací schopnost polovodičových diod se charakterizuje pomocí usměrňovacího poměru η , který je definován jako poměr proudu I_p v propustném směru ku proudu ve směru závěrném I_z při konstantní absolutní hodnotě napětí na usměrňovači

$$\eta = I_p / I_z . \quad (3)$$

Běžné hodnoty usměrňovacího poměru jsou větší než 10^3 , u křemíkových diod je dosažitelná hodnota až 10^8 . Usměrňovací poměr je závislý na teplotě, s růstem teploty však rychleji vzrůstá závěrný proud než proud v propustném směru. S růstem teploty proto klesá usměrňovací poměr. Zvýší-li se teplota nad určitou mez, je již usměrnění značně neefektivní a může dojít k poškození přechodu. Z tohoto důvodu nelze používat germaniové diody při teplotách nad 60° C. Křemíkové diody mohou pracovat i při teplotě 100° C.

Zenerovy diody

Podstatou vlastní činnosti Zenerových diod je elektrický průraz přechodu P – N zapojeného v závěrném směru. Při tomto elektrickém průrazu nedochází však ke zničení usměrňujícího přechodu P – N, pokud Zenerův proud nepřesáhne jistou maximální hodnotu danou největším dovoleným ztrátovým výkonem, který je dioda schopna vyžárit ve formě tepla.

K elektrickému průrazu přechodu P – N v křemíku dochází vlivem dvou fyzikálně odlišných pochodů

- a) vlivem Zenerova jevu
- b) vlivem lavinového násobení nositelů v oblasti přechodu.

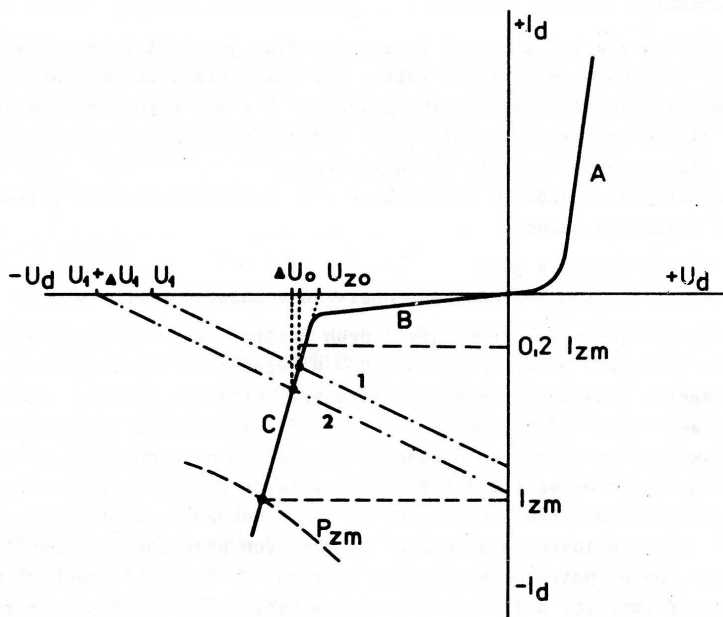
Zenerovým jevem se rozumí jistý druh vnitřní emise vyvolaný elektrickým polem. Intenzita pole v přechodu P – N vzrůstá s růstem přiloženého závěrného napětí. Dosáhne-li tato intenzita tzv. kritické hodnoty, která pro křemík je asi $5 \cdot 10^5$ V/cm, dojde k vytrhávání elektronů z valenčního pásu a tyto elektrony se tunelovým přechodem zakázaného pásu dostanou do pásu vodivostního. Podstatně se tím zvětší počet volných nositelů náboje a prudce se sníží odpor přechodu. Předpokládá se, že tento mechanismus se projevuje u „tenkých“ silně dotovaných přechodů. Na takových přechodech se docílí kritické intenzity pole, potřebné k Zenerovu průrazu. U „tenkých“ přechodů nedochází k nárazové ionizaci, a tím i k druhému mechanismu lavinového průrazu.

Lavinový průraz převažuje u Zenerových diod, u nichž je průrazné napětí větší než 5 až 6 V. Se vzrůstajícím přiloženým napětím na přechodu se zvětšuje jak intenzita elektrického pole, tak i šířka oblasti přechodu. Při jisté intenzitě pole, nižší než je kritická hodnota, při které dochází k Zenerovu jevu k vnitřní emisi pole, nabývají nositelé náboje energie dostatečné k uvolnění dalšího valenčního elektronu. U křemíku je energie potřebná k vytvoření páru elektron – díra asi 2,25 eV. Vzniklé nositelé jsou potom opět urychleni polem, způsobí při srážkách vznik dalších párů a dochází k lavinovému násobení nositelů a opět k rychlému poklesu odporu přechodu.

Experimentálně lze rozhodnout, který z obou mechanismů u daného typu diody převládá, podle teplotní závislosti průrazného napětí. Je známo, že šířka zakázaného pásu se zmenšuje při zvětšování teploty. Za zvýšené teploty pak postačí nižší přiložené napětí k dosažení Zenerova průrazu. Znamená to, že diody, u kterých se uplatňuje Zenerův jev, mají záporný teplotní součinitel průrazného napětí. Při lavinovém průrazu závisí průrazné napětí na pohyblivosti nositelů. Ta se však zmenšuje s rostoucí teplotou. Zvýšení teploty přechodu vyžaduje zvýšení napětí, aby energie nositelů při srážce byla dostatečná k vytváření lavinového procesu. Zenerovy diody, v nichž převládá tento mechanismus, mají kladný teplotní součinitel Zenerova napětí.

Voltampérová charakteristika Zenerovy diody

Typický tvar charakteristiky je zakreslen na obr. 1. Podle polarity zapojení přechodu a podle fyzikálních podmínek lze charakteristiku rozdělit na tři oblasti: propustnou, závěrnou a průraznou (Zenerovu). Propustná



Obr. 1

část charakteristiky se získá, přiložíme-li kladné napětí na oblast s vodivostí typu P a záporné na oblast N. Závěrnou a průraznou část charakteristiky získáme při obrácené polaritě zdroje.

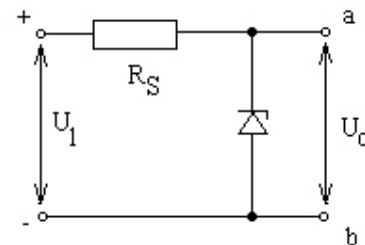
Propustná část charakteristiky (část A na obr. 1) je obdobná propustné části běžné usměrňovací diody. V závěrné části (část B na obr. 1) má dioda značný vnitřní odpor. Diodou teče nepatrný závěrný proud $-I_d$ řádově 10^{-6} A. Pro ověření kvality Zenerovy diody v této oblasti se v katalogích udává určitá maximální dovolená hodnota tohoto proudu $-I_d$ při určitém napětí $-U_d$ (např. u diody typu KZ 703 až 715 je $-I_d < 50 \mu\text{A}$ při $-U_d = 1 \text{ V}$).

Při překročení závěrného napětí nad velikost danou polohou bodu U_{zo} začne Zenerova dioda vést náhle velký proud. Její odpor poklesne z hodnoty $10^5 \Omega$ a více na hodnotu řádově 10^0 až $10^1 \Omega$. Pracovní bod Zenerovy diody volíme zásadně v této oblasti charakteristiky (část C na obr. 1). Existenci této průrazné oblasti se liší Zenerova dioda od normální usměrňovací diody. Vlastnosti Zenerovy diody se v katalogích popisují údaji, které charakterizují tuto průraznou oblast.

Zenerovo napětí se udává pro pracovní bod doporučený výrobcem. Poloha pracovního bodu se předepisuje pomocí proudu I_z , který se volí zpravidla v rozmezí od $0,2 I_{zm}$ do I_{zm} , tak, aby ležel v lineární části průrazné oblasti. Proud I_{zm} je určen maximálním ztrátovým výkonem P_{zm} a je přibližně roven

$$I_{zm} = P_{zm} / U_{zm} . \quad (4)$$

Zenerovy diody byly vyvinuty původně pro stabilizaci napětí v obvodech, tedy jako polovodičový ekvivalent stabilizačních doutnavek. V tomto oboru mají své hlavní uplatnění. Používají se však též jako vyhlazovací a vazební prvky, jako omezovače napětí, apod. jako příklad popíšeme obvod pro stabilizaci stejnosměrného napětí. Zapojení tohoto obvodu je znázorněno na obr. 2. Obvod může pracovat jako stabilizátor napětí, pokud:



Obr. 2

- vstupní napětí U_1 je větší než Zenerovo napětí U_z
- odpor R_s je zvolen tak, aby zatěžovací přímka protínala charakteristiku v průrazné oblasti, jako např. přímka 1 na obr. 1.

Z obr. 1 lze vyčíst i princip činnosti stabilizátoru. Zvětší-li se vstupní napětí ΔU_1 , posune se zatěžovací přímka (viz přímka 2 na obr. 1). Napětí na diodě se zvětší pouze o $\Delta U_0 \ll \Delta U_1$.

Vlastnosti stabilizačního proudu se popisují především:

- stabilizačním činitelem S_u , který je definován jako poměr relativní změny vstupního napětí $\Delta U_1 / U_1$ k relativní změně výstupního napětí $\Delta U_0 / U_0$, tedy

$$S_u = \frac{U_0}{U_1} \frac{\Delta U_1}{\Delta U_0} . \quad (6)$$

Čím je stabilizační činitel větší, tím méně závisí výstupní napětí na napětí vstupním;

- vnitřním odporem

$$r_i = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} , \quad (7)$$

který určuje závislost výstupního napětí na odebíraném proudu.

Protože změnu napětí zdroje můžeme vyjádřit výrazem $\Delta U_1 = R_s \Delta I + \Delta I r_i$, můžeme na základě předchozích dvou rovnic psát pro stabilizační činitel

$$S_u = \frac{U_0(R_s + r_i)\Delta I}{U_1 r_i \Delta I} \cong \frac{U_{z0}(R_s + r_i)}{U_1 r_i} . \quad (8)$$

Je-li $r_i \ll R_s$ a $U_z \ll U_1$, můžeme stabilizační činitel přibližně vyjádřit v pracovním bodě určeném proudem I_z vztahem

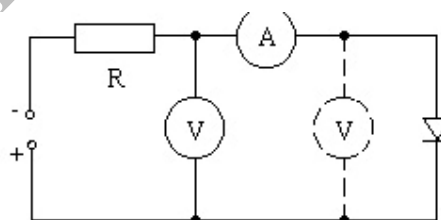
$$S_u = U_{z0} / I_z r_i . \quad (9)$$

Zatímco první předpoklad je prakticky vždy splněn, druhý jen výjimečně při extrémně vysokém napětí zdroje.

Měření voltampérových charakteristik diod voltmetrem a ampérmetrem

Diody mají v jednotlivých částech charakteristiky řádově značně odlišné vnitřní odpory. Přihlédneme-li k vnitřním odporům měřících přístrojů, nelze proto měřit v jediném zapojení celou charakteristiku.

Závěrnou oblast charakteristiky měříme v zapojení podle plně vytaženého schématu na obr. 3. Statický odpor diody je v této části charakteristiky extrémně velký, podstatně větší než vnitřní odpor běžných voltmetrů. Kdyby byl voltmetr zařazen za ampérmetr (čárkovaně značené zapojení), měřili bychom v podstatě pouze proud voltmetrem. Zapojujeme proto voltmetr před ampérmetr a měříme úbytek napětí na diodě a ampérmetru. Spád napětí na ampérmetru je však zanedbatelný, neboť vnitřní odpor ampérmetru je podstatně menší než odpor diody v závěrné oblasti. K měření proudu musíme použít velmi citlivého přístroje, galvanometru nebo mikroampérmetru. Měření v této oblasti je obdobné s měřením charakteristiky usměrňovací diody v nepropustném směru.



Obr. 3

Odpor R zakreslený na obr. 3 je odporem ochranným, zapojuje se do obvodu při měření charakteristiky Zenerovy diody. Jeho úkolem je zabránit poškození mikroampérmetru při přechodu ze závěrné k průrazné oblasti charakteristiky. Velikost odporu R volíme řádově $10^5 \Omega$ a může být i větší podle druhu Zenerovy diody a ostatních parametrů obvodu.

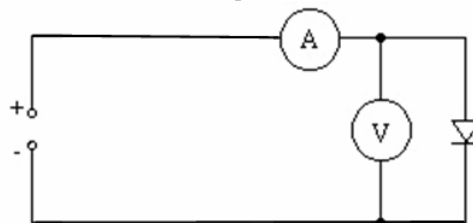
V závěrné části charakteristiky proud diodou pozvolna roste (u křemíkových diod je řádu 10^{-6} A nebo menší), přibližně úměrně zvyšujícímu se napětí. Ostřejší závislost proudu na napětí je příznakem, že se dostáváme u Zenerovy diody do průrazné oblasti charakteristiky, tj. vlevo od bodu U_z na obr. 1. U běžných usměrňovacích diod prudší vzrůst proudu znamená, že se dostáváme do blízkosti maximálního inverzního napětí a hrozí zničení diody.

V průrazné oblasti teče Zenerovou diodou podstatně větší proud než v závěrné oblasti. Musíme proto jednak nahradit mikroampérmetr přístrojem s větším rozsahem, miliampérmetrem

nebo ampérmetrem. Voltmetr zapojíme až za ampérmetr (na obr. 3 naznačeno čárkovaně) a měříme napětí pouze na diodě. Musíme kromě toho značně zmenšit odpor R , abychom proměřili celou průraznou oblast. Volba velikosti sériového odporu R bude nejlépe patrnou z následujícího kritického příkladu pro diodu KZ 703. Její Zenerovo napětí je přibližně 7 V a při umístění na chladicí plochu 100x100 mm je mezní hodnota proudu $I_{zm} = 1,3$ A (mezní ztrátový výkon cca 10 W). Statický odpor diody pro maximální proud je přibližně $R_{z\ min} = U_z/I_{zm} \cong 7/1,3 \cong 5\ \Omega$. Abychom diodu nepřetížili, musí být při napětí zdroje $U = 24$ V, které používáme, minimální odpor obvodu $R_{min} = R + R_{z\ min} = U/1,3\ \text{A} \cong 18,5\ \Omega$. Odpor asi od $0,01I_{zm}$ do I_{zm} . Této změny proudu dosáhneme změnou napětí zdroje, případně zvětšováním odporu R . Za pracovní bod pokládáme ten, v němž je $I_z = 0,3$ A.

V propustné oblasti měříme voltampérovou charakteristiku v zapojení podle obr. 4. Polarita zdroje je opačná než na obr. 3.

Odpor diody v propustném směru je relativně malý, proto je voltmetr zapojen až za ampérmetr. Vystačíme s malým rozsahem voltmetru (~ 1 V). Při všech měřeních používáme buď zdroje neproměnného stejnosměrného napětí 24 V, napětí a proud diodou regulujeme odpory r_1 a r_2 zakreslenými na obr. 4. Výhodnější je však použít stabilizovaného zdroje stejnosměrného napětí. Výstupní napětí se reguluje přímo na zdroji a posuvný odpor r_1 není potřeba. Zapojení obvodu pak odpovídá obr. 3. Ze zdrojů OP 28045 a BS 525 však nelze odebírat větší proud než 1 A, charakteristiky pak měříme jen po tuto maximální hodnotu proudu. Před měřením je nutno na zdroji OP 28045 nastavit hodnotu automatické pojistky na očekávanou maximální hodnotu proudu.

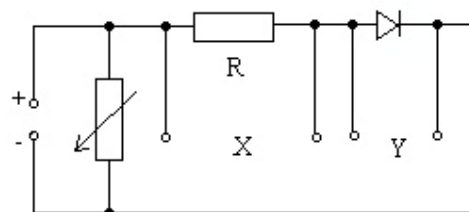


Obr. 4

Měření charakteristik souřadnicovým zapisovačem

K měření charakteristik nelineárních prvků můžeme s výhodou použít souřadnicového zapisovače. Jedním z těchto zapisovačů je typ XY 4103, který používáme v praxi. Zapisovač má dva nezávislé napěťové vstupy a psací zařízení se může pohybovat ve dvou kolmých směrech. Výchylka v jednom směru je úměrná napětí přiváděnému na svorky X, v druhém napětí na svorkách Y. Souřadnice polohy pera jsou proto úměrné vstupním napětím. V každém směru výchylky pera může zapisovač sloužit jako voltmetr, v daném případě třídy přesnosti 0,2. Chceme-li některým ze vstupů měřit proud, musíme snímat napětí na přesném odporu vhodné velikosti zapojeném sériově do obvodu.

Problematika měření voltampérových charakteristik zůstává stejná jako při měření bod po bodu. Vyhnete se však odečítání hodnot, jejich záznamu a opětovnému vynášení do grafu. Při zakreslování charakteristik bereme proud jako nezávisle proměnnou. Napětí z měrného odporu R přivádíme proto na svorky Y zapisovače, jak je znázorněno na



Obr. 5

obr. 5.

Ke svorkám X přivádíme přímo napětí snímané na diodě. Vstupní odpor je u daného zapisovače na všech rozsazích konstantní a rovný $100\text{ k}\Omega$, takže při měření diody v propustném směru neovlivní výsledek měření. Při měření v závěrném směru zapojíme pochopitelně svorky X před odpor R , jinak by spád napětí na odporu R byl především určen proudem tekoucím vstupním odporem zesilovače X.

Uvedeme několik poznámek k volbě rozsahu zapisovače a hodnoty odporu R . Charakteristiky diod postačí zakreslovat na milimetrový papír formátu A4, to jest na plochu asi $28 \times 18\text{ cm}$. Do jednoho grafu zakresluje jak propustnou, tak i závěrnou část charakteristiky. Nulu volíme proto přibližně ve středu papíru. Předpokládejme, že propustnou část charakteristiky polovodičové diody budeme měřit při napětí do cca $1,2\text{ V}$ a proudech do 1 A . Nastavíme-li na zesilovači X napěťovou konstantu $0,1\text{ V/cm}$, bude výchylka pera při napětí $1,2\text{ V}$ rovna 12 cm . Chceme-li, aby výchylka ve směru Y byla při proudu 1 A rovna 10 cm , zvolíme například kombinaci odporu $R = 0,1\ \Omega$ a napěťovou konstantu zesilovač Y rovnu 10 mV/cm . Obdobně předem musíme odhadnout vhodné rozsahy pro další měření.

Na záznamový papír vždy poznamenáme nastavené hodnoty. Podle nich sestrojíme stupnice na souřadných osách. Souřadné osy domalujeme buď dodatečně, nebo je můžeme zakreslit pomocí posuvu nulové polohy pera zapisovače. Kultura vzniklého grafu značně závisí na uváženém postupu při měření. Napětí na obvodu musíme zvyšovat plynule a pomalu. Doporučujeme projet před každým měřením příslušnou část charakteristiky zkusmo s nespustěným perem.

Schéma zakreslené na obr. 5 odpovídá obvodu pro měření propustné části charakteristik. Obvod pro měření závěrných částí nebo pro průraznou oblast Zenerovy diody upravíme v souladu s pokyny uvedenými pro měření charakteristik bod po bodu. Potenciometr R používáme pokud nemáme k dispozici zdroj s proměnným výstupním napětím.

Literatura

- [1] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983 stať 4.5.2.
- [2] Stránský J. a kol.: Polovodičová technika I, SNTL, Praha 1973, stať 3.1.
- [3] Bakule R., Šternberk J.: Fyzikální praktikum II., SPN, Praha 1989