

7.1 Charakteristiky optoelektronických součástek

Teoretická část

Fyzikální základy polovodičových luminiscenčních diod jsou diskutovány v odst. 7.1 a 7.2 části I. Vlastnosti luminiscenčních diod jako součástek elektrických obvodů popisují jejich voltampérové charakteristiky (obr. 7.1-1); u všech luminiscenčních diod mají typicky diodový průběh, se kterým jste se seznámili v praxi z elektřiny. Voltampérová charakteristika v propustném směru se dá vyjádřit analytickým vztahem

$$I_F = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{e[U_F - I_F R_S]}{nkT} \right) - 1 \right\}, \quad (1a)$$

kde I_F je proud tekoucí přechodem $P - N$, I_0 je zbytkový proud, k je Boltzmanova konstanta, e náboj elektronu, T absolutní teplota, U_F je napětí na diodě a R_S je sériový odpor diody. Je-li však $eU_F \geq 4kT$ (tj. je-li za pokojové teploty $U_F \geq 100$ mV) a zároveň $U_F \gg I_F R_S$, zjednoduší se rovnice (1a) na tvar

$$I_F = I_0 \exp \left(\frac{eU_F}{nkT} \right). \quad (1b)$$

Tvar charakteristiky závisí na geometrii a vlastnostech přechodu, na vlastnostech použitého materiálu, výrobní technologii apod. Všechny tyto faktory se zahrnují do bezrozměrné konstanty n . Konstanta $\alpha = 1/n$ charakterizuje mechanismus transportu náboje přechodem (difúze, rekombinace, tunelování). Jde-li o difúzní mechanismus bez rekombinace, je $\alpha = 1$. Sériový statický odpor je definován (v pracovním bodě U_{F_0} , I_{F_0}) jako

$$R_d = \frac{U_{F_0}}{I_{F_0}} \quad (2)$$

a sériový dynamický odpor je definován jako

$$R_{di} = \left. \frac{dU_F}{dI_F} \right|_{I_{F_0}}. \quad (3)$$

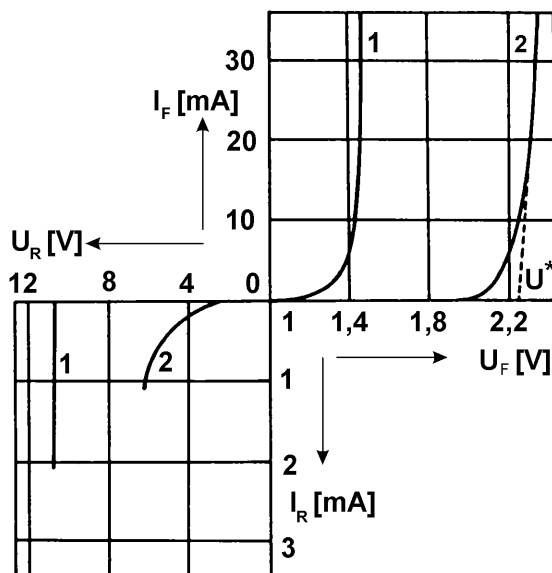
Ze vztahů (1b)–(3) vyplývá vztah mezi statickým a dynamickým odporem

$$R_{di} = R_d \frac{nkT}{eU_{F_0}}. \quad (4)$$

Logaritmováním (1b) a vhodnými úpravami získáme dále

$$n = \frac{e}{kT} \frac{U_{F_1} - U_{F_2}}{\ln \frac{I_{F_1}}{I_{F_2}}}. \quad (5)$$

Pomocí (2), (4) a (5) lze stanovit R_d , R_{di} a n ze změřené voltampérové charakteristiky. Stanovení R_d je triviální; možný další postup je ten, že pro vybranou dvojici (dostatečně vzdálených) bodů (U_{F_1}, I_{F_1}) , (U_{F_2}, I_{F_2}) určíme z (5) konstantu n a poté



Obr. 7.1–1 Voltampérové charakteristiky luminiscenčních diod vyrobených ze dvou různých materiálů (1, 2)

pomocí (4) vypočteme R_{di} . Statický odpor bývá řádově 10 – 100 Ω , dynamický odpor je $\lesssim 1\Omega$.

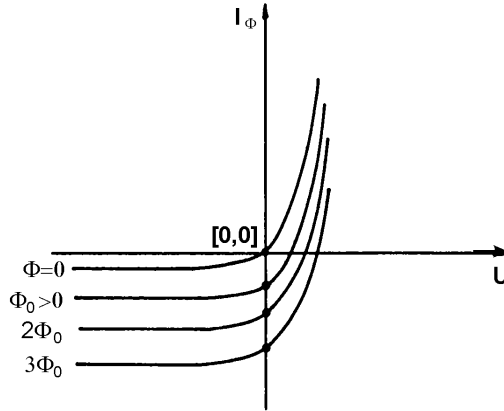
Prahové napětí U^* je takové napětí extrapolované z lineární části V-A charakteristiky, při kterém dochází ke zlomu v linearizovaném průběhu závislosti proudu tekoucího diodou na napětí přiloženém na luminiscenční diodu (obr. 7.1–1). Toto prahové napětí je závislé na materiálu, z něhož jsou luminiscenční diody zhotoveny a je blízké difuznímu napětí U_d , tedy i šířce zakázaného pásu E_g/e (obr. 7.2b v části I). Důvodem této skutečnosti je to, že napětí U^* poskytuje - zhruba řečeno - nosičům proudu energii nutnou k překonání potenciálové bariéry eU_d . U diod z GaAs ($E_g \approx 1.4$ eV) je prahové napětí U^* asi 1.4 V, z $\text{GaAs}_x\text{P}_{x-1}$ ($E_g \approx 1.4 - 2.4$ eV podle složení) je $U^* = (1.4 - 2.3)$ V, u diod z GaP ($E_g \approx 2.3$ eV) je $U^* = 2.4$ V.

Efektivnost luminiscenčních diod jako zdrojů světla se vyjadřuje především závislostí vysílaného zářivého toku na proudu tekoucím diodou I_F . Tuto závislost nazýváme světelnou (zářivou) charakteristikou. Protože při malých proudech I_F převládá nezářivá rekombinace nosičů, je graf světelné charakteristiky blízko počátku mírně konvexní funkcí, přecházející postupně v lineární závislost a posléze se eventuálně blíží k nasycení (dochází k nasycení luminiscenčních center).

Popis fotodiod a fototranzistorů

Běžným materiálem pro výrobu fotodiod je křemík. Polovodičová fotodiody slouží k přeměně světelné energie na energii elektrickou a tím k detekci dopadajícího světelného toku (odst. 7.3 části I). Voltampérová charakteristika polovodičové fotodiody je

ukázána na obr. 7.1–2 pro různé hodnoty světelného toku Φ jako parametru.



Obr. 7.1–2 Voltampérové charakteristiky polovodičové fotodiody pro různé hodnoty osvětlení

Důležitou charakteristikou fotodiody je závislost fotoelektrického proudu I_Φ na dopadajícím světelném toku $I_\Phi = f(\Phi)$. Tato tzv. světelná (energetická) závislost fotodiody bývá v hradlovém režimu (přiložené napětí $U = 0$ V) obvykle v širokém rozsahu osvětlení lineární, jak lze ostatně usoudit z obr.7.1-2. Při vysokých hodnotách však dochází k nasycení této charakteristiky.

Fototranzistor je konstruován tak, že světlo je pohlcováno v oblasti báze, kde tím vznikají páry nadbytečných nosičů proudu. Světlem vytvořené menšinové nosiče v bázi jsou strhávány polem kolektorového přechodu, přecházejí do kolektoru (kde jsou většinovými nosiči) a tvoří tzv. primární fotoproud I_Φ . Většinové nosiče v bázi zůstávají jako v potenciálové jámě a tvoří objemový náboj, který snižuje potenciálovou bariéru emitorového přechodu a tím vlastně plní funkci vnějšího proudu přiváděného do báze (proto u fototranzistoru nemusí mít báze elektrický vývod). Takto dochází ke zvýšené injekci menšinových nosičů z emitoru do oblasti báze a tím ke zesílení primárního fotoproudu. Výsledný fotoelektrický proud v kolektoru I_{CO} je pak dán přibližným vztahem

$$I_{CO} = G I_\Phi, \quad (6)$$

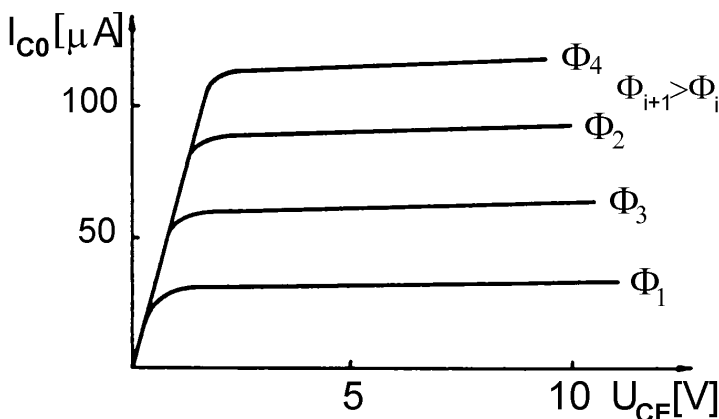
kde G je tzv. zisk fototranzistoru, dosahující hodnot řádově 100. Lze ukázat, že platí

$$G = \frac{1}{1 - \alpha_0}, \quad (7)$$

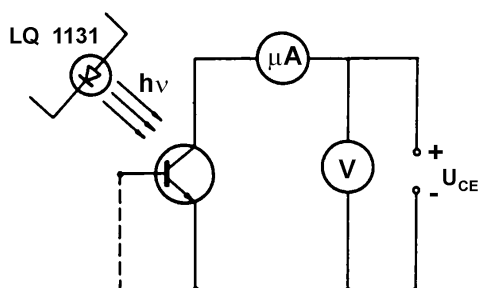
kde α_0 je proudový zesilovací činitel nakrátko.

Voltampérovými charakteristikami fototranzistoru se rozumí závislost I_{CO} na napětí kolektor–emitor U_{CE} . Pro různé hodnoty dopadajícího světelného toku Φ jsou tyto charakteristiky schematicky znázorněny na obr. 7.1–3.

Charakteristiky fototranzistoru lze měřit v zapojení uvedeném na obr. 7.1–4. Má-li fototranzistor vyvedenu bázi, lze snadno stanovit jeho zisk G . Ke stanovení zisku fototranzistoru použijme téhož zapojení, kde však zkratujeme emitor s bází (znázorněno čárkovaně na obr. 7.1–4). Tím eliminujeme funkci přechodu emitor – báze



Obr. 7.1–3 Voltampérové charakteristiky fototranzistoru pro různé hodnoty osvětlení



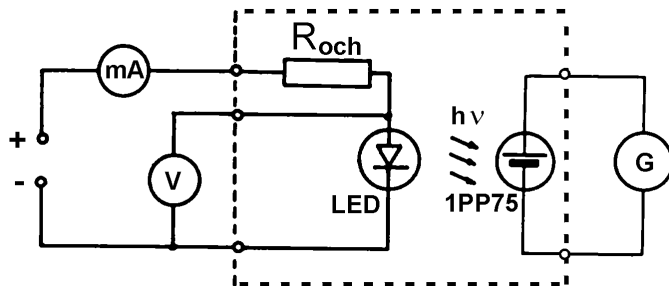
Obr. 7.1–4 Měření fototranzistoru

a fototranzistor pracuje jako pouhá fotodiody na přechodu báze – kolektor. Měřič proudu pak měří primární fotoproud I_Φ . Jestliže při témže světelném toku Φ a témže napětí U_{CE} změříme I_{CO} (zrušením zkratu emitor–báze), určíme z rovnice (6) zisk G . Ze vztahu (7) lze pak stanovit α_0 . Podrobnější diskuzi fotodetektorů i aktivních optoelektronických prvků naleznete v [1][2].

Poznámka: Při přesném měření je třeba od měřené hodnoty proudu kolektorem při osvětlení odečíst hodnotu temného proudu kolektorem, neboť teprve výsledný rozdíl udává hodnotu I_{CO} použitelnou ke stanovení G .

Postup měření

1. Měření voltampérových a světelných charakteristik luminiscenčních diod se provádí současně v zapojení dle obr. 7.1–5. Jako napájecího zdroje diod použijte plynule regulovatelný zdroj ss napětí 0–30 V. Měřte do maximálního proudu diodou 30 mA. Jako detektor emitovaného světla použijte fotodiodu 1PP75 ve spojení s galvanoměrem MG5. Emitovaný světelný tok změříte v relativních jednotkách. Červenou diodu (LQ 1131) i zelenou diodu (LQ 1731) máte zabudovanou společně s fotodiodou i ochranným odporem R_{och} ve světlotěsných



Obr. 7.1–5 Měření voltampérových a světelných charakteristik luminiscenčních diod

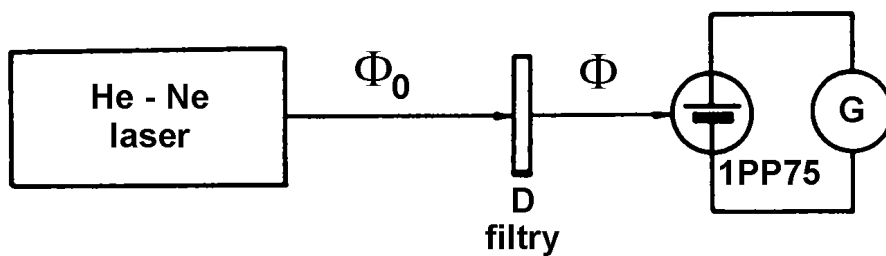
krabičkách s elektrickými vývody. Změřte 30-40 bodů charakteristiky.

POZOR : Luminiscenční diody lze napájet jen přes ochranný odpor R_{och} , připojíte-li napětí přímo na anodu a katodu, může dojít ke zničení diody!

2. Statický odpor R_d , dynamický odpor R_{di} i úbytek napětí na diodách určujete při jmenovitém proudu 20 mA. **DOPORUČENÍ** k alternativnímu stanovení n : Vyneste graf funkce (1b) ve tvaru $\ln I_F$ versus U_F . Směrnice její *lineární* části je rovna e/nkT . Odtud stanovíte n .
3. Také fototranzistor (typ NPN) máte zabudován společně se zdrojem světla (LQ 1131) ve světlotěsné krabičce s vývody. Jako voltmetru a mikroampérmetru (obr. 7.1–4) použijte digitální multimetry. Dvojitý zdroj ss napětí použijte jako zdroje napětí U_{CE} i k napájení luminiscenční diody LQ 1131 (ochranný odpor má zabudován). Charakteristiky fototranzistoru měřte pro tři různé hladiny osvětlení tak, že proud luminiscenční diodou nastavíte 10, 20 a 30 mA. Napětí U_{CE} zvyšujte pouze tak, abyste nepřekročili maximální kolektorovou ztrátu $P_C = I_{CO}U_{CO} = 0.5$ mW. Zakreslete P_C do sítě změřených charakteristik.
4. Světelnou charakteristiku fotodiody 1PP75 změřte pomocí He-Ne laseru, který použijete jako zdroj záření. Světelný tok dopadající na fotodiodu měřte pomocí šedých filtrů, jejichž optickou hustotu $D = \log(\Phi_0/\Phi)$ (Φ_0 je světelný tok dopadající na filtr, Φ je světelný tok vystupující z filtru) udává následující tabulka:

Filtr č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	0.12	0.16	0.42	0.58	0.81	0.94	1.20	1.75	1.96	2.30

Světelný tok do grafu vynášejte v relativních jednotkách, tj. zvolte např. $\Phi_0 = 1$. Fotoelektrický proud na fotodiodě měřte galvanoměrem. Fotodioda je samostatně zabudována v kovovém krytu na optické lavici. Schema uspořádání je na obr. 7.1–6. Pozor na parazitní osvětlení např. stolní lampou.



Obr. 7.1–6 Schéma experimentálního uspořádání pro ověření linearity světelné charakteristiky fotodiody v hradlovém režimu

Literatura

- [1] J. Mišek, L. Kratěna: Optoelektronika. Populární přednášky o fyzice sv. 29, SNTL, Praha 1979.
- [2] B. E. A. Saleh, M. C. Teich: Základy fotoniky, svazek 3, Matfyzpress 1994.