

1. Pracovné úlohy

1. Na internete nájdite katalogové listy všetkých optoelektronických súčastiek, ktoré budete v plohe používať, konkrétne merané súčastky vybere vyučujúci. Parametry dôležité k splneniu pracovných úloh vypíšete a priložte do zápisu z merania.
2. Zmerajte voltampérové charakteristiky dvoch luminiscenčných diód v priepustnom smere. Grafy vytvorte v praktiku, sú povinnou súčasťou zápisu z merania.
3. Zo zmeraných V-A charakteristík určte pre jednotlivé diódy statický odpor R_d , dynamický odpor R_{di} , hodnotu konštanty n a prahové napätie U^* . Určte z akého materiálu sú diódy zhotovené. Nezabudnite na graf $\ln(I_F)$ vs. U_F .
4. Zmerajte charakteristiky fototranzistoru pri troch rôznych hladinách osvetlenia. Meranie vykonajte pomocou pikoampérmetru Keithley s funkciou ukladania dát do pamäti prístroja. Povinnou súčasťou zápisu z merania sú grafy nameraných charakteristík, tabuľky do protokolu netlačte.
5. Zmerajte zisk fototranzistoru pri troch rôznych hladinách osvetlenia a jednom napätí U_{CE} .

2. Teoretický úvod

2.1. Luminiscenčné diódy a fotodiódy.

Funkcia luminiscenčnej diódy (LED) je založená na elektroluminiscenčnom jave, čím rozumieme emisiu fotónov z oblasti polovodičového P-N prechodu, ktorým prechádza prúd. Časť elektrónov v oblasti P a dier v oblasti N rekombinuje s majoritnými nosičmi. Sú uvoľňované kvantá fotónov, ktorých energia je blízka šírke zakázaného pásu E_g . V súčasnej dobe, najčastejšími polovodičmi na výrobu luminiscenčných diód sú $GaAs$, GaP a zliatiny $GaAs_xP_{1-x}$, kde x nadobúda hodnôt od 0 do 1. Zmenou pomeru As a P môžeme meniť šírku zakázaného pásu E_g , čím môžeme ovplyvniť polohu spektrálneho maxima vyžarovaného svetla.

LED ako optoelektronická súčiastka je popísaná voltampérovou charakteristikou. Za predpokladu, že za izbovej teploty je napätie na dióde $U_F \geq 100 \text{ mV}$, voltampérovú charakteristiku popíšeme analytickým vzťahom

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

Kde I_F je prúd tečúci P-N prechodom, e je náboj elektrónu, k je Boltzmanova konštanta a n je číselná konštanta, zahrňujúca vplyv geometrie PN prechodu, materiálu a výrobných technológií.

Ďalšími dôležitými parametrami sú:

Statický sériový odpor (definovaný v pracovnom bode U_{F_0}, I_{F_0})

$$R_d = \frac{U_{F_0}}{I_{F_0}} \quad (2)$$

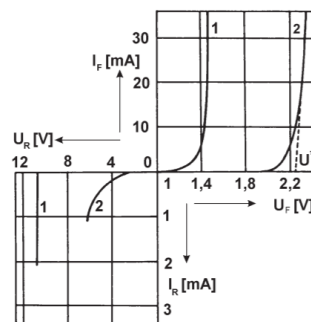
Dynamický sériový odpor

$$R_{di} = \left. \frac{dU_F}{dI_F} \right|_{I_{F_0}} = R_d \frac{nkT}{eU_{F_0}} \quad (3)$$

Bezrozmerná konštanta n , ktorú získame zo smernice lineárnej časti závislosti

$$\ln I_F = \frac{e}{nkT} U_F + \ln I_0 \quad (4)$$

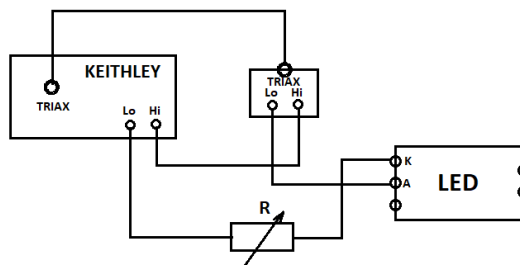
A prahové napätie U^* , ktoré získame ako priesečník extrapolácie lineárnej časti závislosti s osou napätia, Je to napätie pri ktorom dochádza k prudkému nárastu prúdu pri malom náraste napätia.



Obr. 1. Voltampérová charakteristika luminiscenčných diód, vyrobených t dvoch rôznych materiálov [1]

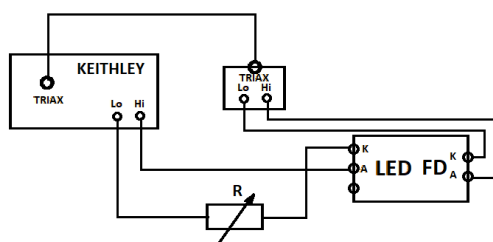
Materiál, z ktorého je dióda vyrobená, určíme na základe prahového napätia, pretože $U^* \sim E_g/e$. Pre diódy z $GaAs$ je prahové napätie $U^* \approx 1,4 V$, z $GaAs_xP_{1-x}$ $U^* = 1,4 - 2,3 V$, z GaP je $U^* \approx 2,4 V$.

VA charakteristiku diód meriame s použitím funkcie sekvenčného merania pikoampérmetru s vstavaným zdrojom napätia Keithley 6487 v zapojení podľa schémy na Obr. 2.



Obr. 2. Schéma zapojenia pre meranie VA charakteristiky diód, vytvorené na základe [2]

Na detekciu žiarenia používame takzvané fotodiódy. Sú založené na v podstate inverznom jave k elektroluminiscencií. Na P-N prechod dopadajú fotóny o vhodných energiách $h\nu > E_g$ a vyvolávajú elektrické napätie na jeho vývodoch. Svetelný tok Φ detekovaný fotodiódou je v hradlovom režime v širokom obore lineárne úmerný prúdu tečúcemu fotodiódou I_Φ , a teda ako svetelnú charakteristiku luminiscenčnej diódy vynesieme závislosť I_Φ vs. I_F . Meranie vykonáme v zapojení podľa schémy na Obr. 3.



Obr. 3. Schéma zapojenia pre meranie svetelnej charakteristiky diód, vytvorené na základe [2]

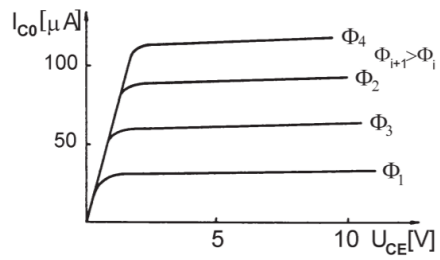
2.2. Fototranzistor

Svetlo je pohlcované v oblasti báze, kde tým vznikajú páry nadbytočných nosičov prúdu. Svetlom vytvorené menšinové nosiče v báze sú strhávané poľom kolektorového prechodu, prechádzajú do kolektoru a tvoria tzv, primárny fotoprúd I_Φ . Väčšinové nosiče v bázi zostávajú ako v potenciálovej jáme a tvoria objemový náboj, ktorý znižuje potenciálovú bariéru emitorového prechodu. Tým plnia funkciu väčšinového prúdi privádzaného do báze. Takto dochádza k zvýšenej injekcii menšinových nosičov z emitoru do oblasti báze a tým k zosilneniu fotoprúdu. Výsledný fotoelektrický prúd v kolektore I_0 je daný približným vzťahom

$$I_{C0} = GI_\Phi \quad (5)$$

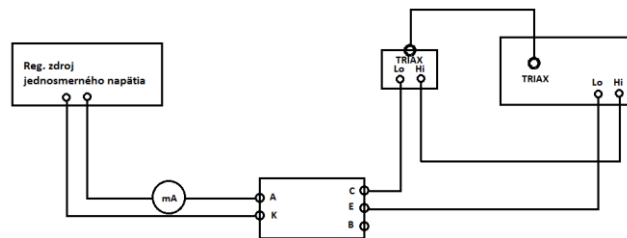
Kde G je fotozisk tranzistoru.

Voltampérovou charakteristikou fototranzistoru rozumieme závislosť I_{C0} na napätí kolektor-emitor U_{CE} .

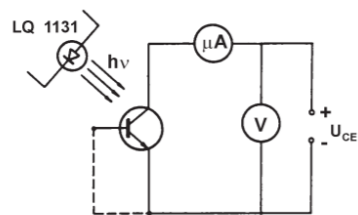


Obr. 4. VA charakteristika fototranzistoru [1]

VA charakteristiku fototranzistoru meriame v zapojení podľa schémy na Obr. 5., zisk tranzistoru meriame pre 3 rôzne hodnoty osvetlenia v zapojení podľa schémy na Obr. 6. Skratovaním kolektoru s bázou meriame priamo primárny fotoprúd I_{Φ} .



Obr. 5. Meranie VA charakteristiky fototranzistoru, vytvorené na základe [2]



Obr. 6. Meranie zisku transistoru [1]

3. Výsledky merania

Meranie prebehlo za teploty $t = (24,1 \pm 0,1)^\circ\text{C}$

3.1. Dôležité parametre meraných súčastiek

Pre meranie je kritický maximálny prúd, ktorý môže tiecť diódou, pretože vyšší prúd by mohol viesť k poškodeniu.

Súčiastka	I_{max}	U_{max}	I_{F_0}	U_{F_0}	λ_{typ}	materiál	farba	zdroj
560 LB7D	30 mA		20 mA	2,8-3,4 V	470 nm	<i>InGaN</i>	modrá	[3]
L-934LGD	25 mA	2,5 V	20 mA	2,2 V	565 nm	<i>GaP</i>	zelená	[4]

Tabuľka 3.1.1. Dôležité parametre meraných súčastiek

Doporučené nastavenie pikoampérmetru Keithley je meranie od 0 do 10 V (na zdroji) s krokom 0,1V. Zvolením vhodného ochranného odporu R zabezpečíme, aby prúd diódou nepresiahol 21 mA (hranica daná meracím rozsahom prístroja), tým je automaticky zaručené, že aj napätie nepresiahne kritických hodnôt a zároveň, aby bolo možné namerať hodnoty v okolí doporučeného pracovného bodu I_{F_0}, U_{F_0} .

Pre diódu 560 LB7D sme volili odpor $R_0 = (332 \pm 3)\Omega$ a pre diódu L-934LGD sme volili odpor $R_0 = (370 \pm 4)\Omega$. Počítame s percentovou chybou odporovej dekády.

3.2. Voltampérové charakteristiky luminiscenčných diód.

Za vyššie uvedené doporučené nastavenia sme zmerali voltampérovú charakteristiku dvoch zvolených diód. Priamo nameranými hodnotami v sériovom obvode boli napätie na zdroji U_Z a prúd diódou I_F . Napätie na dióde sme získali odčítaním úbytku napätia na ochrannom odpore podľa vzťahu

$$U_F = U_Z - I_F R_0 \quad (6)$$

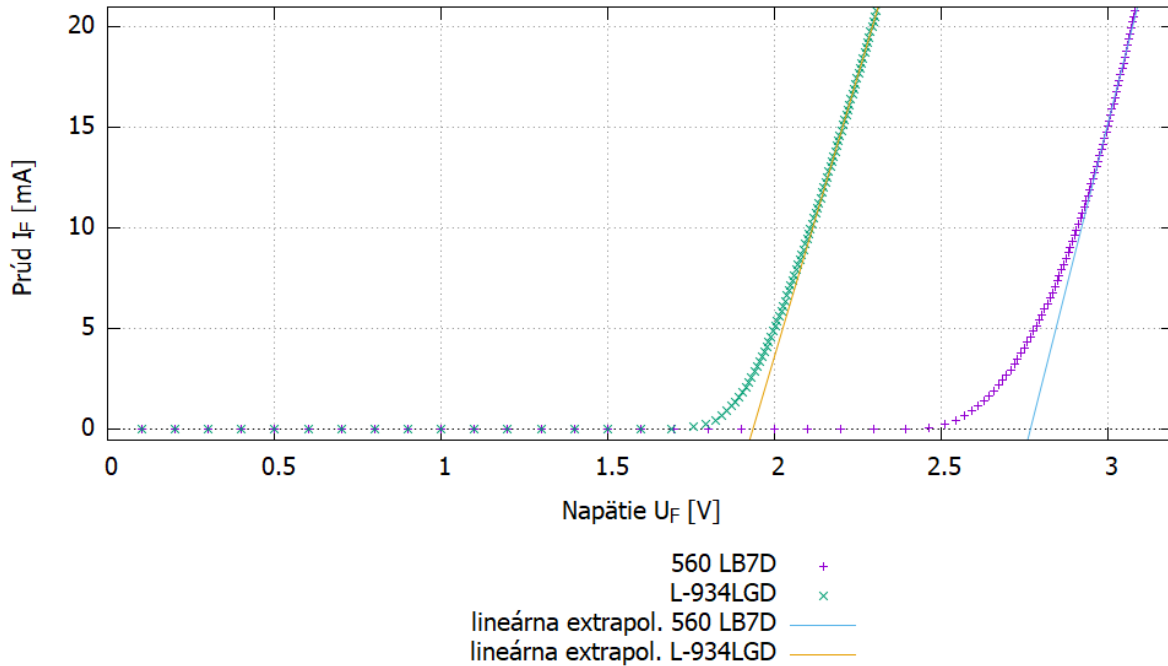
Kde pre chybu platí vzťah

$$\sigma_{U_F} = \sigma_{U_Z} + I_F R_0 \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_F}}{I_F}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_0}}{R_0}\right)^2} \quad (7)$$

Chybu merania prístrojom Keithley uvažujeme 0,1% z nameranej hodnoty. Vzhľadom na množstvo hodnôt, a veľkosti chýb, chybové úsečky nie sú vynesené do grafu. Prehľad relatívnych chýb napätia v rôznych intervaloch VA charakteristík diód je v Tabuľke 3.2.1. Tie sú, ako vidíme zo vzorca (7) závislé len na hodnote prúdu tečúceho diódou.

σ_{U_F}/U_F [%]	Horná hranica intervalu napätí [V]	
	560 LB7D	L-934LGD
0,1	2,4	1,8
0,5	2,7	1,9
1	2,8	2,0
2	3,0	2,1
3	3,1	2,2
4		2,3

Tabuľka 3.2.1. Relatívna chyba napätia na dióde v intervaloch



Graf 3.2.1. VA charakteristiky diód 560 LB7D, L-934LGD

Lineárne časti grafov sú fitované lineárnymi funkciami typu $f(x) = ax + b$ v programe Gnuplot. Rovnice regresíí:

$$I_{Flin(560LB7D)} = (65,2 \pm 0,5)mAV^{-1} U_F - (180 \pm 1)mA \quad (8)$$

$$I_{Flin(L-934LGD)} = (55,8 \pm 0,1)mAV^{-1} U_F - (107,9 \pm 0,2)mA \quad (9)$$

Data použité k fitovaniu sú dostupné v časti 7. Prílohy, v Tabuľke 7.1. Data sme volili tak, aby sa celý súbor javil čo najviac lineárne, pre diódu 560 LB7D sú to hodnoty $I_F \geq (12,19 \pm 0,01)mA$, a pre diódu L-934LGD $I_F \geq (13,06 \pm 0,1)mA$.

Položíme (8) a (9) rovné nule a pre prahové napätie dostávame

$$U_{*560LB7D} = (2,76 \pm 0,03)V \quad (10)$$

$$U_{*L-934LGD} = (1,918 \pm 0,005)V \quad (11)$$

Kde chyba je vypočítaná ako

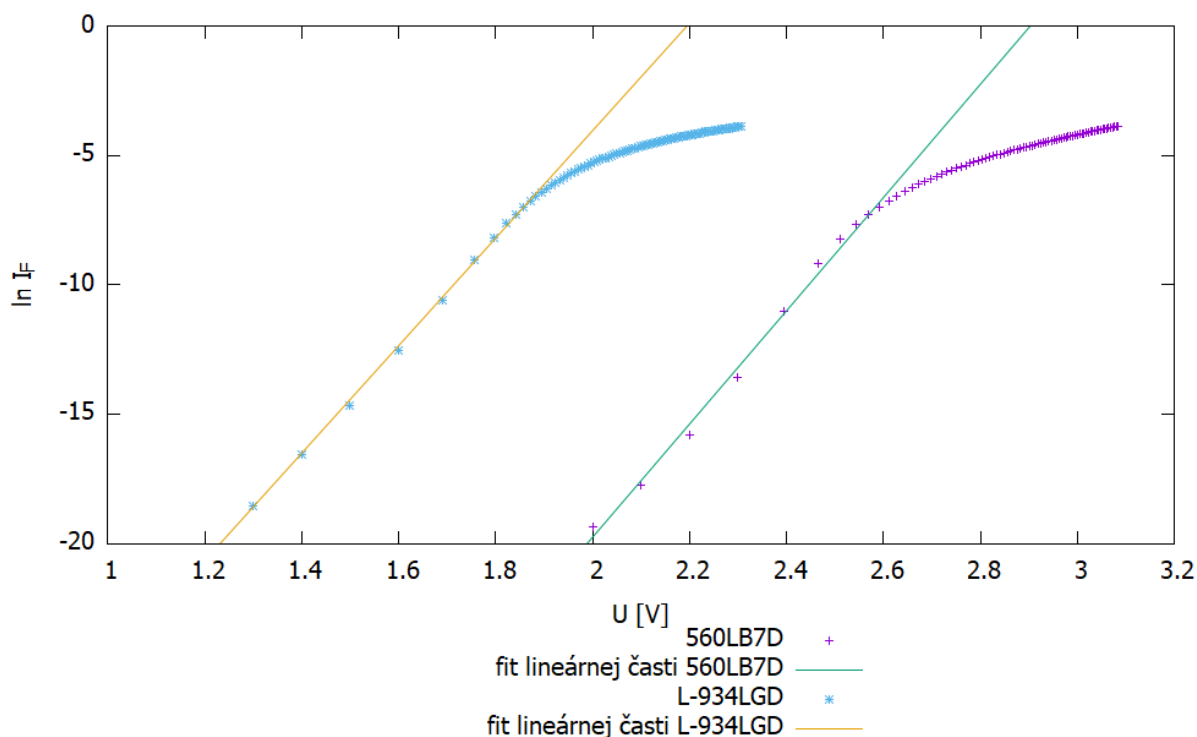
$$\sigma_{U*} = U * \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2} \quad (12)$$

Porovnaním šírky zakázaného pásu pre materiály $InN(U * \approx 1,79)$ [5], $GaN(U * \approx 3,28)$ [6], $GaAs(U * \approx 1,4)$ [1], $GaP(U * \approx 2,4)$ [1], pričom prahové napätie výslednej vzorky budeme považovať za vážený priemer prahových napätí zlučénin. Týmto postupom získavame odhad zloženia diódy 560 LB7D na 39% InN a 61% GaN, a pre L-934LGD 52% GaAs a 48% GaP.

Ideálne je určiť statický odpor pri prúde $I_F = 20 mA$, táto presná hodnota prúdu však nebola nameraná, preto pracujeme s najbližšími nameranými hodnotami (riadok 28. v Tabuľke 7.1.).

$$R_{d560LB7D} = (153,9 \pm 0,5)\Omega \quad (13)$$

$$R_{dL-934LGD} = (114,6 \pm 0,4)\Omega \quad (14)$$



Graf 3.2.2. Závislosti logaritmu prúdu diódami na napätí na diódach 560 LB7D, L-934LGD

V grafe 3.2.2 sú vynesené závislosti typu $\ln(I_F)$ vs. U_F pre hodnoty $\ln(I_F) \geq -20$, pretože pre malé hodnoty prúdu logaritmus diverguje, čo spôsobuje numerické problémy a vypočítané hodnoty sú nezmyselné. Logaritmovanie vzťahu (1) zároveň slúži ku kontrole aproximácie VA charakteristiky exponenciálou. V úseku, kde má $\ln(I_F)$ vs. U_F lineárny charakter, sú podmienky aproximácie exponenciálou zrejme dobre splnené. Lineárna oblasť grafu 3.2.1 sa naopak prejavuje logaritmickým rastom v grafe 3.2.2. Všetky tieto faktory nás nanešťastie nechávajú s malým súborom dát, s ktorými môžeme pracovať a je potrebné hľadať kompromis medzi veľkosťou štatistického súboru a linearitou na danom intervale.

Chyba veličiny $\ln(I_F)$ je daná vzťahom

$$\sigma_{\ln(I_F)} = \frac{\partial \ln(I_F)}{\partial I_F} \sigma_{I_F} = \frac{\sigma_{I_F}}{I_F} \quad (15)$$

Lineárne úseky závislostí fitujeme funkciami typu $f(x) = cx + d$ v programe Gnuplot.

$$\ln(I_F)_{\ln(560LB7D)} = (21,9 \pm 0,5)V^{-1} U_F - (64 \pm 1) \quad (16)$$

$$\ln(I_F)_{\ln(L-934LGD)} = (20,8 \pm 0,2)V^{-1} U_F - (45,6 \pm 0,3) \quad (17)$$

Data použité k fitu sú opäť k dispozícii v časti 7. Prílohy v Tabuľke 7.2.

Porovnaním so vzťahom (4) a dosadením konštánt $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$, $k = 1,380649 \cdot 10^{-23}$ a teploty, za ktorej prebiehalo meranie (aby sme vzali v úvahu prípadne zahrievanie diód počítame s chybou teploty $\sigma_T = 10K$), získavame bezrozmernú konštantu n :

$$n_{560LB7D} = (1,78 \pm 0,07) \quad (18)$$

$$n_{L-934LGD} = (1,88 \pm 0,06) \quad (19)$$

Chyby sú vypočítané ako

$$\sigma_n = n \sqrt{\left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{c}\right)^2} \quad (20)$$

Konečne, dosadením do (3) stanovíme dynamický sériový odpor diód

$$R_{di\ 560\ LB7D} = (2,3 \pm 0,1)\Omega \quad (21)$$

$$R_{di\ L-934LGD} = (2,4 \pm 0,1)\Omega \quad (22)$$

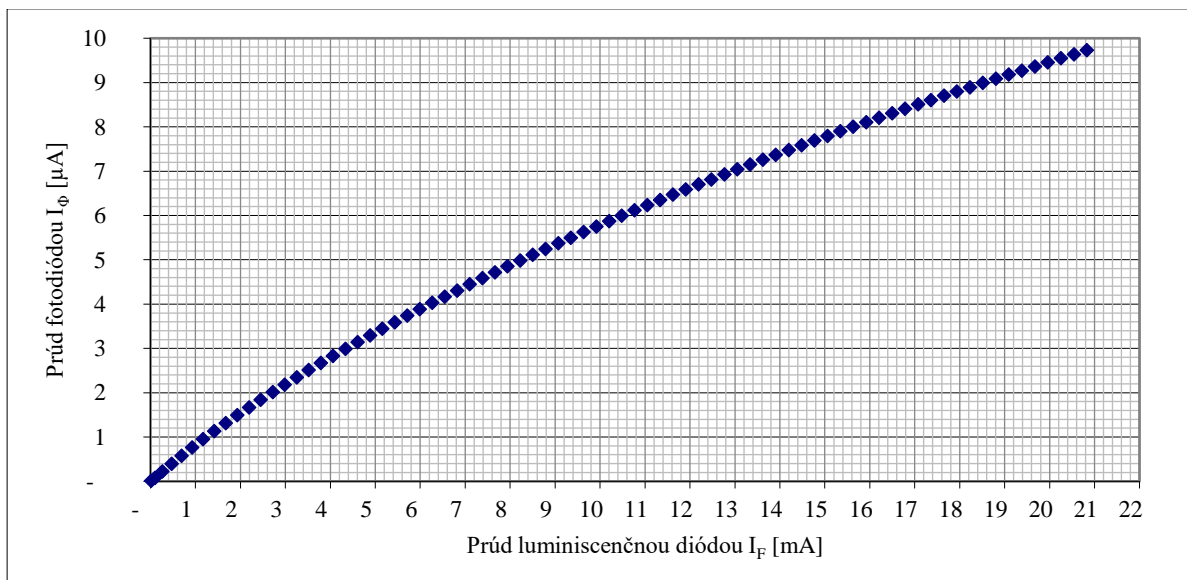
Kde chyba je daná ako

$$\sigma_{R_{di}} = R_{di} \sqrt{\left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{U_{F_0}}}{U_{F_0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_d}}{R_d}\right)^2} \quad (23)$$

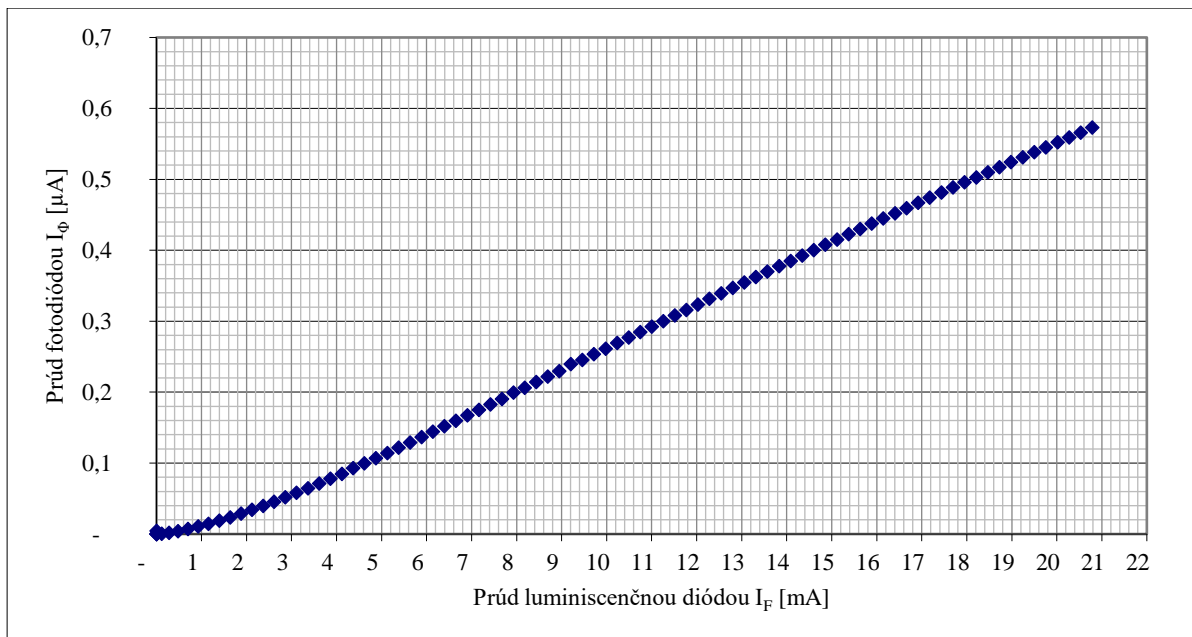
3.3. Svetelné charakteristiky diód

Svetelné charakteristiky diód sú vzhľadom na rozdielne škály vynesené do samostatných grafov. Vynášaná ja závislosť prúdu prechádzajúceho luminiscenčnou diódou

Zaujímavé pozorovanie je, že svetelná charakteristika modrej luminiscenčnej diódy je konkávna, zatiaľ, čo svetelná charakteristika zelenej diódy je konvexná. Pritom, za predpokladu, že fotodiódy sú rovnaké (čo je len predpoklad, nijakým spôsobom to nebolo overené) môžeme prehlásiť, že modrá dióda je svetelne výkonnejšia. Zelená dióda je staršia. Nižší prúd pripojenou fotodiódou môže byť spôsobený jednak opotrebovaním luminiscenčnej diódy ako aj fotodiódy.



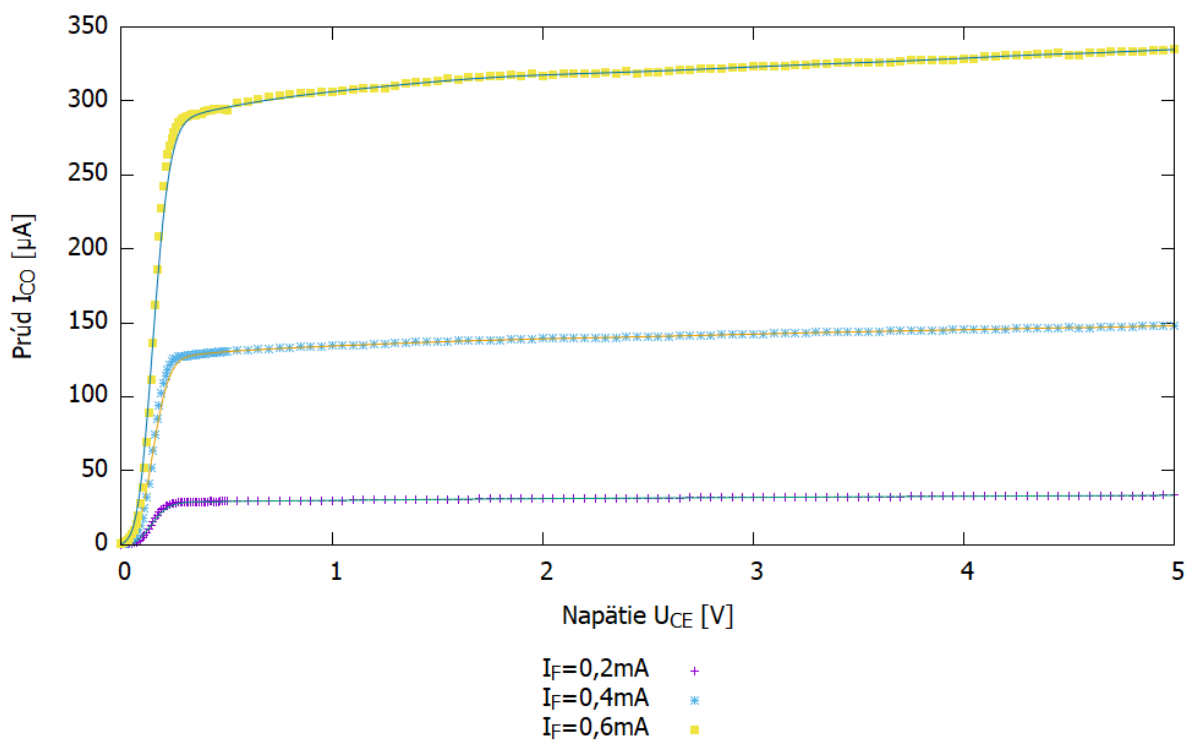
Graf 3.3.1. Svetelná charakteristika diódy 560 LB7D



Graf 3.3.2. Svetelná charakteristika diódy L-934LGD

3.4. Voltampérová charakteristika fototranzistoru

VA charakteristika fototranzistoru bola meraná opäť pomocou prístroju Keithley. Najprv boli zmerané data od 0 do 5V s krokom 0,05 V, následne boli zmerané data pre interval 0 až 0,5 s krokom 0,01V. Namerané data sú vynesené do grafu 3.4.1 a preložené Bézierovými krivkami. Pozorujeme priebeh zhodný s Obr. 4. Prúd najprv ohmicky rastie s napätím a následne prechádza do oblasti nasýtenia, kedy už ďalší nárast napätia nespôsobí nárast prúdu



Graf 3.4.1. VA charakteristika fototranzistoru pri troch rôznych osvetleniach

Pri priloženom napätí $U_{CE} = 5V$ sme zmerali kolektorový a primárny fotoprúd, z čoho bol určený zisk tranzistoru podľa vzťahu (5) s chybou vypočítanou podľa

$$\sigma_G = G \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_{C0}}}{I_{C0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_{\Phi}}}{I_{\Phi}}\right)^2} \quad (24)$$

Prúd luminiscenčnou diódou	Kolektorový prúd	Primárny fotoprúd	Zisk tranistoru
$I_F [mA]$	$I_{CO} [\mu A]$	$I_{\Phi} [\mu A]$	G
0,599± 0,002	336± 2	0,502± 0,001	669±4
0,399± 0,002	146± 1	0,235± 0,001	621±5
0,198± 0,002	31,8± 0,1	0,0599± 0,0002	531±2

Tabuľka 3.4.1. Zisk tranzistoru

4. Diskusia

4.1. Voltampérové a svetelné charakteristiky diód a určenie charakteristických parametrov

Meranie voltampérových a svetelných charakteristík diód pokladáme za dostatočne presné, chyba priamo nameraných veličín sa pohybuje okolo desiatiny percenta z nameranej hodnoty. Najväčšiu chybu do merania napätia vnáša odporová dekáda, kde počítame aspoň s jednopercenťnou chybou. Táto chyba sa väčšmi prejavuje pri vyšších prúdoch, ako je jasné zo vzťahu (7). Chyba určenia napätia na dióde nepresahuje 4%.

Pre určenie požadovaných veličín – dynamický odpor, konštanta n , prahové napätie a zloženie diód, bolo kľúčové zvoliť vhodný interval lineárnej závislosti závislostí (buď I vs. U alebo $\ln I$ vs. U). Chyba uvádzaná u veličín je však spočítaná len z veličín vstupujúcich do vzťahov a chyba fitu je zohľadnená len ako chyba parametrov lineárnych regresí, nie je v nej zahrnutá chyba, plynúca z neoptimálneho výberu fitovaných dát a preto môže byť podhodnotená.

Ďalším problémom je, že vo výpočte dynamického odporu sme sa plne spoliehali na vzťah (3). Ten je ale odvodený, za predpokladu, že platí vzťah (1), pritom graf 3.2.2. poukazuje na to, že v oblasti 20mA je VA charakteristika skôr lineárna. Definičný vzťah dynamického odporu by bol lepšie vystihnutý prevrátenou hodnotou smernice regresie získanej v (8), (9).

Určením prahového napätia sme zároveň porovnaním so šírkou zakázaných pásov materiálov v zliatinách určili zloženie diód. Pre modrú diódu nemáme z katalógového lístka upresnený pomer indiu a gália. Zelená dióda je podľa katalógového lístku zhotovená z GaP, avšak z určeného prahového napätia plynie, že fosfor a arzén sú v nej skoro rovnako zastúpené. Môže však ísť o opotrebovanie diódy, ktoré by spôsobilo zníženie hodnoty prahového napätia.

Pri určovaní konštanty n sme za pracovnú teplotu dosadzovali teplotu prostredia s chybou 10K, aby bolo zohľadnené prípadné zohrievanie. Predpokladáme, že diódy sa typicky výrazne nezohrievajú, keďže majú malý vnútorný odpor a chyba 10K je postačujúca.

4.2. Voltampérové charakteristiky tranzistoru. Zisk tranzistoru

VA charakteristika tranzistoru má očakávaný priebeh. Napätie v tomto prípade nebolo nijak korigované ochranným odporom, takže počítame s chybou prístroja 0,1%, rovnako u prúdu. Zisk tranzistoru bol nameraný pri troch rôznych hodnotách osvetlenia a pohybuje sa okolo 600. Bohužiaľ nebola zmeraná hodnota prúdu bez osvetlenia. Ak by prúd bez osvetlenia bol rádovo v jednotkách nanoampérov, je zahrnutý do chyby merania prúdu.

5. Záver

Boli zmerané voltampérové a svetelné charakteristiky diód 560 LB7D, L-934LGD v priepustnom smere. Z nich boli ďalej určené charakteristické parametre pre diódy:

Statický odpor:

$$R_{d\ 560\ LB7D} = (153,9 \pm 0,5)\Omega$$

$$R_{d\ L-934LGD} = (114,6 \pm 0,4)\Omega$$

Dynamický odpor:

$$R_{di\ 560\ LB7D} = (2,3 \pm 0,1)\Omega$$

$$R_{di\ L-934LGD} = (2,4 \pm 0,1)\Omega$$

Konštanta n:

$$n_{560\ LB7D} = (1,78 \pm 0,07)$$

$$n_{L-934LGD} = (1,88 \pm 0,06)$$

Prahové napätie:

$$U_{*560\ LB7D} = (2,76 \pm 0,03)V$$

$$U_{*L-934LGD} = (1,918 \pm 0,005)V$$

Na základe prahového napätia bolo určené približné zloženie diód. 560 LB7D je podľa našich výsledkov zhotovená z materiálu $In_{0,39}Ga_{0,61}N$ a L-934LGD bola zhotovená z $GaAs_{0,52}P_{0,48}$.

Boli taktiež zmerané VA charakteristiky fototranzistoru (číslo) pri troch rôznych hladinách osvetlenia a bol určený zisk fototranzistoru pri napätí 5V

$$G_{0,2mA} = (531 \pm 2)$$

$$G_{0,4mA} = (621 \pm 5)$$

$$G_{0,6mA} = (669 \pm 4)$$

6. Literatúra

[1] študijný text k úlohe https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_305.pdf (2.4.2019)

[2] pokyny k meraniu https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/pikoampermetr.pdf (2.4.2019)

[3] <http://www.hebeiltd.com.cn/led.datasheet/560LB7D.pdf> (2.4.2019)

[4] http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/9/3/4/L934GD.shtml (2.4.2019)

[5] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InN/bandstr.html> (2.4.2019)

[6] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/bandstr.html> (2.4.2019)

7. Prílohy

V časti prílohy, sú uvedené tabuľky, ktoré pre prehľadnosť nie sú súčasťou protokolu.

Č.	560 LB7D				L-934LGD			
	$U_F[V]$	$\sigma_{U_F}[V]$	$I_F[mA]$	$\sigma_{I_F}[mA]$	$U_F[V]$	$\sigma_{U_F}[V]$	$I_F[mA]$	$\sigma_{I_F}[mA]$
1	2,952	0,009	12,19	0,01	2,168	0,007	13,06	0,01
2	2,957	0,009	12,48	0,01	2,173	0,007	13,32	0,01
3	2,962	0,009	12,77	0,01	2,178	0,007	13,57	0,01
4	2,967	0,009	13,05	0,01	2,183	0,007	13,83	0,01
5	2,972	0,009	13,34	0,01	2,188	0,007	14,09	0,01
6	2,977	0,009	13,62	0,01	2,192	0,007	14,35	0,01
7	2,982	0,009	13,91	0,01	2,197	0,007	14,60	0,01
8	2,987	0,009	14,20	0,01	2,202	0,007	14,86	0,01
9	2,991	0,009	14,48	0,01	2,207	0,007	15,12	0,02
10	2,996	0,009	14,77	0,01	2,211	0,007	15,37	0,02
11	3,001	0,009	15,06	0,02	2,216	0,007	15,63	0,02
12	3,005	0,009	15,35	0,02	2,221	0,007	15,89	0,02
13	3,010	0,009	15,63	0,02	2,225	0,007	16,15	0,02
14	3,014	0,009	15,92	0,02	2,230	0,007	16,41	0,02
15	3,019	0,009	16,21	0,02	2,234	0,007	16,66	0,02
16	3,023	0,009	16,50	0,02	2,239	0,007	16,92	0,02
17	3,027	0,009	16,78	0,02	2,244	0,007	17,18	0,02
18	3,032	0,009	17,07	0,02	2,248	0,007	17,44	0,02
19	3,036	0,009	17,36	0,02	2,253	0,007	17,69	0,02
20	3,040	0,009	17,65	0,02	2,257	0,007	17,95	0,02
21	3,044	0,009	17,94	0,02	2,262	0,007	18,21	0,02
22	3,048	0,009	18,23	0,02	2,267	0,007	18,47	0,02
23	3,053	0,009	18,52	0,02	2,271	0,007	18,73	0,02
24	3,057	0,009	18,81	0,02	2,276	0,007	18,98	0,02
25	3,061	0,009	19,09	0,02	2,280	0,007	19,24	0,02
26	3,065	0,009	19,38	0,02	2,285	0,007	19,50	0,02
27	3,069	0,009	19,67	0,02	2,289	0,007	19,76	0,02
28	3,073	0,009	19,96	0,02	2,294	0,007	20,02	0,02
29	3,077	0,009	20,25	0,02	2,298	0,007	20,27	0,02
30	3,080	0,009	20,54	0,02	2,303	0,007	20,53	0,02
31	3,084	0,009	20,83	0,02	2,307	0,007	20,79	0,02

Tabuľka 7.1. Data použité k fitovaniu lineárnych častí VA charakteristík diód v grafe 3.2.1.

560 LB7D				L-934LGD			
$U_F[V]$	$\sigma_{U_F}[V]$	$\ln I_F$	$\sigma_{\ln I_F}$	$U_F[V]$	$\sigma_{U_F}[V]$	$\ln I_F$	$\sigma_{\ln I_F}$
2,000	0,002	-19,351	0,001	1,200	0,001	-20,468	0,001
2,100	0,002	-17,727	0,001	1,300	0,001	-18,528	0,001
2,200	0,002	-15,820	0,001	1,400	0,001	-16,577	0,001
2,300	0,002	-13,589	0,001	1,500	0,001	-14,659	0,001
2,395	0,002	-11,026	0,001	1,599	0,002	-12,555	0,001
2,466	0,005	-9,180	0,001	1,691	0,002	-10,584	0,001
2,511	0,005	-8,227	0,001	1,757	0,002	-9,049	0,001
2,544	0,005	-7,661	0,001	1,796	0,002	-8,176	0,001
2,570	0,005	-7,273	0,001	1,822	0,004	-7,640	0,001
2,592	0,005	-6,981	0,001	1,842	0,004	-7,267	0,001
2,611	0,005	-6,749	0,001	1,858	0,004	-6,986	0,001

Tabuľka 7.2. Data použité k fitovaniu lineárnych častí závislostí $\ln I_F$ vs. U_F v grafe 3.2.2.