

## 28 Charakteristiky optoelektronických součástek

### ÚKOL

Změřte voltampérovou, luxampérovou a směrovou vyzařovací charakteristiku luminiscenční diody, přenosovou charakteristiku optronu. Z grafu V-A charakteristiky určete součinitel  $n$  a z přenosové charakteristiky určete kmitočtový rozsah optronu.

### TEORIE

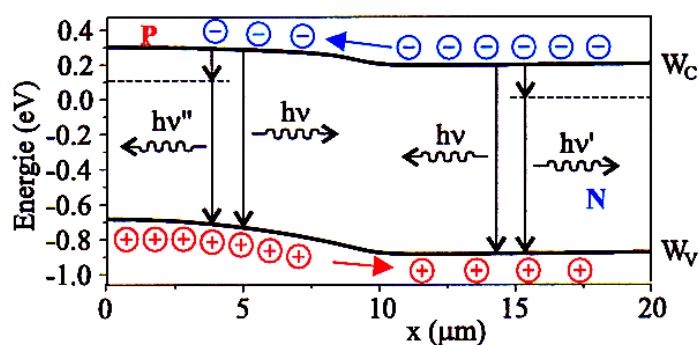
Obecně optoelektroniku chápeme jako vědní obor zabývající se zpracováním informace způsoby, které vyžadují spolupráci optických a elektronických systémů. V současné době se v optoelektronice téměř nezávisle rozvíjejí dva směry:

- *Optický směr* – optické velkokapacitní paměti pro rozpoznávání obrazů a řízená funkční prostředí,
- *Elektronicko-optický směr* – zařízení a součástky využívající fotoelektrický jev a elektroluminiscenci.

### Luminiscenční dioda

Luminiscenční dioda LED (Light Emitting Diode) je zdrojem elektromagnetického záření v oblasti viditelného světla a v blízké infračervené oblasti. Základním materiálem pro výrobu luminiscenčních diod jsou polovodičové sloučeniny typu  $A_{III}B_V$ , jako například GaAs, GaP, GaAsP a další.

Luminiscenční dioda je tedy polovodičová dioda a ta je tvořena přechodem PN. V provozu je přechod polarizován v propustném směru. Energetický diagram přechodu PN, na nějž je vnější napětí přiloženo v propustném směru, je na obr. 28.1.



Obr. 28.1

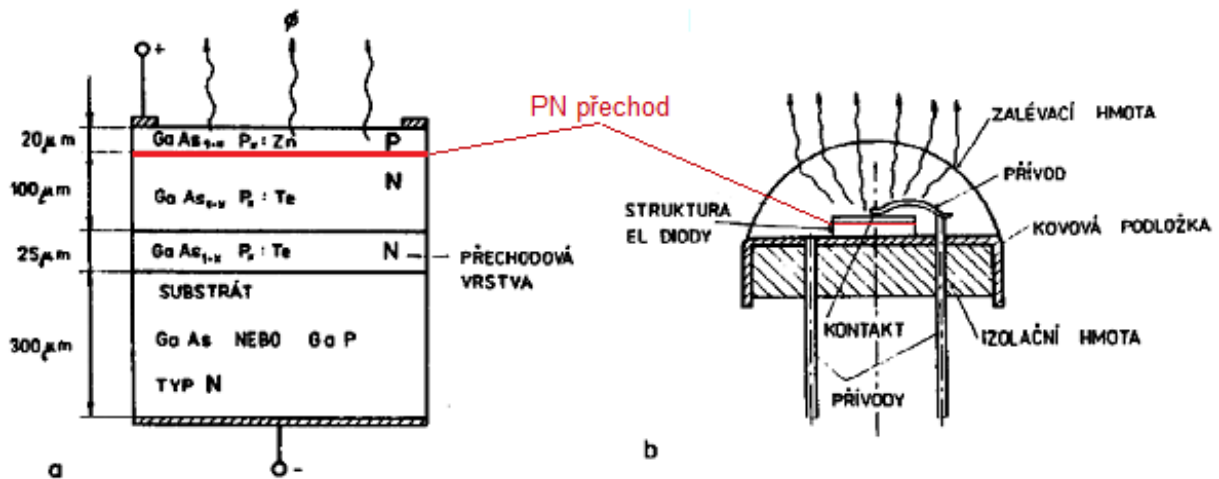
Nosiče proudu, které jsou vnějším napětím vtaženy do oblasti přechodu rekombinují. To znamená, že elektron s větší energií se spojí s dírou, jejíž energie je menší. Rozdíl jejich energií je emitován (vyzařen) jakožto foton, který má energii rovnou tomuto rozdílu.

Frekvence  $\nu$  emitovaného fotonu splňuje podmínku

$$h\nu \equiv \hbar\omega = eU, \quad (28.1)$$

kde Planckova konstanta  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , a  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , úhlová frekvence  $\omega = 2\pi \cdot \nu$ , elementární náboj  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  a kde  $U$  je přibližně vnější napětí přiložené na PN přechod.

Nejjednodušší uspořádání luminiscenční diody je na obr. 28.2. Světlo vzniká v těsné blízkosti přechodu PN, prochází oblastí P a přes ochrannou vrstvu vystupuje do okolí. Energie vyzařovaného světla závisí na hloubce, v níž se nachází přechod PN, na proudu diodou a na úhlu  $\varphi$ .



Obr. 28.2

K detekci dopadajícího elektromagnetického záření lze užít buďto běžnou fotodiodu nebo fotodiodu PIN. Energetický diagram těchto diod v podstatě odpovídá obr. 28.1, avšak situace je odlišná tím, že záření na přechod dopadá a je absorbováno. V oblasti přechodu se objeví dvojice nosičů elektron-díra, které jsou vnitřním elektrickým polem, jež je zde přítomno, od sebe odděleny. Tím se zvětšuje počet minoritních nosičů (elektronů v oblasti P a děr v oblasti N). Následkem toho se posunou energetické hladiny hranic pásů a na přechodu PN se objeví napětí.

K popisu vlastností luminiscenčních diod se používá několik charakteristik. Při jejich měření budeme diodu napájet **stejnoseměrným** proudem

**Voltampérová charakteristika** luminiscenční diody popisuje vztah mezi napětím na diodě  $U_{\text{led}}$  a proudem  $I_{\text{led}}$ , který diodou protéká.

Voltampérovou charakteristiku reálné diody lze přibližně popsat vztahem

$$I_{\text{led}} = I_0 \exp\left(\frac{eU_{\text{led}}}{nkT}\right). \quad (28.2)$$



Zde  $I_0$  je nasycený závěrný proud, náboj elektronu  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$  je Boltzmannova konstanta,  $n$  je číselný součinitel závislý na mechanismu transportu a  $T$  je teplota okolí PN přechodu.

Pro součinitel  $n$  platí:  $1 < n < 2$ . Teplotu okolí volíme  $T = 293 \text{ K}$ .

**Luxampérová charakteristika** luminiscenční diody je závislost zářivého toku  $\Phi$ , který je diodou emitován, na proudu  $I_{\text{led}}$ , jenž při tom diodou protéká,

$$\Phi = \Phi(I_{\text{led}}) \quad (28.3)$$

Na fotodiodě snímající záření diody luminiscenční vzniká napětí  $U_{\text{det}}$  přímo úměrné dopadajícímu světelnému toku a tedy i zářivému toku, který je LED diodou emitován.

Platí 
$$U_{\text{det}} \sim \Phi. \quad (28.4)$$

Tvar charakteristiky se tedy nezmění, nahradíme-li zářivý tok  $\Phi$  snadněji měřitelným napětím  $U_{\text{det}}$  a jako luxampérovou charakteristiku budeme chápat závislost

$$U_{\text{det}} = U_{\text{det}}(I_{\text{led}}). \quad (28.5)$$

**Směrová vyzařovací charakteristika** přináší informaci o nerovnoměrnosti, s níž luminiscenční dioda září do jednotlivých směrů v prostoru. Závislost

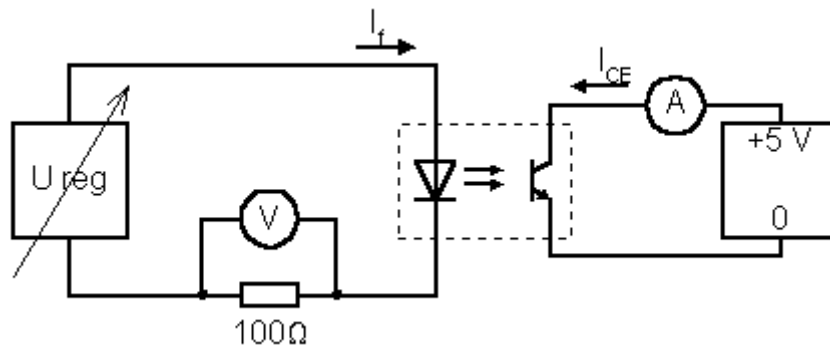
$$\Phi = \Phi(\varphi), \quad (28.6)$$

která tento děj popisuje, můžeme vzhledem k (28.4) nahradit závislostí

$$U_{\text{det}} = U_{\text{det}}(\varphi). \quad (28.7)$$

Kde úhel  $\varphi$  charakterizuje odklon dopadajícího světelného paprsku od horizontální roviny.

**Optron** je optoelektronická součástka, vzniklá kombinací luminiscenční diody, která světlo vyzařuje a fotodiody, která vyzářené světlo snímá. V praxi se častěji užívá optron v němž je fotodioda nahrazena citlivějším fototranzistorem, obr. 28.3.



**Obr. 28.3**

Pomocí optronu lze dva obvody důkladně galvanicky oddělit, ale zachovat přitom možnost přenosu signálu mezi nimi. Proměnným signálem se moduluje proud procházející LED diodou. Na výstupní straně je k dispozici proměnná složka napětí na fotodiodě či fototranzistoru.

Poznámka: Na výše uvedeném obr. 28.3 je ukázáno pouze základní obvodové schéma pro měření optoelektronického vazebního členu s předpokladem řízení celého pracoviště počítačem. Na tomto zjednodušeném schématu nejsou pro zachování přehlednosti zobrazeny potřebné ochranné (sériové ochranné rezistory v obvodu LED diody a fototranzistoru), které mají omezit maximální proud obvodem v případě nevhodného nastavení napětí napájecího zdroje.

**Přenosová charakteristika** optronu je název pro závislost

$$U'_{\text{det}} = U'_{\text{det}}(f) \quad \text{při} \quad I_{\text{led}} = \text{konst.}, \quad (28.8)$$

kde  $f$  je kmitočet harmonické složky přičítané k stejnosměrnému proudu diodou  $I_{\text{led}}$  a  $U'_{\text{det}}$  střídavá složka napětí na výstupu optronu. Pro měření této charakteristiky je nutné mít k dispozici také zdroj **střídavého** proudu. Přenosová charakteristika informuje o šířce frekvenčního pásma, tedy o kmitočtech, které je optron schopen přenášet, a o zkreslení, jež při tomto přenosu vzniká.

Pokud tedy požadujeme přenášet optoelektronickým vazebním členem s LED diodou a fototranzistorem analogový (spojitý) signál, svítivou diodu musíme napájet stejnosměrným proudem, jehož hodnotu v čase rozmítáme žádaným signálem k přenosu. Vzhledem k tomu, že optron je tvořen nelineárními obvodovými prvky, výstupní galvanicky oddělený signál bude z hlediska kvality zatížen vyšším nelineárním zkreslením a horšími šumovými parametry než signál původní. Mezi výhody často používaných optoelektronických vazebních členů (ve srovnání se speciálními oddělovacími transformátory) patří v případě přenosu analogových signálů zejména miniaturní rozměry a nízká cena těchto komponent.

## POSTUP PŘI MĚŘENÍ, ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ

Měření této úlohy je do značné míry automatizováno. Veškeré nastavování se provádí za pomoci počítače a ovládacího programu (spustit ikonou na ploše) s názvem *Optoelektronické součástky 28*. Po spuštění programu je nutné zadat požadované identifikační údaje studenta nebo studentů (společně na jeden řádek). Tyto údaje slouží jako záznam o absolvování této úlohy zapsanými studenty. Program umožňuje spustit nápovědu (tlačítko vpravo nahoře), což je tento dokument. Program vás měřením provede.

**Základní obrazovka nabízí čtyři záložky:**

- Voltampérová a luxampérová charakteristika LED
- Vyzařovací charakteristika LED
- Přenosová charakteristika optronu
- Nastavení a tisk

Měření není nutné provádět postupně, k jednotlivým bodům úlohy se můžete vracet podle potřeby. Minimální počty naměřených hodnot je nutné dodržet, jinak vás program nepustí k dalšímu měření. Po změření všech požadovaných charakteristik si můžete naměřená data vytisknout. S případnými dotazy se obraťte na vyučující.

### 1. Voltampérová a luxampérová charakteristika LED

- a) V pravé části programu se do editačního okna „*Proud [A]*“ zadává proud LED diodou  $I_{\text{led}}$  ve tvaru  $x\text{E-}y$ , kde  $x$  je celé číslo a  $y$  je exponent (tj. náhrada zápisu s mocninou deseti ve tvaru  $x \cdot 10^{-y}$ ). Po stisknutí klávesy „Enter“, nebo po stlačení tlačítka „Nastavit proud“ se zadaný proud nastaví a z DC voltmetrů se automaticky odečtou hodnoty napětí  $U_{\text{led}}$  na LED a  $U_{\text{det}}$  detektoru. Do tabulky jsou tato napětí zařazena dle nastavené hodnoty proudu.

**Poznámka:** detektor je nastaven do pozice přímo proti LED. Proud LED je vhodné zadávat monotónním způsobem od nejmenších hodnot po nejvyšší s předpokladem využití logaritmicky se zvyšujících hodnot vhodných pro zobrazení v příslušném semilogaritmickém grafu. Postupné zvyšování hodnot proudu LED při měření V-A charakteristik je výhodné z hlediska menšího ovlivnění měření příliš rozdílnými teplotami uvnitř měřené součástky (PN přechodu LED diody) i v jejím okolí.

- b) V dolní části okna programu se automaticky vykreslují náhledy grafů luxampérové a voltampérové charakteristiky.

**Poznámka:** místo nuly se na osách může objevit číslo typu XXE-200. Tato chyba je obsažena v komponentě grafu a na tvar charakteristik nemá žádný vliv.

- c) Hodnoty proudu  $I_{\text{led}}$  nastavujte z celého doporučeného intervalu  $1\mu\text{A}$  až  $20\text{mA}$ . Hodnoty volte tak, abyste v charakteristikách měli dobře proměřené ohyby. Pokračovat v měření úlohy je možné až po naměření minimálně 20-ti hodnot.
- d) Jednotlivé hodnoty lze smazat kliknutím na příslušný řádek v tabulce a stisknutím klávesy „Delete“. Pokud je zapotřebí měření z nějakého důvodu celé opakovat, je možné smazat naměřená data a nastavení proudu na záložce programu „Nastavení a tisk“. Vymazání se provádí zaškrtnutím požadovaného políčka v části „Vymazání hodnot“ a stisknutím tlačítka „Vymaž“.
- e) Při konstrukci grafu V-A charakteristiky použijeme **logaritmické dělení na ose y** (proud  $I_{\text{led}}$ ) a **lineární na ose x** ( $U_{\text{led}}$  napětí na LED). Proměřovaná funkce je totiž (přibližně) exponenciální a v semilogaritmickém zobrazení by se měla jevit jako přímka. Při **určování koeficientu  $n$**  pracujte jenom s přímkovou částí charakteristiky.

## 2. Vyzařovací charakteristika LED

- a) Při měření se natáčí LED i detektor. Luminiscenční dioda se nastavuje otáčením podle podélné osy do několika poloh. Detektor obíhá kolem diody v rozmezí  $0^\circ$ – $180^\circ$ . Aktuální natočení je znázorněno na obrazovce.
- b) Před měřením nastavíte pomocí posuvníku pracovní proud diodou, který má zásadní vliv na tvar vyzařovací charakteristiky. Luminiscenční dioda musí dostatečně svítit. Tlačítkem „Nastavit proud“ se zadaný proud nastaví v dialogovém oknu budete vyzváni, abyste otevřeli okénko přípravku s ledkou a vizuálně zkontrolovali intenzitu světla LED. Okénko je umístěno na horní stěně měřicího přípravku. Otevření se provede otočením černého knoflíku podle popisky. Volba „ANO“ v dialogovém okně znamená, že chcete nastavit jinou hodnotu proudu. Volba „NE“ zakáže pozdější změnu proudu, protože během celého měření by měl být proud diodou konstantní (je parametrem). Pokud by LED svítila příliš, došlo by ke zkreslení vyzařovací charakteristiky.
- c) Po nastavení proudu zvolte natočení LED kliknutím na možnosti v části „Natočení LED“. Zadáním hodnot do editačního okénka „Natočení detekt. [ $^\circ$ ]“ se volí úhel natočení detektoru vůči luminiscenční diodě. Tlačítkem „Natočit a změřit“ se vybrané úhly nastaví pomocí krokového motoru v přípravku a změří se napětí detektoru  $U_{\text{det}}$ . Hodnoty jsou opět řazeny do tabulky.

**Poznámka:** S ohledem na kalibraci výchozích krajních poloh krokových motorů může natočení detektoru a LED chvíli trvat.

- d) Automaticky je vykreslován polární graf vyzařovací charakteristiky. Na ose intenzity záření je relativní měřítko vztažené k maximální naměřené hodnotě.
- e) Pro každý úhel natočení LED je potřeba změřit minimálně 19 hodnot při různém natočení detektoru. Teprve potom je umožněno pokračovat v úloze dále.
- f) Jednotlivé hodnoty lze opět smazat kliknutím na příslušný řádek v tabulce a stisknutím klávesy „Delete“. Pokud je zapotřebí měření z nějakého důvodu celé opakovat, je možné smazat naměřená data a nastavení proudu na záložce programu „Nastavení a tisk“.
- g) Z naměřených hodnot sestojíte doma polární grafy pro všechny vzájemné polohy LED a detektoru.

### 3. Přenosová charakteristika optronu

- a) Pomocí posuvníku nastavte pracovní proud LED. Proud pracovního bodu nastavte tak, aby signál zobrazený na osciloskopu měl maximální stejnosměrnou složku a byl nezkrácený. Pomocí tlačítka „Nastavit proud“ se zadaný proud nastaví a dialogovým oknem budete vyzváni, abyste otevřeli okénko přípravku s ledkou a vizuálně zkontrolovali zda LED viditelně bliká. Volba „ANO“ dialogovém okně znamená, že chcete nastavit jinou hodnotu proudu. Volba „NE“ zakáže pozdější změnu proudu, protože během celého měření by měl být proud diodou konstantní (tj. stejnosměrná složka proudu LED je parametrem).

**Poznámka:** ořezání průběhu na osciloskopu je způsobeno omezením napětí na LED ( $f_{det}=90^\circ$ ).

- b) Do editačního okna „Frekv. [Hz]“ se zadává frekvence. Tlačítkem „Nastav frekvenci“ se zadaná frekvence nastaví a provede se měření  $U'_{det}$ . Hodnoty se zatřídí do tabulky a automaticky se vykreslí náhled přenosové charakteristiky.

**Poznámka:** detektor je nastaven do pozice přímo proti LED.

- c) Hodnoty frekvence nastavujte z celého doporučeného intervalu 10Hz až 300kHz.
- d) Abyste si mohli naměřené hodnoty vytisknout, je zapotřebí změřit minimálně 20 hodnot. Tisk se provádí na záložce „Nastavení a tisk“.
- e) Jednotlivé hodnoty lze smazat kliknutím na příslušný řádek v tabulce a stisknutím klávesy „Delete“. Pokud je zapotřebí měření z nějakého důvodu celé opakovat, je možné smazat naměřená data a nastavení proudu na záložce programu „Nastavení a tisk“.

- f) Při konstrukci grafu přenosové charakteristiky **použijeme logaritmické dělení na ose frekvencí i na ose napětí**. Z grafu pak určíme kmitočet  $f_k$ , při kterém klesne napětí  $U'_{det}$

na hodnotu  $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U'_{det, 100 \text{ Hz}}$ , kde  $U'_{det, 100 \text{ Hz}}$  je hodnota napětí při frekvenci 100 Hz.

**Kmitočet  $f_k$  určuje kmitočtový rozsah optronu.** Postup jeho určení do grafu znázorněte.

### V laboratoři

si na závěr vytisknete kompletní tabulky všech měření, včetně příslušných parametrů. **Před tiskem hodnot** v záložce „Nastavení a tisk“ **je nutno zadat jméno**, které slouží k rozlišení vytisknutých listů na společné síťové tiskárně. Nastavení tiskárny lze měnit stiskem tlačítka

„*Printer Setup*“. Tím se spustí dialog výběru tiskárny (není nutné nastavovat). Samotný tisk se spustí kliknutím na tlačítko „*Print*“.

### **Doma** pak

- sestrojte všechny grafy proměřených závislostí (např. v MS Excel),
- z V-A charakteristiky LED určete součinitel  $n$ ,
- do grafu přenosové charakteristiky optronu vyznačte jeho vypočítaný kmitočtový rozsah.

Nezapomeňte, že pro účely výpočtu koeficientu  $n$  musíte pracovat pouze s exponenciální částí V-A charakteristiky (poznáte ji podle toho, že v semilogaritmickém zobrazení bude přímková), graf tedy pro tyto účely zobrazte ještě jednou.