

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM ...

Úloha č.

Název:

Pracoval: stud. skup. dne

Odevzdal dne:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval: dne

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. Určete zisk fototranzistoru.
4. Naměřené charakteristiky zpracujte graficky. Nezapomeňte na graf $\log(I_F)$ vs. U_F .

1 Teoretická část

1.1 Luminiscenční diody a jejich V-A a světelná charakteristika

Luminiscenční (LED = Light Emitting Diode) dioda je polovodičová součástka s PN přechodem (spojení polovodiče typu P a typu N), u níž se v zapojení v propustném směru uplatňuje elektroluminiscenční jev, emise fotonů z oblasti PN přechodu. Blíže o polovodičích a PN přechodu viz. [1].

Voltampérová charakteristika LED diody, tedy závislost proudu I procházejícího diodou (PN přechodem) na přiloženém napětí U , se za předpokladu, že $U \geq 100$ mV a zároveň $U \gg IR_S$ (R_S je sériový odpor diody), dá popsat přibližně vztahem [2]

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{nkT}\right), \quad (1)$$

kde I_0 je zbytkový proud při nulovém napětí, e náboj elektronu, k Boltzmannova konstanta, T absolutní teplota a n je dáno tvarem, technologií výroby, materiálem ad. PN přechodu. Charakterizuje tak mechanismus transportu náboje přechodem. Definice statického sériového odporu v pracovním bodě U_0, I_0 ¹

$$R_d = \frac{U_0}{I_0} \quad (2)$$

a sériového dynamického odporu

$$R_{di} = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{I_0}. \quad (3)$$

Z předcházejících vztahů pak vyplývá pro dynamický odpor

$$R_{di} = R_d \frac{nkT}{eU_0}. \quad (4)$$

Logaritmování rovnice (1) můžeme získat i n jako

$$n = \frac{e}{kT} \frac{U_1 - U_2}{\log \frac{I_1}{I_2}} = \frac{e}{kT} \frac{1}{C}, \quad (5)$$

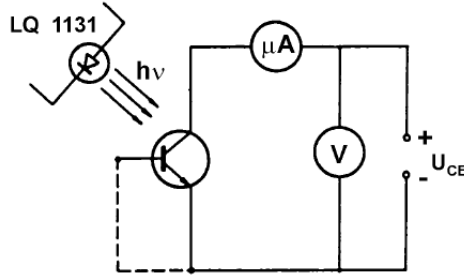
kde C je směrnice lineární části grafu závislosti $\log I$ na napětí U ².

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 [2, cit.]. Odečítáme ho z průsečíku přímky linearizované části V-A charakteristiky s x -ovou osou grafu.

Světelnou charakteristiku diod lze určit pomocí přistavené fotodiody a měřením velikosti proudu I_Φ , který prochází obvodem fotodiody při jejím osvětlení. Emitovaný světelný tok Φ tak zjišťujeme v relativních jednotkách.

¹Pracovní bod je dán $I_0 = 20$ mA.

²Kvůli logaritmování (\log značí přirozený logaritmus) veličiny s rozměrem je spíše vhodnější $\log \frac{I}{I_0}$



Obr. 1: Schéma pro měření charakteristiky fototranzistoru.

1.2 Fototranzistor

Fototranzistor má podobnou konstrukci jako běžný tranzistor skládající se ze tří na sebe navazujících oblastí PNP nebo NPN. K běžným vlastnostem přibývá schopnost pohlcovat světlo v oblasti báze, čímž zde vznikají páry nadbytečných menšinových nosičů proudu. Ty jsou strhávány polem kolektorového přechodu, kde poté tvoří tzv. primární fotoproud I_Φ , zatímco většinové nosiče zůstávají v bázi a vzniká tak objemový náboj, který snižuje potenciálovou bariéru emitorového přechodu, a tím mohou plnit funkci primárního proudu přiváděného do báze. Výsledný fotoelektrický proud v kolektoru I_{CO} je pak přibližně dán jako

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

kde G je zisk fototranzistoru. Charakteristika fototranzistoru se měří v zapojení na obr. 1, k určení zisku G použijeme stejného zapojení ale se zkratovaným emitorem s bází (čárkovaně). Jestliže při témže světelném toku Φ a témže napětí změříme I_{CO} , pak z (6) lze určit zisk G .

2 Výsledky měření

2.1 Zpracování

Není-li uvedeno jinak, chyby nepřímě měřených veličin (f) počítám podle [3]:

$$\sigma_{f(x_i)} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (7)$$

2.2 V-A charakteristika a světelná charakteristika LED diod

Použité diody LQ 1131 (červená) a L-934 LGD (zelená) byly přes ochranný odpor a miliampérmetr ke zjišťování proudu I připojeny v propustném směru ke stabilizovanému zdroji stejnosměrného napětí, přímo na nich pak paralelně zapojený digitální voltmetr k měření přiloženého napětí U . Proud generovaný na snímací fotodiodě I_Φ jsem odcítal z pikoampérmetru *HITACHI*. Voltmetr měl při použitím rozsahu 20 V chybu 0.1 % \pm 3 digit, miliampérmetr vždy 0.05 % použitého rozsahu (tedy poslední platnou číslici), chybu pikoampérmetru *HITACHI* odhaduji pro hodnoty do 0.200 μ A na 0.001 až 0.002 μ A, poté cca 1 % z naměřeného. Jako vztažnou hodnotu svět. toku Φ_0 jsem volil odpovídající proud 1 μ A ve fotodiodě, jednotlivá měření jsou pak vyjádřena relativně vůči Φ_0 v procentech. Výsledky se nachází v tabulce 1, závislosti jsou vyneseny v grafech na obr. 2, 3 a 4.

Lineární regresí posledních 15 naměřených hodnot u diody LQ 1131 a 17 u diody L-934 LGD v obecném tvaru $I = aU + b$ jsem získal koeficienty popisu linear. části závislosti v grafu na obr. 2. Pro červenou diodu (LQ 1131)

$$\begin{aligned} a_c &= (270 \pm 9) \text{ m}\Omega^{-1}, \\ b_c &= (-428 \pm 14) \text{ mA}, \end{aligned}$$

a pro zelenou diodu (L-934 LGD)

$$\begin{aligned} a_z &= (53.3 \pm 0.3) \text{ m}\Omega^{-1}, \\ b_z &= (-102.5 \pm 0.6) \text{ mA}. \end{aligned}$$

Dosažením do předpisu $I = aU + b$ a položením $I = 0$ mA dostáváme prahová napětí

$$\begin{aligned} U_c^* &= (1.59 \pm 0.07) \text{ V}, \\ U_z^* &= (1.92 \pm 0.02) \text{ V}. \end{aligned}$$

Volbou $I = I_0 = 20 \text{ mA}$ dopočteme U_0 v pracovním bodě diody a podle (2) její statický sériový odpor:

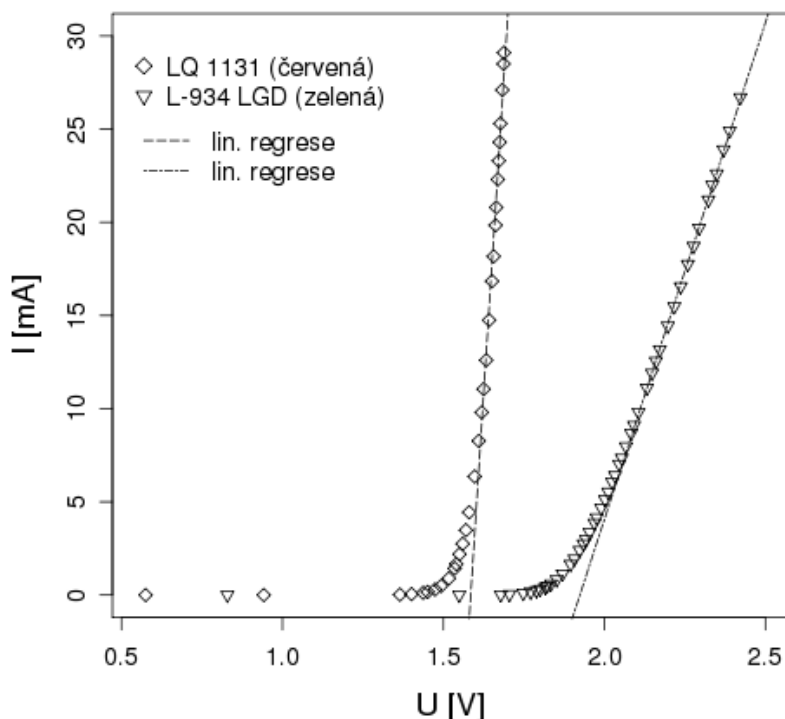
$$R_{dc} = (83 \pm 4) \Omega,$$

$$R_{dz} = (115 \pm 1) \Omega.$$

LQ 1131				L-934LGD			
U [V]	I [mA]	I_Φ [μA]	Φ/Φ_0 [%]	U [V]	I [mA]	I_Φ [μA]	Φ/Φ_0 [%]
0.575	0	0	0	0.829	0	0.001	0.1
0.942	0	0	0	1.549	0	0.001	0.1
1.365	0.021	0.001	0.1	1.678	0.020	0.001	0.1
1.401	0.049	0.002	0.2	1.705	0.037	0.001	0.1
1.437	0.118	0.004	0.4	1.748	0.101	0.002	0.2
1.451	0.167	0.005	0.5	1.771	0.169	0.002	0.2
1.474	0.297	0.010	1.0	1.789	0.243	0.003	0.3
1.493	0.488	0.018	1.8	1.800	0.310	0.004	0.4
1.517	0.892	0.039	3.9	1.816	0.424	0.005	0.5
1.535	1.427	0.073	7.3	1.822	0.478	0.006	0.6
1.540	1.657	0.088	8.8	1.834	0.598	0.008	0.8
1.550	2.19	0.126	12.6	1.852	0.828	0.011	1.1
1.560	2.75	0.169	16.9	1.870	1.139	0.017	1.7
1.570	3.48	0.228	22.8	1.895	1.652	0.027	2.7
1.580	4.44	0.309	30.9	1.907	1.942	0.033	3.3
1.597	6.36	0.481	48.1	1.923	2.40	0.044	4.4
1.610	8.27	0.657	65.7	1.935	2.75	0.052	5.2
1.619	9.80	0.799	79.9	1.943	2.98	0.059	5.9
1.625	11.05	0.915	91.5	1.954	3.36	0.069	6.9
1.633	12.60	1.060	106.0	1.969	3.87	0.083	8.3
1.642	14.75	1.259	125.9	1.976	4.15	0.091	9.1
1.651	16.84	1.453	145.3	1.990	4.67	0.106	10.6
1.656	18.17	1.577	157.7	2.002	5.12	0.120	12.0
1.662	19.84	1.726	172.6	2.012	5.53	0.132	13.2
1.664	20.8	1.796	179.6	2.024	6.06	0.148	14.8
1.669	22.3	1.931	193.1	2.033	6.42	0.160	16.0
1.672	23.3	2.019	201.9	2.046	7.02	0.178	17.8
1.675	24.3	2.099	209.9	2.054	7.35	0.188	18.8
1.677	25.3	2.171	217.1	2.067	7.97	0.208	20.8
1.683	27.1	2.339	233.9	2.083	8.68	0.230	23.0
1.687	28.5	2.440	244.0	2.092	9.11	0.240	24.0
1.688	29.1	2.485	248.5	2.106	9.81	0.265	26.5
—	—	—	—	2.132	11.10	0.304	30.4
—	—	—	—	2.148	11.91	0.329	32.9
—	—	—	—	2.160	12.55	0.348	34.8
—	—	—	—	2.172	13.17	0.366	36.6
—	—	—	—	2.197	14.44	0.404	40.4
—	—	—	—	2.217	15.48	0.434	43.4
—	—	—	—	2.237	16.55	0.465	46.5
—	—	—	—	2.259	17.75	0.499	49.9
—	—	—	—	2.277	18.72	0.525	52.5
—	—	—	—	2.294	19.69	0.550	55.0
—	—	—	—	2.323	21.2	0.591	59.1
—	—	—	—	2.335	22.0	0.608	60.8
—	—	—	—	2.349	22.6	0.627	62.7
—	—	—	—	2.370	23.9	0.656	65.6
—	—	—	—	2.389	24.9	0.681	68.1
—	—	—	—	2.422	26.7	0.724	72.4

Tabulka 1: Napětí na diodách U , procházející proud I , proud generovaný na fotodiodě I_Φ a světelný tok Φ vztažený k hodnotě Φ_0 odpovídající proudu $I_\Phi = 1 \mu\text{A}$.

V-A charakteristika luminiscenčních diod



Obr. 2: Voltampérová charakteristika LED diod, linearizovaná pro několik posledních hodnot.

Pro další zpracování použiji logaritmované hodnoty proudu I tak, jak je znázorněno v grafu na obr. 3³. Ze směrnice přímky popisující lin. část závislosti (lineární regrese několika prvních hodnot, odpovídající zahnutí v grafu na obr. 2) C , kterou identifikuji pomocí (1) jako $C = \frac{e}{nkT}$, určím nejprve podle (4) dynamický odpor $R_{di} = \frac{R_d}{CU_0}$ (U_0 získám jako výše)

$$R_{dic} = (2.00 \pm 0.11) \text{ m}\Omega,$$

$$R_{diz} = (2.26 \pm 0.04) \text{ m}\Omega.$$

Nakonec ještě dosazením Boltzmannovy konstanty $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ a elementárního náboje $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, při odhadnuté teplotě $T = 293.15 \text{ K}$ spočtu dle (5) n

$$n_c = (1.56 \pm 0.01),$$

$$n_z = (1.77 \pm 0.02).$$

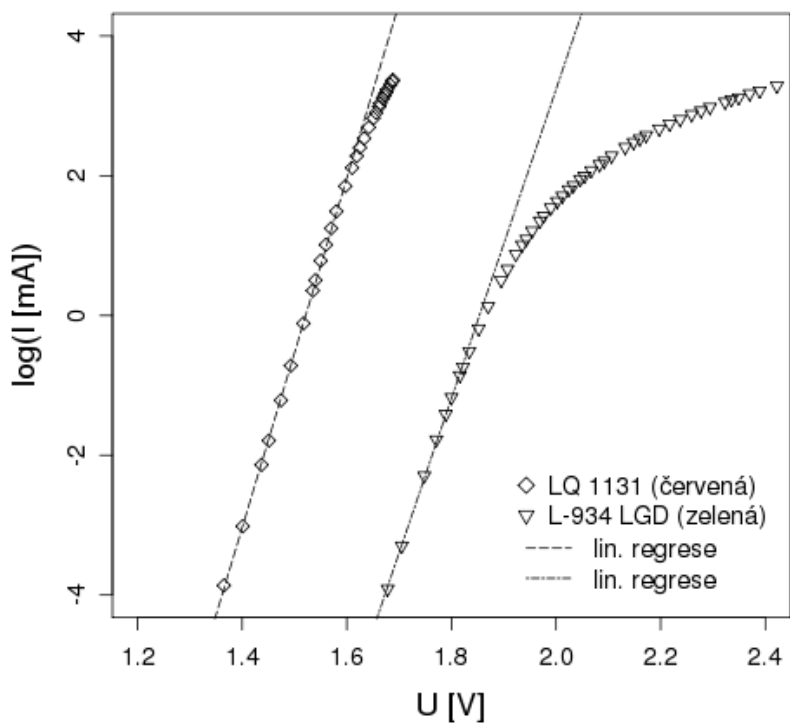
2.3 Fototranzistor

Voltampérovou charakteristiku fototranzistoru jsem měřil v zapojení na obr. 1. Za zdroj napětí a ampérmetr zároveň slouží přístroj *HITACHI*, původní stabilizovaný zdroj napájí LED diodu, která osvětluje fototranzistor. Měřil jsem při třech různých intenzitách osvětlení odpovídajících postupně velikostem proudu diodou $I_d = 0.2, 0.4$ a 0.6 mA . Přístroj *HITACHI* dokáže po správném nastavení sám krokově zvyšovat napětí U a změřená data ukládat do bufferu, ze kterého se pak přečtou počítačem. Krok byl volen do 0.2 V po 0.01 V , do 1 V po 0.05 V , výše po 0.5 V . Naměřená charakteristika se nachází v tabulce 2 a je vynesena v grafu na obr. 5 s konečnou částí proloženou přímkou.

Po zkratování emitoru s bází jsem při třech různých napětích U a všech třech intenzitách osvětlení změřil primární fotoproud tranzistorem I_Φ a z nich určil zisk tranzistoru G podle (6). Viz. tab. 3. Chybu pikoampérmetru při stanovení I_Φ odhaduji 5 %.

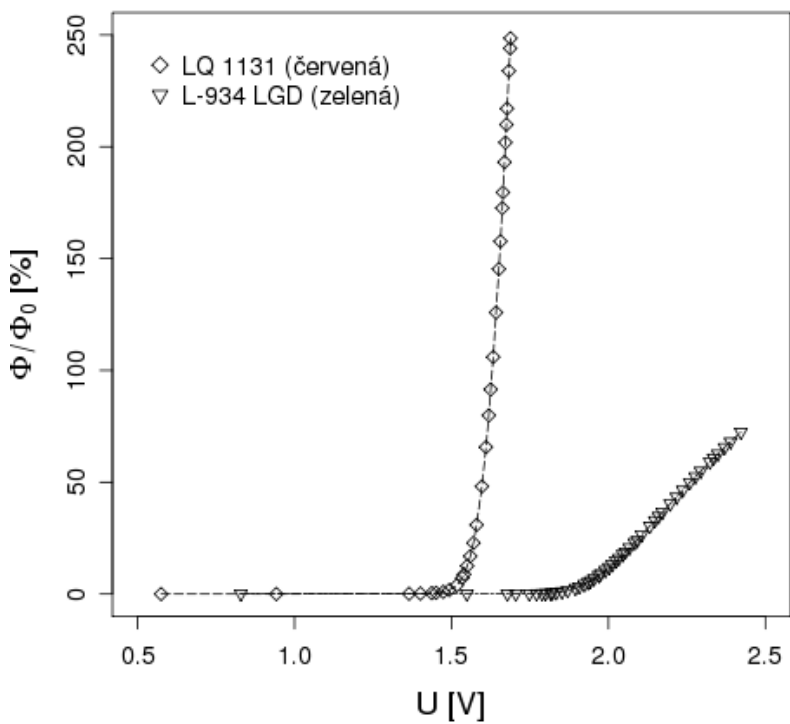
³Vhodnější by kvůli rozměrům veličin bylo vztah (1) nejprve dělit I_0 , logaritmovat a poté vynášet $\log I/I_0$ vs. U .

Logaritmovaná V-A charakteristika LED diod



Obr. 3: Logaritmoané hodnoty proudu procházejícího diodou I v závislosti na přiloženém napětí U proložené přímkou v počáteční lineární oblasti.

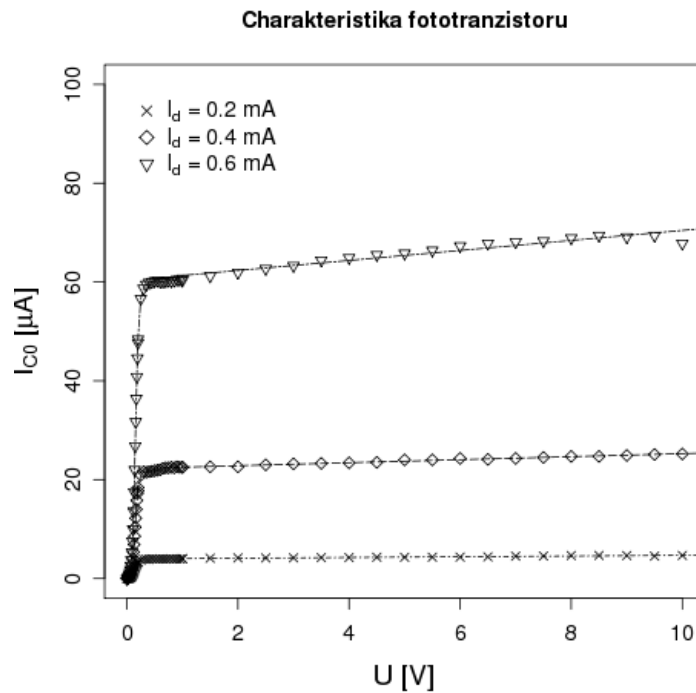
Světelná charakteristika luminiscenčních diod



Obr. 4: Graf světelné charakteristiky LED diod.

I_d [mA]	0.200	0.400	0.600	I_d [mA]	0.200	0.400	0.600
U [V]	I_{CO} [μ A]	I_{CO} [μ A]	I_{CO} [μ A]	U [V]	I_{CO} [μ A]	I_{CO} [μ A]	I_{CO} [μ A]
0.00	0	0	0	0.55	3.94	21.9	60.3
0.01	0.001	0.017	0.028	0.60	3.95	22.0	60.1
0.02	0.015	0.070	0.173	0.65	3.95	22.3	60.1
0.03	0.035	0.159	0.390	0.70	3.93	22.4	60.2
0.04	0.062	0.283	0.699	0.75	3.95	22.4	60.3
0.05	0.100	0.457	1.13	0.80	3.98	22.5	60.2
0.06	0.153	0.701	1.75	0.85	3.94	22.4	60.3
0.07	0.225	1.05	2.59	0.90	3.96	22.6	60.5
0.08	0.323	1.51	3.73	0.95	3.93	22.5	60.5
0.09	0.453	2.16	5.28	1.00	3.97	22.5	60.3
0.10	0.614	2.99	7.43	1.50	4.10	22.6	61.2
0.11	0.821	4.04	10.0	2.00	4.16	22.6	61.9
0.12	1.08	5.35	13.6	2.50	4.15	23.0	62.7
0.13	1.36	6.87	17.5	3.00	4.17	23.2	63.3
0.14	1.68	8.55	22.0	3.50	4.22	23.3	64.4
0.15	2.01	10.4	26.8	4.00	4.23	23.4	64.9
0.16	2.33	12.2	31.7	4.50	4.30	23.5	65.5
0.17	2.65	14.0	36.4	5.00	4.29	24.0	65.8
0.18	2.93	15.8	40.8	5.50	4.31	24.0	66.4
0.19	3.18	17.2	44.6	6.00	4.33	24.3	67.3
0.20	3.29	18.4	47.7	6.50	4.38	24.1	67.8
0.25	3.75	20.9	56.6	7.00	4.51	24.3	68.1
0.30	3.90	21.6	58.7	7.50	4.54	24.5	68.3
0.35	3.89	21.5	59.5	8.00	4.65	24.7	68.9
0.40	3.87	21.6	59.9	8.50	4.67	24.7	69.4
0.45	3.97	21.7	60.0	9.00	4.64	24.9	69.1
0.50	3.94	21.8	60.2	9.50	4.52	25.1	69.4
—	—	—	—	10.00	4.66	25.2	67.8

Tabulka 2: Proud luminiscenční diodou I_d , napětí kolektor-emitor U na fototranzistoru a kolektorový proud I_{CO} .



Obr. 5: Graf V-A charakteristiky fototranzistoru při různém osvětlení.

U [V]	I_{CO} [mA]	I_{Φ} [nA]	G
$I_d = 0.200 \text{ mA}$			
4.00	4.23	26	163 ± 7
5.00	4.29	26	165 ± 7
6.00	4.33	26	166 ± 7
$I_d = 0.400 \text{ mA}$			
4.00	2.34	97	242 ± 13
5.00	2.40	97	247 ± 13
6.00	2.43	97	250 ± 13
$I_d = 0.600 \text{ mA}$			
4.00	6.49	200	325 ± 17
5.00	6.58	210	314 ± 15
6.00	6.73	210	321 ± 16

Tabulka 3: Napětí U , proud kolektoru I_{CO} , fotoproud I_{Φ} a odpovídající zisk fototranzistoru G .

Průměrný zisk při jednotlivých proudech I_d

$$\begin{aligned} G_{0.2} &= (164 \pm 7), \\ G_{0.4} &= (256 \pm 13), \\ G_{0.6} &= (320 \pm 16). \end{aligned}$$

2.4 Materiál diod

Porovnáním zjištěných parametrů s [4] zjišťují, že zelená dioda označená jako L-934 LGD odpovídá přímo svým katalogovým údajům, výrobní materiál je pouze GaP bez příměsi arzenu. Červená L 1131 naopak nejspíše obsahuje příměsí jak arzenu tak fosforu ovšem s větším zastoupením arzenu, tedy GaAsP.

3 Diskuse výsledků

Změřené charakteristiky diod dobře odpovídají hrubě předpokládanému průběhu (nikoli teoretickému (1)). Problematičtější je vybrat vhodnou část dat k linearizaci, a to jak při určování prahových napětí tak ve vnesené závislosti logaritmovaného proudu. Statistická chyba (směr. odchylka z rozpylu dat) lineární regrese je dokonce relativně větší než chyby způsobené měřicími přístroji, které se pohybují v řádech desetin až jednoho procenta (s výjimkou např. nulových bodů, kdy proudy odečítané na pikoampérmetru *HITACHI* jsou extrémně malé). Na obr. 3 je také vidět, jak se obě charakteristiky odklánějí od teoretické exponenciální závislosti, u zelené diody navíc dosti značně.

V grafu charakteristiky fototranzistoru na obr. 5 je patrné, že oblast nasycení, kdy předpokládáme takřka konstantní proud při změnách napětí (asi od 1 V), nemá úplně ideální průběh. Formálně byla tato část proložena (nebo spíše vyplněna) přímkou. Stanovení zisku tranzistoru z aritmetického průměru dat při několika napětích U je ale díky tomu trochu diskutabilní. Vhodnější by asi bylo brát zisky zvlášť, pro každou hodnotu napětí jeden specifický.

4 Závěr

Byla proměřena voltampérová a světelná charakteristika LED diod L 1131 a L-934 LGD v propustném směru, tabulka 1, grafy na obr. 2, 3 a 4. Z nich poté byly stanoveny některé parametry diod (c - červená L 1131, z - zelená L-934 LGD). Prahové napětí:

$$U_c^* = (1.59 \pm 0.07) \text{ V}, \quad U_z^* = (1.92 \pm 0.02) \text{ V},$$

statický sériový odpor v pracovním bodě:

$$R_{dc} = (83 \pm 4) \Omega, \quad R_{dz} = (115 \pm 1) \Omega,$$

dynamický odpor:

$$R_{dic} = (2.00 \pm 0.11) \text{ m}\Omega, \quad R_{diz} = (2.26 \pm 0.04) \text{ m}\Omega,$$

a hodnota konstanty n :

$$n_c = (1.56 \pm 0.01), \quad n_z = (1.77 \pm 0.02).$$

Změřena byla také charakteristika fototranzistoru při třech různých hladinách osvětlení, tabulka 2, graf na obr. 5. Její pomocí pak zjištěn jeho zisk při jednotlivých hladinách osvětlení, viz. tab. 3:

$$G_{0.2} = (164 \pm 7), \quad G_{0.4} = (256 \pm 13), \quad G_{0.6} = (320 \pm 16).$$

Reference

- [1] Stud. text, praktikum III: Kvantová optika a optoel., <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>
- [2] Stud. text, praktikum III: Charakteristiky optoel. součástek, <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>
- [3] English J.: Zpracování výsledků fyzikálních měření, 1999, <http://physics.mff.cuni.cz/to.en/vyuka/zfp>
- [4] J. Lu: T-1 (3 mm) Low Current LED Lamps, Kingbright Corp., 2001, <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/117983/KINGBRIGHT/L-934LGD/601/1/L-934LGD.html>