Martin Beránek, 2.F, X–11

Úloha 5 – Charakteristiky optoelektronických součástek

Pracovní úkol:

1. Změřte voltampérové a světelné charakteristiky červené a zelené luminiscenční diody v propustném směru a určete, z jakého materiálu jsou jednotlivé diody zhotoveny.
2. Ze změřených V–A charakteristik určete pro jednotlivé diody statický odpor R_d, dynamický odpor R_di, hodnotu konstanty n a prahové napětí $U^\star$.
3. Změřte charakteristiky fototranzistoru při třech různých hladinách osvětlení.
4. Ověřte linearitu světelné charakteristiky fotonky 1PP 75 v hradlovém režimu. Stanovte zisk fototranzistoru. Vyberte U_CE v oblasti I_CO.
5. Naměřené charakteristiky zpracujte graficky. Nezapomeňte na graf $\ln(I_\mathrm{F})$ vs. U_F.

Teorie: Proud tekoucí PN přechodem luminiscenční diody při připojení napětí U_F se dá vyjádřit vztahem (viz [2])

$$I_\mathrm{F} = I_0 \left\{ \exp\left[\frac{e(U_\mathrm{F} - I_\mathrm{F} R_\mathrm{S})}{nkT} \right] - 1 \right\}, \tag{1}$$

kde I_F je proud tekoucím přechodem, I_0 zbytkový proud, R_S sériový odpor diody mimo samotného přechodu, n bezrozměrná konstanta charakterizující vlastnosti přechodu a T termodynamická teplota. Pokud platí $U_\mathrm{F} \gg I_\mathrm{F} R_\mathrm{S}$, můžeme vliv sériového odporu zanedbat. Toto zjednodušení je možné hlavně pro U_F přibližně menší než prahové napětí. Při vyšších hodnotách napětí podstatně narůstá proud diodou a tato nerovnost už nemusí být splněna.

Pokud je navíc exponenciální člen řádově větší než jednička (podle [2] při pokojové teplotě tehdy, pokud platí $U_\mathrm{F} \geq 100\,\mathrm{mV}$), lze vztah (1) dále zjednodušit na tvar

$$I_\mathrm{F} = I_0 \exp\left(\frac{eU_\mathrm{F}}{nkT} \right). \tag{2}$$

Zlogaritmováním vztahu (2) pak získáme

$$\ln(I_\mathrm{F}) = C_1 + \frac{e}{nkT} U_\mathrm{F}, \tag{3}$$

tedy v oblasti napětí, pro která platí (2) bude závislost mezi logaritmem proudu a napětím lineární. Směrnice pak určuje hodnotu konstanty $e/(nkT)$ a mohu z ní tedy určit i n.

Odpor diody v daném bodě I_F0, U_F0 je možné vyjádřit jako statický definovaný vztahem

$$R_\mathrm{d} = \frac{U_\mathrm{F0}}{I_\mathrm{F0}}. \tag{4}$$

Nebo jako dynamický odpor R_di, který je definován

$$R_\mathrm{di} = \left. \frac{\mathrm{d}U_\mathrm{F}}{\mathrm{d}I_\mathrm{F}} \right|_{I_\mathrm{F0}}. \tag{5}$$

Prahové napětí diody $U^\star$ je možné určit z voltampérové charakteristiky. Je to napětí, ve kterém směrnice lineární části protíná vodorovnou osu. Toto napětí přibližně odpovídá (je mírně vyšší) šířce zakázaného pásu polovodiče.

Při osvětlení báze fototranzistoru se projeví dva efekty. Minoritní nosiče v bázi (v případě NPN tranzistoru elektrony), které vzniknou dopadajícím světlem, přechází do kolektoru a tvoří v obvodu primární fotoproud I_Φ. Majoritní nosiče zůstávají v bázi a snižují potenciálovou bariéru.

Samotný primární fotoproud je možné měřit pokud spojíme bázi s emitorem. Tranzistor se pak chová jako fotodioda a naměřený proud je pouze I_Φ. Pokud toto propojení zrušíme, projeví se zesílení fototranzistoru a celkový kolektorový proud bude

$$I_\mathrm{CO} = G I_\Phi, \tag{6}$$

kde G je zisk fototranzistoru závisející na osvětlení báze.

MĚŘENÍ: Vzhledem k malému odporu diody je vhodné měřit její voltampérovou charakteristiku voltmetrem připojeným přímo k diodě a s ampérmetrem před ním. Vysílaný zářivý tok jsem měřil pomocí fotodiody a připojeného galvanometru. Vzhledem k tomu, že aparatura není zkalibrovaná na konkrétní hodnoty světelného toku, jsou získané údaje pouze relativní, ovšem za předpokladu lineární charakteristiky fotodiody úměrné skutečnému zářivému toku. Jistou nepřesnost působí přepínání měřicích rozsahů galvanometru, při kterém se změní jeho vnitřní odpor a tedy i napětí na fotodiodě.

Měřil jsem charakteristiky dvou diod – LQ1731 (zelená) a LQ1131 (červená). Naměřené hodnoty proudu a světelného toku jsou v tabulce 1. Světelný tok je udáván v dílcích stupnice galvanometru.

LQ1731						**LQ1131**					
U [V]	I [mA]	I_Φ	U [V]	I [mA]	I_Φ	U [V]	I [mA]	I_Φ	U [V]	I [mA]	I_Φ
0,165	0,0000	0	1,845	2,15	1	0,174	0,0000	0	1,650	14,10	30
0,220	0,0000	0	1,850	2,36	1	0,388	0,0000	0	1,660	16,21	34
0,600	0,0000	0	1,866	3,00	1	0,833	0,0000	0	1,670	18,40	38
1,194	0,0000	0	1,872	3,33	1	1,263	0,0026	0	1,680	20,6	43
1,478	0,0006	0	1,880	3,72	1,5	1,345	0,0144	0	1,699	25,0	65
1,502	0,0011	0	1,890	4,24	2	1,401	0,0509	0	1,710	28,6	72
1,639	0,0208	0	1,901	4,87	2	1,449	0,1602	0	1,714	30,0	77
1,660	0,0341	0	1,910	5,47	2,5	1,493	0,480	0,5			
1,685	0,0632	0	1,920	6,17	3	1,503	0,625	0,5			
1,695	0,0808	0	1,930	6,85	3	1,515	0,851	1			
1,703	0,0981	0	1,940	7,59	4	1,522	1,017	1			
1,716	0,1347	0	1,950	8,43	4,5	1,531	1,255	1,5			
1,720	0,1500	0	1,960	9,29	5	1,541	1,636	2			
1,732	0,1971	0	1,970	10,11	5,5	1,554	2,24	3			
1,762	0,410	0	1,980	11,02	6	1,561	2,64	4			
1,771	0,504	0	1,990	11,94	7	1,570	3,27	5,5			
1,780	0,612	0	2,00	12,79	7,5	1,580	4,12	7,5			
1,786	0,700	0	2,02	15,34	9	1,590	5,03	9,5			
1,793	0,811	0	2,04	17,31	11	1,601	6,31	13			
1,801	0,968	0	2,07	20,6	13,5	1,610	7,53	16			
1,812	1,199	0	2,10	23,8	16	1,620	8,87	19,5			
1,824	1,500	0	2,13	27,4	19	1,630	10,47	23			
1,830	1,685	0,5	2,15	30,0	21	1,639	12,18	26,5			

Tabulka 1 – VA charakteristiky svítivých diod

Hodnoty proudu diodami jsou vyneseny v grafu 1. Je vidět předpokládaný kvalitativní tvar křivky odpovídající PN přechodu. Pokud pravou lineární částí grafu proložím přímku

$$I_\mathrm{F} = aU_\mathrm{F} + b\,, \tag{7}$$

mohu určit prahové napětí diody jako

$$U^\star = -\frac{b}{a}\,. \tag{8}$$

Chyba určení koeficientů ve vztahu (7) se přesně těžko určuje, ale obecně platí, že pro přesnější určení koeficientů je potřeba větší rozsah hodnot, čímž se ale dostávám mimo lineární část grafu. Ze statistické odchylky regrese a z rozdílů hodnot při použití dat z různě velkých rozsahů napětí odhaduji chybu $U^\star$ na $\pm 0{,}1$ V.

Pro diodu LQ1731 vychází z regrese $a = 117\,\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-1}$ a $b = -223\,\mathrm{mA}$. Její prahové napětí je tedy

$$U_1^\star = (1{,}9 \pm 0{,}1)\,\mathrm{V}\,.$$

Pro LQ1131 pak $a = 261\,\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-1}$, $b = -418\,\mathrm{mA}$ a prahové napětí potom

$$U_2^\star = (1{,}6 \pm 0{,}1)\,\mathrm{V}\,.$$

Statický i dynamický odpor diod určím při proudu $I_{\mathrm{F}0} = 20\,\mathrm{mA}$. Statický odpor lze určit jednoduše podle vztahu (4). Vzhledem k tomu, že nemám určeno napětí $U_{\mathrm{F}0}$ přesně pro proud $I_{\mathrm{F}0}$, získám potřebnou

hodnotu lineární interpolací (naměřené hodnoty jsou dostatečně blízko a charakteristika je v těchto místech téměř lineární, takže tím nezpůsobím nijak velkou chybu). Hodnotu dynamického odporu pak určím ze směrnice u přímky procházející bodem $[U_{F0}, I_{F0}]$. Tuto směrnici získám lineární regresí, přičemž jsem použil naměřené body okolo U_{F0} v rozsahu 0,1 V.

Pro LQ1731 vychází $U_{F0} = 2{,}065\,\mathrm{V}$. Chyba přístrojů nebyla udána, ale vzhledem k tomu, že jde o digitální přístroje se čtyřmístným displayem, předpokládám, že může být přibližně 0,5 % rozsahu. Měřené hodnoty jsou přesně na hranici dvou rozsahů přístrojů, takže skutečná chyba vychází na 5 % měřené hodnoty. Výsledný statický odpor je tedy

$$R_{d1} = (100 \pm 10)\Omega\,.$$

Dále jsem lineární regresí získal směrnici $u = 106\,\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-1}$. Statistická chyba regrese je poměrně malá ($\pm 2\,\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-1}$), ale výsledná hodnota znatelně závisí na množství bodů vybraných pro regresi a také se v ní projeví systematické chyby měřících přístrojů. Předpokládám, že výsledná chyba bude přibližně 5 %. Dynamický odpor získám jako převrácenou hodnotu směrnice, tedy

$$R_{di1} = (9{,}4 \pm 0{,}5)\,\Omega\,.$$

U diody LQ1131 je odpovídající napětí $U_{F0} = 1{,}677\,\mathrm{V}$. Tato hodnota je v horní části rozsahu, což příznivě ovlivní výslednou chybu. Statický odpor této diody je tedy

$$R_{d2} = (84 \pm 4)\Omega\,.$$

Směrnice v bodě $[U_{F0}, I_{F0}]$ vychází $u = (230 \pm 10)\,\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-1}$. Opět se zde projevuje navíc chyba způsobená měřícími přístroji a výběrem rozsahu dat pro regresi. Za předpokladu výsledné chyby 15 % vychází dynamický odpor

$$R_{di2} = (4{,}4 \pm 0{,}7)\,\Omega\,.$$

V grafu 2 jsou vyneseny závislosti logaritmu proudu diodou na napětí. V oblasti, kde platí vztah (2) je tato závislost lineární a ze směrnice je možné určit konstantu n. Při těchto napětích je ztrátový výkon na diodě řádově desetiny miliwatu, takže budu předpokládat, že teplota přechodu je mírně vyšší, než okolní teplota. Odhaduji $T = (300 \pm 10)\,\mathrm{K}$. Při určování směrnice je opět problém v tom, které naměřené body ještě zahrnout do regrese. Vztah (2) neplatí úplně přesně, takže je potřeba najít body, ve kterých ještě nevadí jím způsobená systematická chyba. Konkrétní rozsah jsem určil tak, aby proložená přímka dobře odpovídala příslušné části grafu (ze subjektivního hlediska).

Pro LQ1731 vychází směrnice $(22{,}9 \pm 0{,}2)\,\mathrm{V}^{-1}$. Z toho pak $n_1 = 1{,}69 \pm 0{,}07$. Pro druhou diodu – LQ1131 – je směrnice grafu $(23{,}4 \pm 0{,}3)\,\mathrm{V}^{-1}$ a odpovídající konstanta $n_2 = 1{,}65 \pm 0{,}05$.

Světelné charakteristiky obou diod jsou v grafu 6. Na svislé ose je vynášen proud galvanometrem připojeným k fotodiodě.

Při měření voltampérové charakteristiky tranzistoru je vzhledem k malému proudu naopak vhodné použít zapojení, kdy je voltmetr připojen až přes ampérmetr. Tranzistor jsem měřil při třech různých intenzitách osvětlení báze daných proudem I_d svítivou diodou – 0,2, 0,4 a 0,6 mA. Maximální ztrátový výkon tohoto tranzistoru je 50 mW, takže z toho vychází maximální povolené hodnoty napětí a proudu podle grafu 7. Při měření byl proud tekoucí tranzistorem řádově nižší než maximální povolený. Naměřené hodnoty proudu v závislosti na napětí mezi kolektorem a emitorem jsou uvedeny v tabulce 2.

Graf 3 zobrazuje VA charakteristiku tranzistoru pro tyto tři různé úrovně osvětlení. V grafu 4 je vynesena závislost ztrátového výkonu tranzistoru na osvětlení a napětí U_{CE}.

Pro každé osvětlení jsem navíc změřil proud I_{CO} při spojené bázi a emitoru. Z toho je možné určit zisk tranzistoru podle vztahu (6). Měřil jsem proud vždy při napětí $U_{CE} = 8\,\mathrm{V}$. Získané hodnoty jsou v tabulce 3.

0,2 mA			**0,4 mA**			**0,6 mA**		
$I_{CO}\ [\mu A]$	$I_\Phi\ [\mu A]$	G	$I_{CO}\ [\mu A]$	$I_\Phi\ [\mu A]$	G	$I_{CO}\ [\mu A]$	$I_\Phi\ [\mu A]$	G
164	1	164	900	3	300	2130	5,7	374
170	0,5	340	830	2	415	2120	5	424
170	0,5	340	900	2	450	2100	4,8	438

Tabulka 3 – zisk fototranzistoru

0,2 mA		**0,4 mA**		**0,6 mA**	
U_{CE} [V]	I_{CO} [μA]	U_{CE} [V]	I_{CO} [μA]	U_{CE} [V]	I_{CO} [μA]
0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000
0,0093	0,015	0,0098	0,065	0,0102	0,150
0,0250	0,045	0,0198	0,135	0,0211	0,315
0,0342	0,075	0,0325	0,260	0,0314	0,600
0,0489	0,150	0,0447	0,475	0,0438	1,050
0,0652	0,250	0,0560	0,750	0,0523	1,500
0,0817	0,450	0,0678	1,200	0,0636	2,350
0,0961	0,700	0,0810	1,900	0,0765	4,50
0,1063	0,950	0,0888	2,450	0,0878	6,50
0,1183	1,350	0,1003	4,30	0,0972	8,50
0,1265	1,650	0,1109	5,75	0,1062	11,00
0,1340	1,950	0,1217	7,60	0,1129	13,00
0,1437	2,350	0,1340	10,10	0,1225	16,50
0,1504	3,25	0,1402	11,50	0,1329	20,50
0,1623	4,00	0,1565	15,60	0,1445	30,0
0,1705	4,50	0,1727	19,65	0,1653	41,5
0,1825	5,10	0,1838	22,25	0,1752	49,0
0,1983	5,65	0,208	31,5	0,1831	54,0
0,205	6,00	0,227	35,0	0,1962	60,0
0,241	6,75	0,273	39,0	0,221	73,5
0,260	7,00	0,301	40,0	0,248	84,0
0,280	7,00	0,446	40,5	0,269	88,5
0,320	7,10	1,042	41,0	0,292	90,5
0,472	7,15	1,980	41,5	0,374	95,0
0,670	7,15	3,00	43,0	0,609	95,5
1,066	7,25	4,06	44,0	1,281	98,5
1,351	7,45	5,01	45,0	1,941	99,5
1,751	7,50	6,05	45,0	3,15	100,5
2,28	7,50	7,00	45,0	4,20	103,0
2,97	7,60	8,00	45,0	5,15	105,0
3,43	7,60			6,66	105,5
4,26	7,75			8,00	106,5
5,10	7,90				
6,12	7,95				
7,10	8,00				
8,00	8,00				

Tabulka 2 – VA charakteristika fototranzistoru

Průměrné hodnoty zisku tranzistoru spolu se statistickou odchylkou jsou pak následující

$$G(0{,}2\,\mathrm{mA}) = 300 \pm 100\,, \qquad G(0{,}4\,\mathrm{mA}) = 390 \pm 80\,, \qquad G(0{,}6\,\mathrm{mA}) = 410 \pm 30\,.$$

Posledním měřením je zjištění závislosti fotoproudu vznikajícího ve fotodiodě na světelném toku, který na ni dopadá. Jako zdroj světla byl použit He-Ne laser a tok jsem reguloval šedými filtry. Proud jsme měřil galvanometrem připojeným přímo k fotodiodě. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4. Světelný tok Φ je udáván relativně vůči toku vycházejícímu z laseru. Hodnoty odpovídající jednotlivým filtrům uvádím podle [1], str. 189.

filtr č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Φ/Φ_0	0,76	0,69	0,38	0,26	0,15	0,11	0,063	0,018	0,011	0,0050
I_Φ [μA]	118	98	60	40	21,5	15,5	8,8	2,25	1,48	0,70

Tabulka 4 – světelná charakteristika fotodiody 1PP 75

Naměřené hodnoty jsem proložil přímkou. Tato přímka prochází počátkem, protože při nulovém osvětlení fotodiody je nulový i generovaný proud. Konstanta úměrnosti pak vyšla $a = (150 \pm 3)\,\mathrm{mA}$ (na celkový výkon laseru). Grafická závislost a proložená přímka je v grafu 5.

DISKUZE: Prahové napětí diody LQ1731 vyšlo přibližně 1,9 V. Pokud je dioda vyrobena ze směsi galia, arsenu a fosforu, pak by (podle [1], str. 86 a 185) měla mít složení $GaAs_{0,5}P_{0,5}$ (vycházím z předpokladu

zmíněného ve [2], str. 86, že prahové napětí se mění lineárně se změnou poměru arsenu a fosforu). U diody LQ1131 vyšlo prahové napětí přibližně 1,6 V. To podle stejných úvah znamená, že pravděpodobné složení materiálu je $GaAs_{0,8}P_{0,2}$. Rozdíl barev diod také odpovídá rozdílným prahovým napětím. Dioda LQ1131 s nižším prahovým napětím září více v delších vlnových délkách s menší energií.

Znatelně přesnější hodnoty prahového napětí se pouze měřením voltampérové charakteristiky asi získat nedají. Hlavním omezením tu totiž je to, že graf není nikde přesně lineární a jde jen o to, jak velkou část budu za lineární považovat.

V grafu 2 je vidět, že předpoklad o platnosti vztahu (2) až do napětí přibližně odpovídajícímu prahovému platí velmi dobře. Z lineární části charakteristiky je navíc možné získat konstantu n, ale je nutné znát teplotu přechodu. Tu jsme pouze odhadoval, takže se tím přidává další chyba.

Z grafu 5 je vidět, že světelná charakteristika fotodiody dobře odpovídá lineární závislosti generovaného proudu na dopadajícím světelném toku. Relativní odchylky jednotlivých změřených hodnot od lineární závislosti jsou přibližně pět procent. Hodnotu proudu při relativním světelném toku 0,018, která se odchyluje asi o 16 %, budu považovat za náhodnou hrubou chybu. Všechny ostatní odchylky jsou pak menší než deset procent. Proud jsem měřil galvanometrem MG 5, jehož udávanou přesnost ale neznám. Mohu ji odhadnout na několik procent. Další odchylky jsou ve světelném toku dopadajícím na fotodiodu (optická hustota filtrů je udána pouze na dvě platná místa). Dále je zde systematická chyba daná tím, že fotodioda nepracuje přesně v hradlovém režimu (galvanometr má nenulový vnitřní odpor) a navíc se odpor zátěže v průběhu měření (při přepnutí rozsahů galvanometru) podstatně změní – udávaný vnitřní odpor je 80 Ω pro první rozsah a 500 Ω pro další.

Naměřené hodnoty zisku fototranzistoru jsou zatíženy velkou chybou hlavně kvůli nutnosti měřit velmi malé proudy při zkratované bázi tranzistoru. To by se možná dalo vyřešit změřením více hodnot pro různá osvětlení a následným proložením získaných dat. Ale pro nízké osvětlení báze se tím situace stejně příliš nezlepší.

Zjištěné hodnoty zisku tranzistoru alespoň řádově odpovídají předpokládaným a je také vidět, že s rostoucím osvětlením báze zisk roste.

ZÁVĚR: Určil jsem vlastnosti jednotlivých svítivých diod – pro LQ1731 to je statický odpor $R_{\mathrm{d}1} = (100 \pm 10)\Omega$, dynamický odpor $R_{\mathrm{di}1} = (9{,}4 \pm 0{,}5)\,\Omega$ a prahové napětí $U_1^\star = (1{,}9 \pm 0{,}1)$ V. Konstanta charakterizující přechod je $n_1 = 1{,}69 \pm 0{,}07$. Z toho mohu odhadovat, že složení polovodiče je $GaAs_{0,5}P_{0,5}$. Pro LQ1131 vychází statický odpor $R_{\mathrm{d}2} = (84 \pm 4)\Omega$, dynamický odpor $R_{\mathrm{di}2} = (4{,}4 \pm 0{,}7)\,\Omega$ a prahové napětí $U_2^\star = (1{,}6 \pm 0{,}1)$ V. Konstanta $n_2 = 1{,}65 \pm 0{,}05$. Opět mohu z prahového napětí usuzovat na složení polovodiče – nejlépe odpovídá slitina $GaAs_{0,8}P_{0,2}$.

Voltampérové a svítivé charakteristiky obou diod (viz graf 1 a 6) odpovídají teoretickým předpokladům. Vztah (2) platí dostatečně přesně pouze pro napětí menší než prahové.

Změřil jsme voltampérovou charakteristiku fototranzistoru (viz graf 3) a určil zisk pro tři různé úrovně osvětlení báze. Vychází následující hodnoty

$$G(0{,}2\,\mathrm{mA}) = 300 \pm 100\,, \qquad G(0{,}4\,\mathrm{mA}) = 390 \pm 80\,, \qquad G(0{,}6\,\mathrm{mA}) = 410 \pm 30\,.$$

V grafu 4 je zobrazena závislost ztrátového výkonu v tranzistoru na napětí U_{CE}.

V rozsahu měřených světelných toků jsme ověřil linearitu světelné charkteristiky fotodiody 1PP 75 s přesností nejméně ±10 %. Naměřené hodnoty spolu s proloženou přímkou jsou v grafu 5.

LITERATURA:

[1] I. Pelant, J. Fiala, J. Fänhrich, J. Pospíšil: Fyzikální praktikum III. – Optika, Karolinum, Praha 1993

[2] elektronické texty k úlohám praktika