

1 Pracovní úkoly

1. Změřte voltampérové a světelné charakteristiky připravených luminiscenčních diod 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^* .
3. Změřte charakteristiky fototranzistoru při třech různých hladinách osvětlení.
4. Naměřené charakteristiky zpracujte graficky. Nezapomeňte na graf $\ln(I_F)$ vs. U_F .

2 Teoretická část

2.1 Luminiscenční diody

Luminiscenční dioda je založena na emisi fotonů z oblasti polovodičového P-N přechodu, kterým prochází proud. Při nízkém připojeném napětí se dá proud I_F tekoucí diodou vyjádřit jako

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

kde I_0 je zbytkový proud, k Boltzmanova konstanta, e náboj elektronu, T absolutní teplota, U_F je napětí na diodě a n bezrozměrná konstanta závislá na vlastnostech použitého materiálu, výrobní technologii apod. Při napětích nad 100 mV můžeme navíc jedničku ve vztahu (1) zanedbat. Zlogaritmováním pak dostaneme

$$\ln(I_F) = C_1 + \frac{e}{nkT} U_F, \quad (2)$$

kde C_1 je konstanta.

2.2 Charakteristiky diody

Pro daný pracovní bod I_{F_0} a U_{F_0} určíme statický odpor definovaný jako

$$R_d = \frac{U_{F_0}}{I_{F_0}}, \quad (3)$$

a dynamický odpor vyjádřený vztahem

$$R_{di} = \left. \frac{dU_{F_0}}{dI_{F_0}} \right|_{I_{F_0}}. \quad (4)$$

Prahové napětí U^* je takové napětí extrapolované z lineární části V-A charakteristiky, při které dochází ke zlomu v linearizovaném průběhu závislosti proudu tekoucího diodou (průnik směrnice lineární části s vodorovnou osou). Toto napětí je přibližně rovno šířce zakázaného pásu polovodiče. Prahové napětí je u diod z GaAs přibližně 1.4 V, u diod z GaP asi 2.4 V. U diod z obou sloučenin se prahové napětí pohybuje v rozmezí těchto dvou hodnot v závislosti na koncentraci.

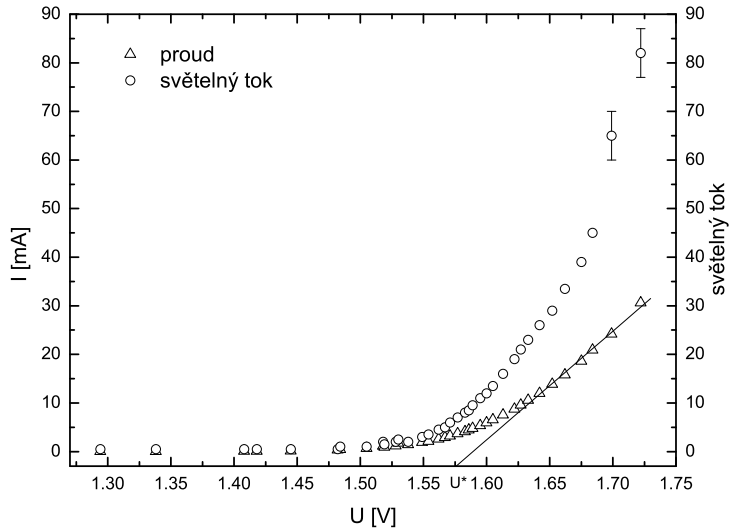
2.3 Fototranzistor

Při osvětlení báze fototranzistoru dochází k uvolnění minoritních nosičů náboje, které přecházejí do kolektoru a vytvářejí primární fotoproud I_Φ . Majoritní nosiče zůstávají v bázi a snižují potenciálovou bariéru.

Pokud propojíme (zkratujeme) bázi s emitorem, chová se tranzistor jako obyčejná fotodioda a naměřený proud je pouze I_Φ . Pokud toto propojení zrušíme, naměříme zesílený kolektorový proud I_{CO} . Mezi těmito proudy platí vztah

$$I_{CO} = GI_\Phi, \quad (5)$$

kde G je zisk tranzistoru závislý na osvětlení báze.



Obrázek 1: Závislost proudu a světelného toku na napětí pro diodu LQ1131. Plnou čarou je zaznačeno proložení lineární části křivky pro určení U^* . Měření s nejmenší hodnotou napětí (1.04 V) není pro zpřehlednění grafu vyneseno. Chyby měření jsou vyneseny pouze pokud jsou větší než velikost symbolu.

3 Měření

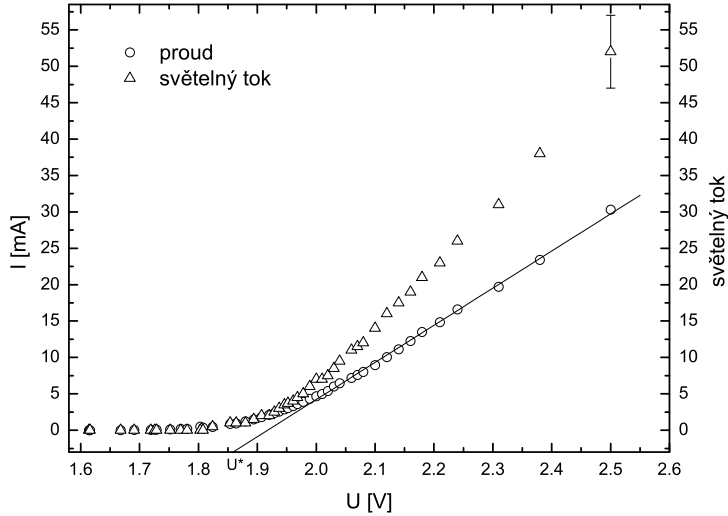
Proudy a napětí u elektroluminiscenčních diod jsem měřil pomocí digitálních přístrojů; světelný tok a proud v případě fototranzistoru pomocí galvanometru. V Tabulce 1 jsou uvedena měření proudu, napětí a světelného toku diody LQ1131. V Tabulce 2 jsou uvedeny zjištěné hodnoty pro zelenou diodu, která byla těsně před měřením vyměněna za nový exemplář (*nejedná se tedy o LQ1731*). Světelný tok je uveden v relativních jednotkách za předpokladu, že fotodioda použitá k detekci záření měla lineární odpověď na dopadající signál. Chybu měření předpokládám v řádu poslední cifry digitálního přístroje použitého k měření (byl měněn rozsah). Jako chybu měření pomocí galvanometru uvažuji půl dílku stupnice (byl měněn rozsah). Grafická znázornění závislostí proudu a světelného toku na napětí jsou uvedena na Obrázcích 1 (LQ1131) a 2 (zelená dioda).

Charakteristiky diod jsem určoval při nominální hodnotě napětí $I_{F_0} = 20$ mA. Hodnoty napětí (určené R_d) pro 20 mA jsem určil z Tabulek 1 a 2 pomocí lineární interpolace. Pro určení dynamického odporu R_{di} jsem okolí nominálního bodu proložil přímkou a určil směrnici dle vztahu (4). Hodnotu prahového napětí jsem zjistil proložení přímkou celou lineární částí V-A charakteristiky. Hodnotu konstanty n jsem zjistil z grafu $\ln(I_F)$ vs. U_F , jehož lineární část jsem proložil přímkou dle vztahu (2). Jako teplotu uvažuji $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$, hodnoty jiných potřebných konstant jsem získal z [2]. Chyby jsem získal standardní metodou šíření chyb. Výsledné hodnoty jsou

	LQ1131	zelená dioda
R_d [Ω]	84.0 ± 0.5	116 ± 4
R_{di} [Ω]	4.4 ± 0.2	19.0 ± 0.3
U^* [V]	1.59 ± 0.08	1.92 ± 0.03
n	1.61 ± 0.08	1.74 ± 0.09

Ze zjištěných hodnot prahových napětí vyplývá, že LQ1131 i zelená dioda jsou ze směsi GaAs a GaP, přičemž LQ1131 obsahuje více GaAs a zelená dioda více GaP.

V Tabulce 3 jsou uvedeny naměřené hodnoty V-A charakteristiky fototranzistoru pro tři různá osvětlení odpovídající proudům 0.2, 0.4 a 0.6 mA protékajícím luminiscenční diodou. Graficky je závislost zpracována



Obrázek 2: Závislost proudu a světelného toku na napětí pro zelenou diodu. Plnou čarou je zaznačeno proložení lineární části křivky pro určení U^* . Chyby měření jsou vyneseny pouze pokud jsou větší než velikost symbolu.

na Obrázku 5. Chyby měření jsou podobné jako u charakteristik luminiscenčních diod. Pro napětí 0.997 V jsem proměřil primární fotoproud I_Φ a kolektorový proud I_{CO} . Výsledné hodnoty a zisky tranzistoru jsou

I [mA]	0.2	0.4	0.6
I_Φ [μA]	0.03 ± 0.01	0.10 ± 0.02	0.25 ± 0.02
I_{CO} [μA]	6.75 ± 0.25	35.0 ± 2.5	89.0 ± 2.5
G	225 ± 75	350 ± 74	360 ± 30

4 Diskuse

Naměřené voltampérové a světelné charakteristiky luminiscenčních diod a fototranzistoru odpovídají předpokladům. Při zjišťování prahového napětí U^* a konstanty n je největším zdrojem chyb určení lineární části příslušné křivky, protože přechod do nelineární oblasti byl spojitý a měl jsem tedy jistou libovůli.

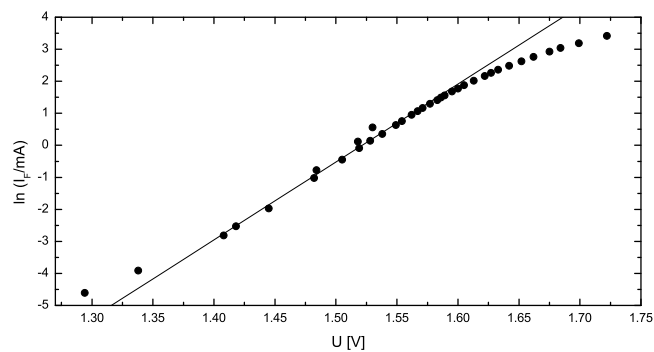
Zjištěné zisky fototranzistoru neodpovídají plně očekávání - pro proudy diodou 0.4 a 0.6 mA jsou téměř stejné. Tento nesoulad byl zjištěn již při měření a ani s pomocí lektorů se mi nepodařilo najít žádnou chybu v zapojení aparatury nebo jiný nedostatek. Nesoulad je zřejmě způsoben nepřesností měření primárního fotoproud, který je velmi malý, a temným proudem kolektoru.

5 Závěr

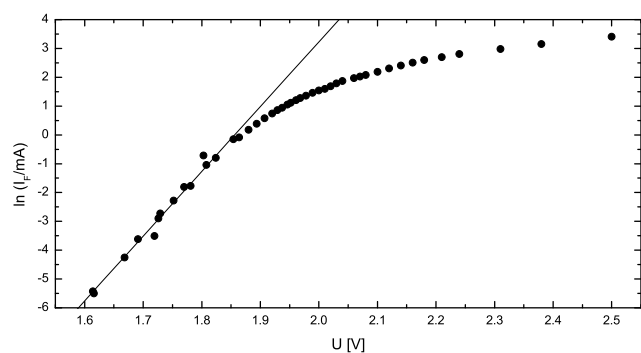
Ověřil jsem průběh voltampérových charakteristik luminiscenčních diod a fototranzistoru a určil jejich vlastnosti. Naměřené hodnoty jsem zpracoval graficky.

Reference

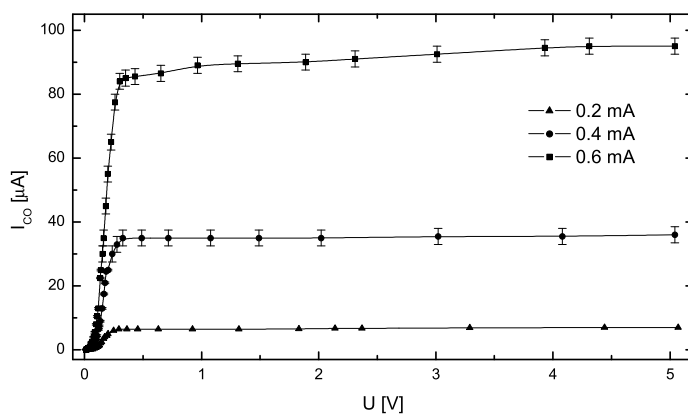
- [1] Studijní text k fyzikálnímu praktiku, úloha 5
- [2] Mikulčák, J. a kol., 1988, Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy. SPN, Praha.



Obrázek 3: Graf závislosti logaritmu proudu na napětí pro diodu LQ1131. Plnou čarou je zaznačeno proložení lineární části křivky použité pro určení konstanty n .



Obrázek 4: Graf závislosti logaritmu proudu na napětí pro zelenou diodu. Plnou čarou je zaznačeno proložení lineární části křivky použité pro určení konstanty n .



Obrázek 5: Voltampérová charakteristika fototranzistoru pro různá osvětlení. Chyby měření jsou vyneseny pouze pokud jsou větší než velikost symbolu.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro diodu LQ1131.

U [V]	I [mA]	světelný tok
1.038	0.01	0.5
1.294	0.01	0.5
1.338	0.02	0.5
1.408	0.06	0.5
1.418	0.08	0.5
1.445	0.14	0.5
1.482	0.36	0.5
1.484	0.46	1.0
1.505	0.64	1.0
1.518	1.13	2.0
1.519	0.92	1.5
1.528	1.15	2.0
1.530	1.75	2.5
1.538	1.43	2.0
1.549	1.88	3.0
1.554	2.14	3.5
1.562	2.59	4.5
1.567	2.92	5.0
1.571	3.21	6.0
1.577	3.66	7.0
1.583	4.11	8.0
1.586	4.47	8.5
1.589	4.77	9.5
1.595	5.37	11.0
1.600	5.90	12.0
1.605	6.54	13.5
1.613	7.54	16.0
1.622	8.73	19.0
1.627	9.60	21.0
1.633	10.58	23.0
1.642	12.00	26.0
1.652	13.84	29.0
1.662	15.81	33.5
1.675	18.6	39.0
1.684	20.9	45.0
1.699	24.2	65
1.722	30.6	82

Tabulka 2: Naměřené hodnoty pro zelenou diodu.

U [V]	I [mA]	světelný tok
1.614	0.0044	0.0
1.616	0.0041	0.0
1.668	0.0142	0.0
1.691	0.0268	0.0
1.719	0.0300	0.0
1.726	0.0554	0.0
1.729	0.0654	0.0
1.752	0.1020	0.0
1.770	0.1642	0.0
1.781	0.1700	0.0
1.803	0.492	0.0
1.808	0.352	0.0
1.824	0.450	0.5
1.854	0.865	1.0
1.864	0.920	1.0
1.880	1.20	1.0
1.894	1.48	1.5
1.907	1.78	2.0
1.920	2.11	2.0
1.929	2.36	2.5
1.937	2.57	3.0
1.946	2.86	3.5
1.952	3.04	3.7
1.961	3.33	4.0
1.968	3.58	4.5
1.978	3.91	5.0
1.989	4.31	6.0
2.00	4.66	7.0
2.01	4.96	7.0
2.02	5.40	7.5
2.03	6.01	8.5
2.04	6.47	9.5
2.06	7.19	11.0
2.07	7.60	11.5
2.08	8.01	12.0
2.10	8.93	14.0
2.12	10.06	16.0
2.14	11.12	17.5
2.16	12.26	19.0
2.18	13.50	21.0
2.21	14.84	23.0
2.24	16.59	26.0
2.31	19.7	31.0
2.38	23.4	38.0
2.50	30.3	52

Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro fototranzistor.

$I = 0.2$ mA		$I = 0.4$ mA		$I = 0.6$ mA	
U [V]	I [μ A]	U [V]	I [μ A]	U [V]	I [μ A]
0.0403	0.05	0.0149	0.05	0.0130	0.10
0.0536	0.10	0.0262	0.15	0.0134	0.15
0.0720	0.25	0.0381	0.30	0.0192	0.25
0.0861	0.45	0.0448	0.40	0.0296	0.45
0.0984	0.63	0.0524	0.55	0.0354	0.60
0.1137	1.00	0.0610	0.80	0.0577	1.75
0.1226	1.25	0.0713	1.15	0.0610	2.15
0.1284	1.55	0.0826	1.90	0.0633	2.50
0.1380	2.10	0.0868	2.35	0.0789	4.00
0.1458	2.50	0.0934	3.00	0.0881	5.50
0.1724	4.00	0.0997	3.50	0.1000	8.00
0.2010	5.00	0.1068	4.50	0.1099	10.50
0.2480	6.00	0.1198	6.50	0.1177	13.00
0.1910	4.50	0.1261	7.50	0.1349	22.50
0.1637	3.50	0.1354	9.00	0.1396	25.00
0.294	6.50	0.1521	13.00	0.1636	35.0
0.363	6.50	0.1668	17.50	0.1527	30.0
0.456	6.50	0.1753	21.0	0.1833	45.0
0.630	6.50	0.1858	24.5	0.198	55.0
0.923	6.50	0.202	25.0	0.227	65.0
1.319	6.50	0.236	30.0	0.260	77.5
2.37	6.70	0.277	33.0	0.300	84.0
3.29	6.90	0.328	35.0	0.350	85.0
5.07	7.00	0.489	35.0	0.431	85.5
4.44	7.00	0.716	35.0	0.653	86.5
2.14	6.70	1.489	35.0	0.966	89.0
1.83	6.60	1.076	35.0	1.310	89.5
		2.02	35.0	1.888	90.0
		3.02	35.5	2.31	91.0
		4.08	35.5	3.01	92.5
		5.04	36.0	3.93	94.5
				4.31	95.0
				5.04	95.0