

1 Pracovní úkoly

1. Na internetu najdete katalogové listy všech optoelektronických součástek, které budete v úloze používat, konkrétní měřené součástky vybere vyučující. Parametry důležité ke splnění pracovních úkolů vypište a přiložte do zápisu z měření.
2. Změřte voltampérové a světelné charakteristiky dvou luminiscenčních diod v propustném směru. Grafy vytvořte v praktiku, jsou povinnou součástí zápisu z měření.
3. Ze změřených V-A charakteristik určete pro jednotlivé diody statický odpor R_d , dynamický odpor R_{di} , hodnotu konstanty n a prahové napětí U^* . Určete, z jakého materiálu jsou jednotlivé diody zhotoveny. Nezapomeňte na graf $\ln I_F$ vs. U_F .
4. Změřte charakteristiky fototranzistoru při třech různých hladinách osvětlení. Měření proveďte pomocí pikoampérmetru s vestavěným zdrojem Keithley s funkcí ukládání dat do paměti přístroje. Povinnou součástí zápisu z měření jsou grafy naměřených charakteristik, tabulky do protokolu netiskněte.
5. Změřte zisk fototranzistoru při třech různých hladinách osvětlení a jednom napětí UCE.

2 Teoretická část

Elektroluminiscenční dioda je optoelektronická součástka s jedním PN přechodem, na který když přiložíme vnější napětí tak dojde k injekci minoritních nosičů proudu do vodivostního pásu, část elektronů v oblasti N a část děr v oblasti P zářivě rekombinují a dochází k emisi světla, tzv. elektroluminiscenční jev.

Voltampérová charakteristika elektroluminiscenční diody je závislost proudu procházejícího PN přechodem I_F na napětí na diodě U_F . Pokud platí, že $eU_F \geq 4kT$ a $U_F \gg I_F R_S$, kde e značí náboj elektronu, k Boltzmanovu konstantu, T absolutní teplotu a R_S sériový odpor diody, můžeme voltampérovou charakteristiku elektroluminiscenční diody v propustném směru popsat vztahem [1]

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

kde I_0 značí zbytkový proud a n je bezrozměrná konstanta, která je daná konkrétním geometrií a vlastnostmi PN přechodu, použitým materiálem, výrobní technologií atd. Proměříme-li voltampérovou charakteristiku, můžeme určit n pomocí lineární regrese, neboť pak pro $\ln I_F$ platí

$$\ln I_F = \frac{e}{nkT} U_F + \ln I_0 \quad (2)$$

Z voltampérové charakteristiky můžeme také určit sériový statický odpor R_d , který je v pracovním bodě U_{F_0} , I_{F_0} definován

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

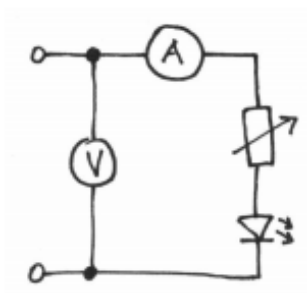
Za předpokladu platnosti (1) lze dále dopočítat sériový dynamický odpor R_{di} podle vztahu

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

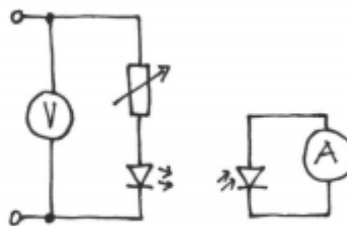
Prahové napětí U^* je hodnota napětí, při kterém dochází ve voltampérové charakteristice diody ke zlomu a proud procházející diodou začíná rychle růst. Určíme ho jako průsečík lineární části VA charakteristiky s osou x. Prahové napětí závisí na materiálu a souvisí se šířkou zakázaného pásu E_g PN-přechodu. Jejich souvislost přibližně vyjadřuje vztah [1]

$$U^* \approx \frac{E_g}{e} \quad (5)$$

Voltampérovou charakteristiku luminiscenční diody můžeme změřit při zapojení na obrázku 1. Závislost vyslaného zářivého toku Φ elektroluminiscenční diody na proudu procházejícím diodou I_F nazýváme světelnou charakteristikou a můžeme ji změřit v zapojení na obrázku 2.



Obrázek 1: Měření VA charakteristiky [1]



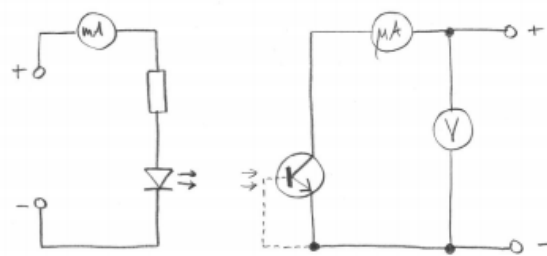
Obrázek 2: Měření světelné charakteristiky [1]

Fototranzistor je optoelektronická součástka se dvěma PN přechody. Světlo je pohlcováno v bázi, minoritní nosiče proudu přechází do kolektoru a tvoří tzv. primární fotoproud I_{Φ} , zatímco majoritní nosiče proudu tvoří objemový náboj v bázi a plní tak funkci vnějšího proudu přiváděného do báze. Dochází ke zvýšené injekci menšinových nosičů proudu z emitoru do báze a tedy i k zesílení primárního fotoproudu. Výsledný proud v kolektoru I_{CO} je pak přibližně roven [1]

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

kde G je tzv. zisk fototranzistoru.

Voltampérová charakteristika fototranzistoru je závislost proudu v kolektoru I_{CO} na napětí kolektor-emitor U_{CE} . Můžeme ji změřit při zapojení podle obrázku 3.



Obrázek 3: Měření VA charakteristiky fototranzistoru [1]

3 Výsledky měření

Pro měření byla zvolena modrá luminiscenční dioda 560LB7D a žlutá L-513YD. Jejich voltampérové a světelné charakteristiky byly změřeny při zapojení na obrázcích 1 a 2, přičemž jsem využil sekvenčního měření přístroje Keithley 6487. Ochranný odpor byl nastaven na odporové dekádě Centrad DR08 na hodnotu $R_{och} = 400 \Omega$ pro obě diody. Byl použit vestavěný zdroj napětí, vestavěný voltmetr a vestavěný ampérmetr přístroje Keithley.

Měřil jsem v rozsahu napětí $0 V$ až $10 V$ s krokem $0,1 V$, přičemž měřené napětí U je napětí na zdroji. Pro výpočet napětí na diodě U_F jsem použil vztah

$$U_F = U - R_{och}I_F \quad (7)$$

rozsah měření byl nastavován automaticky pikoampérmetrem Keithley a chyby měření napětí σ_U a proudu σ_I jsou dány specifikacemi přístroje Keithley 6487 [3]. Pro většinu měření jsou σ_U a σ_I rovny $0,1\%$ naměřené hodnoty (kromě měření, kdy měříme ve spodní části měřícího rozsahu a převažuje absolutní chyba přístroje na daném rozsahu).

Změřené voltampérové charakteristiky jsou zobrazeny v grafech 1 a 2. Lineární části voltampérových charakteristik byly proloženy přímkou ve tvaru $I_F = A \cdot U_F + B$ pomocí lineární regrese. Vypočítané koeficienty A a B pro obě LED jsou uvedeny v tabulce 1. Prahové napětí jsem pak určil jako průsečík této lineární části s osou x , tedy $U^* = -B/A$ a chybu výsledku dle zákona šíření chyb [2]

$$\sigma_{U^*} = U^* \sqrt{\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2} \quad (8)$$

Tabulka 1: Lineární část VA charakteristiky

LED	$\frac{A}{mA \cdot V^{-1}}$	$\frac{\sigma_A}{mA \cdot V^{-1}}$	$\frac{B}{mA}$	$\frac{\sigma_B}{mA}$	$\frac{U^*}{V}$	$\frac{\sigma_{U^*}}{V}$
L-513YD	66,3	0,9	-120	2	1,81	0,04
560LB7D	49,9	0,7	-135	2	2,71	0,06

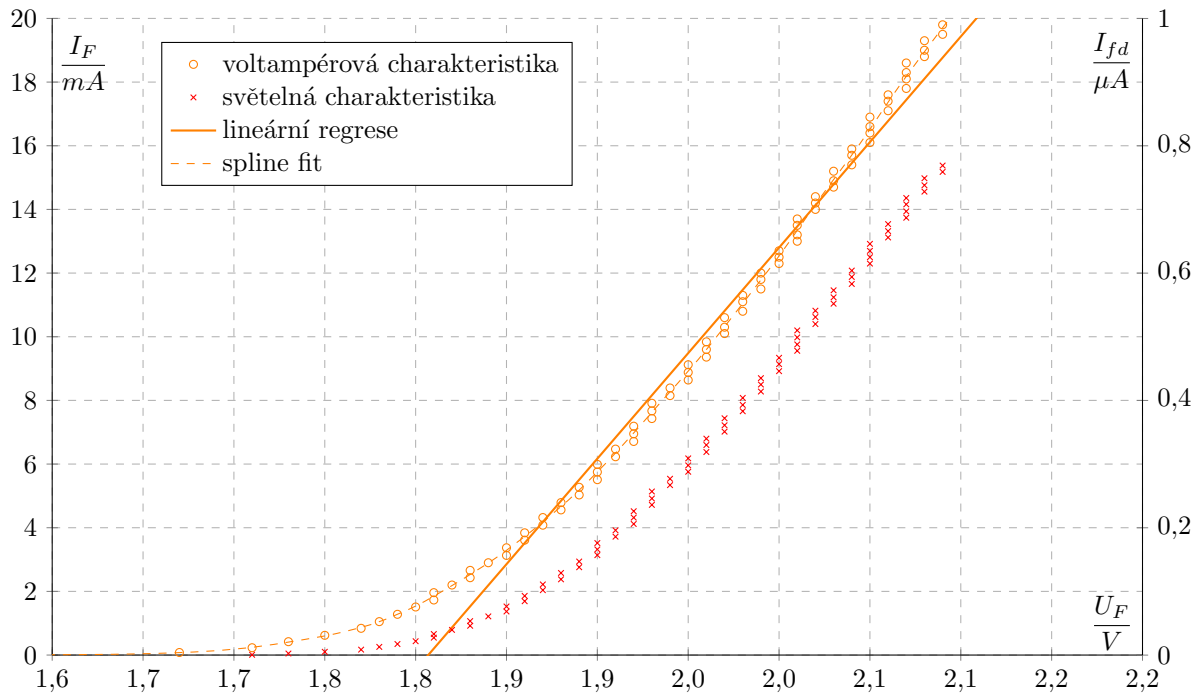
Úkolem bylo stanovit statický odpor při proudu $20 mA$. Bohužel jsem si až po měření uvědomil, že byl zvolen příliš velký ochranný odpor a data pro žlutou LED končí na proudu $19,80 mA$ a pro modrou LED na proudu $17,40 mA$. Proto jsem data proložil spline fitem, který je v grafech 1 a 2 vyznačen přerušovanou čarou, a využil jsem ho k určení napětí na diodě při proudu $20 mA$. Sériový statický odpor jsem pak určil podle vztahu (3) a chybu výsledku podle vzorce

$$\sigma_{R_d} = R_d \sqrt{\left(\frac{\sigma_{U_F}}{U_F}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_F}}{I_F}\right)^2} \quad (9)$$

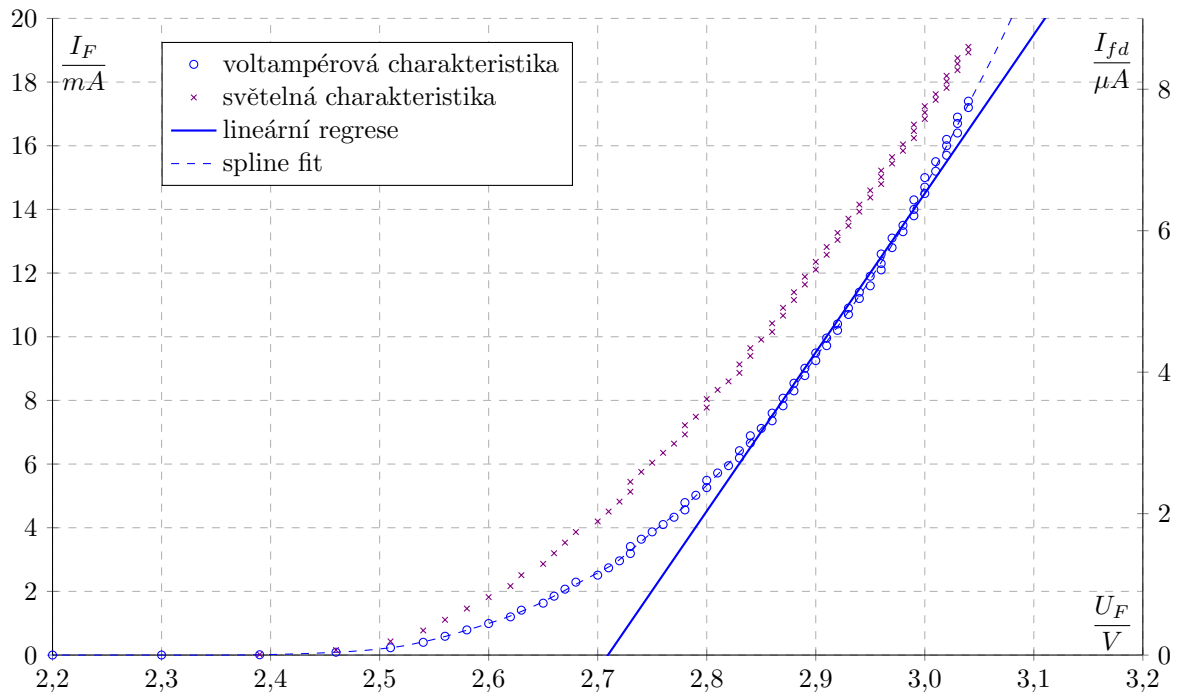
Pro žlutou diodu tak vyšlo $R_{d,z} = (104,7 \pm 0,4) \Omega$ a pro modrou $R_{d,m} = (154,0 \pm 0,5) \Omega$.

Světelné charakteristiky jsem změřil v zapojení na obrázku 2. Pro detekci světla byla použita fotodioda 1PP75. Měřil jsem proud procházející touto fotodiodou I_{fd} a předpokládám, že zářivý tok luminiscenčních diod Φ je přímo úměrný tomuto proudu I_{fd} . Světelné charakteristiky diod jsou uvedeny společně s voltampérovými charakteristikami v grafech 1 a 2, ovšem vzhledem k tomu, že proudy I_{fd} dosahovaly řádově hodnot $1 \mu A$, byla do grafů přidána druhá osa y vpravo s odlišným rozsahem hodnot.

V grafech 1 a 2 je vidět, že pro jednu hodnotu U_F bylo někdy naměřeno více hodnot. To bylo způsobeno tím, že jsem měřil napětí U s krokem $0,1 V$, čemuž (pro větší proudy) odpovídá velmi malá změna napětí U_F .



Graf 1: Voltampérová a světelná charakteristika L-513YD

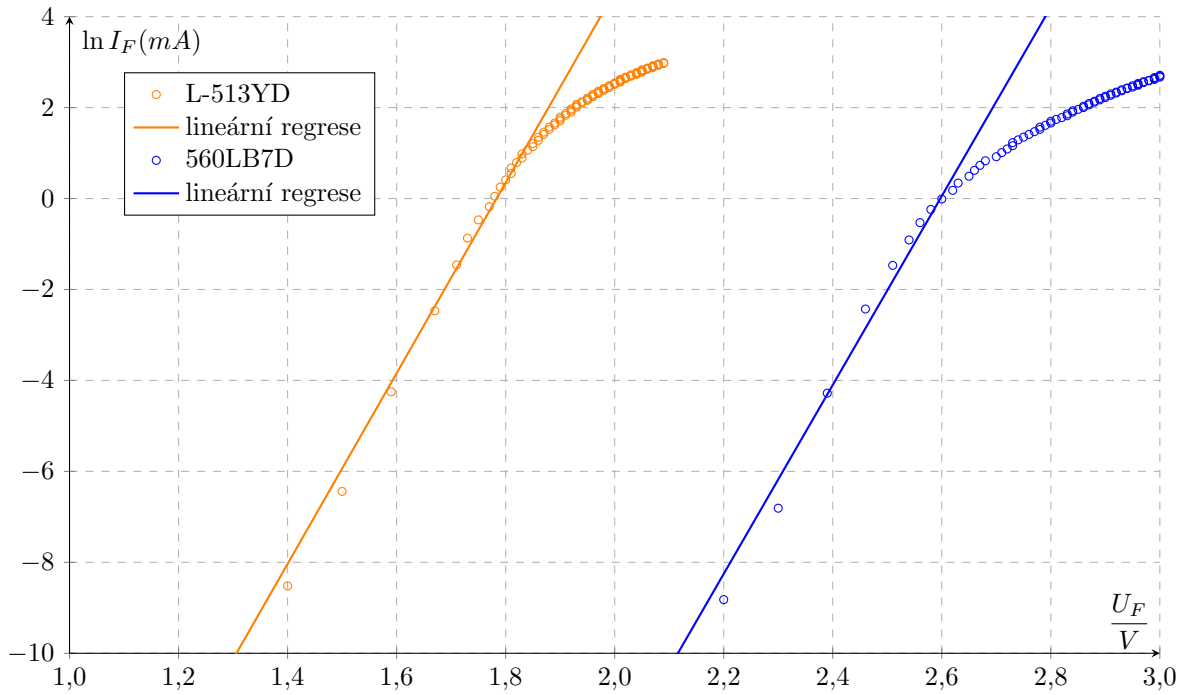


Graf 2: Voltampérová charakteristika 560LB7D

Pro určení konstanty n jsem využil závislosti $\ln I_F$ na U_F zobrazené v grafu 3. Lineární části těchto závislostí byly proloženy přímkou ve tvaru $\ln I_F = C \cdot U_F + D$ pomocí lineární regrese, výsledky shrnuje tabulka 2.

Tabulka 2: Lineární část závislosti $\ln I_F$ na U_F

LED	$\frac{C}{V^{-1}}$	$\frac{\sigma_C}{V^{-1}}$	D	σ_D	n	σ_n
L-513YD	21,0	0,3	-37,4	0,5	1,84	0,03
560LB7D	20,8	0,4	-54	1	1,86	0,04

Graf 3: Závislost $\ln I_F$ na U_F

Konstantu n jsem pak určil podle (2) jako $n = e/(CkT)$. Rtuťovým teploměrem jsem určil teplotu v místnosti na $T = (300,2 \pm 0,5) K$ a použil jsem hodnotu elementárního náboje $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ [4] a Boltzmannovy konstanty $k = 1,380 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ [5]. Výsledné konstanty n pro obě diody jsou uvedené v tabulce 2.

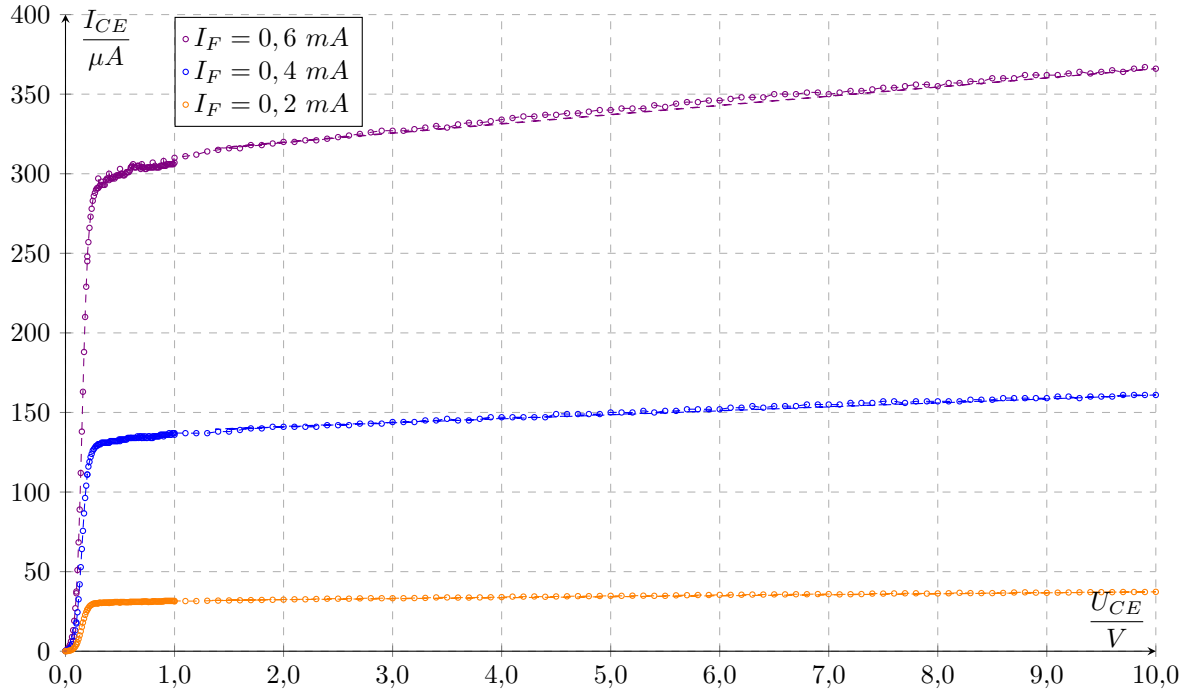
Dynamický odpor R_{di} jsem pak určil ze vzorce (4) pro proud $20 mA$. Chybu výsledku jsem určil podle vzorce

$$\sigma_{R_{di}} = R_{di} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_d}}{R_d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{U_F}}{U_F}\right)^2} \quad (10)$$

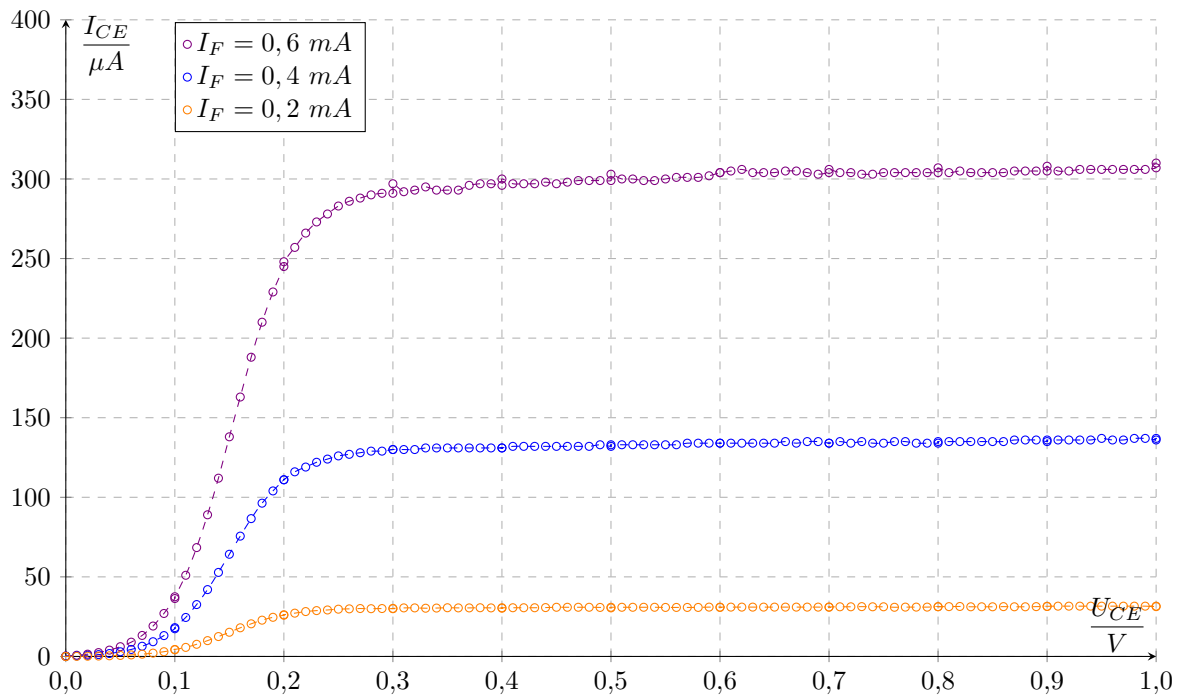
Pro žlutou diodu tak vyšlo $R_{di,z} = (2,76 \pm 0,04) \Omega$ a pro modrou $R_{di,m} = (2,74 \pm 0,05) \Omega$.

Zjištěné prahové napětí pro obě diody U^* závisí na materiálu a souvisí se šířkou zakázaného pásu E_g podle rovnice (5). Pro žlutou diodu $E_{g,z} = (1,81 \pm 0,04) eV$ odpovídá $GaAs_{1-x}P_x$ pro přibližně $x = 30\%$ [6] a pro modrou diodu $E_{g,m} = (2,71 \pm 0,06) eV$ odpovídá $In_xGa_{1-x}N$ pro $x = 35\%$. [7] Jelikož (5) je pouze přibližný vztah, tak uvedené složení x považuji za pouhý odhad.

Voltampérová charakteristika fototranzistoru CNY17-4 byla změřena v zapojení podle obrázku 3. Proměřil jsem ji pro tři různé proudy I_F procházející luminiscenční diodou $0,2\text{ mA}$, $0,4\text{ mA}$ a $0,6\text{ mA}$, což odpovídá třem různým osvětlením fototranzistoru. Naměřené hodnoty zobrazuje graf 4. Nejprve jsem měřil v rozsahu napětí od 0 až 10 V s krokem $0,1\text{ V}$ a abych proměřil i začátek charakteristik, tak jsem poté měřil znovu v rozsahu napětí od 0 až 1 V s krokem $0,01\text{ V}$. Detail charakteristik pro malá napětí ukazuje graf 5.



Graf 4: Voltampérová charakteristika fototranzistoru

Graf 5: Voltampérová charakteristika fototranzistoru, hodnoty do $U_{CE} = 1\text{ V}$

Zisk fototranzistoru byl měřen ve stejném zapojení, pouze se vodivě spojila báze s emitorem, měříme tak primární fotoproud. Měřil jsem při napětí $U_{CE} = 6 \text{ V}$. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Zisk fototranzistoru

$\frac{I_F}{mA}$	$\frac{I_{CE}}{mA}$	$\frac{I_\Phi}{mA}$	G	σ_G
0,2	35,55	0,064	554	4
0,4	153,9	0,239	644	5
0,6	346	0,506	684	7

Zisk jsem vypočítal podle rovnice (6) a chybu výsledku podle

$$\sigma_G = G \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_{CE}}}{I_{CE}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_\Phi}}{I_\Phi}\right)^2} \quad (11)$$

výsledky shrnuje tabulka 3.

4 Diskuse

Tvar změřených voltampérových a světelných charakteristik dobře odpovídá očekávanému průběhu, jak můžeme pozorovat v grafech 1 a 2, tedy pro malá napětí je proud procházející LED téměř nulový a při překročení prahového napětí dojde ke zlomu a proud procházející LED (a tedy i zářivý tok) začíná prudce růst.

Teoretický vztah daný vzorcem (1) platí pouze pro hodnoty napětí U_F , které příliš nepřesahují prahovou hodnotu U^* , jak je vidět z grafu 3, neboť podle vztahu (1) by závislost $\ln I_F$ na U_F měla být celá lineární. Předpokládám, že pro větší hodnoty proudů přestatla platit podmínka $U_F \gg I_F R_S$, a tak už vzorec (1) neplatí zcela přesně.

Hodnoty prahového napětí U^* a konstant n byly určeny z lineárních částí změřených závislostí a kromě statistické chyby, určené z lineární regrese, budou zatíženy také chybou volby lineární části charakteristik. Tato chyba se těžko odhaduje, a tak není v σ_{U^*} ani σ_n započítaná. To ovšem znamená, že skutečné chyby těchto veličin mohou být i větší než uvedené hodnoty σ_{U^*} a σ_n .

Jak jsem již zmínil, při měření jsem zvolil příliš velký ochranný odpor a neměřil jsem tak voltampérové charakteristiky až do hodnot proudu 20 mA . Abych mohl určit statický odpor R_d při 20 mA tak jsem data proložil spline fitem a předpokládal jsem, že se skutečná charakteristika nebude příliš od tohoto fitu odchylovat. Jak je ovšem vidět především z grafu 2, tak spline fit popisuje průběh voltampérové charakteristiky velmi dobře.

Materiál L-513YD byl podle katalogového listu GaAsP/GaP. Podle mého odhadu založeném na prahovém napětí, by v této LED měl převažovat As nad P. Podobně pro 560LB7D byl v katalogovém listu uveden materiál InGaN a podle mého odhadu by mělo převažovat Ga nad In.

Změřené voltampérové charakteristiky fototranzistoru odpovídají očekávanému průběhu, tedy pro malá napětí prudce roste proud a po překročení napětí kolem hodnoty $0,3 \text{ V}$ se růst proudu výrazně zpomalí, jak je vidět z grafů 4 a 5. Je také vidět, že většímu osvětlení odpovídá větší proud kolektorem I_{CE} .

5 Závěr

Pro žlutou luminiscenční diodu L-513YD a modrou 560LB7D byly proměřené světelné a voltampérové charakteristiky, ze kterých bylo určeno prahové napětí pro žlutou $U_z^* = (1,81 \pm 0,04) V$ a pro modrou $U_m^* = (2,71 \pm 0,06) V$. Byla také určena konstanta n charakterizující žlutou diodu $n_z = (1,84 \pm 0,03)$ a modrou diodu $n_m = (1,86 \pm 0,04)$.

Při jmenovitém proudu $20 mA$ byl vypočítán sériový statický odpor a sériový dynamický odpor pro žlutou $R_{d,z} = (104,7 \pm 0,4) \Omega$, $R_{di,z} = (2,76 \pm 0,04) \Omega$, resp. modrou $R_{d,m} = (154,0 \pm 0,5) \Omega$, $R_{di,m} = (2,74 \pm 0,05) \Omega$ diodu.

Ze zjištěných prahových napětí byl odhadnut materiál žluté diody na $GaAs_{1-x}P_x$ pro $x_z = 30\%$ a materiál modré diody na $In_xGa_{1-x}N$ pro $x_m = 35\%$.

Dále byla proměřena voltampérová charakteristika fototranzistoru NY17-4 pro tři různé hodnoty osvětlení a pro napětí $U_{CE} = 6 V$ byl navíc pro tyto tři hodnoty osvětlení určen také zisk fototranzistoru $G_{0,2} = (554 \pm 4)$, $G_{0,4} = (644 \pm 5)$ a $G_{0,6} = (684 \pm 7)$.

6 Seznam použité literatury

- [1] Charakteristiky optoelektronických součástek. Fyzikální praktikum. [online]. [cit. 09-03-2019]. https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_305.pdf
- [2] English, Jiří. Úvod do praktické fyziky I. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS, 2006, 145 s.
- [3] 6487 Picoammeter Specifications. [online]. [cit. 09-03-2019]. file:///Users/martinhanak/Downloads/6487RevA_DocSpec.pdf
- [4] Elementary charge. Wikipedia. [online]. [cit. 09-03-2019]. https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_charge
- [5] Boltzmann constant. Wikipedia. [online]. [cit. 09-03-2019]. https://en.wikipedia.org/wiki/Boltzmann_constant
- [6] Visible-spectrum LEDs. [online]. [cit. 09-03-2019]. https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light_Emitting-Diodes-dot-org/chap12/chap12.htm
- [7] Energy-Gap Values. [online]. [cit. 09-03-2019]. [http://www.semiconductors.co.uk/eg\(ingan\).htm](http://www.semiconductors.co.uk/eg(ingan).htm)