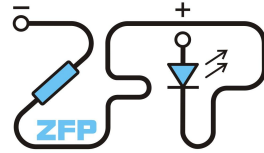


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

## Fyzikální praktikum ...



Úloha č. ....

Název úlohy: .....

Jméno: ..... Obor: FOF FAF FMUZV

Datum měření: ..... Datum odevzdání: .....

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 3	
Teoretická část	0 - 2	
Výsledky a zpracování měření	0 - 9	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
<b>Celkem</b>	max. 20	

Posuzoval: .....

dne: .....

## Pracovní úkoly

1. Na internetu najděte 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  $U_{CE}$ .

[1]

## Teorie

Předmětem práce je proměřit voltampérové a světelné charakteristiky dvou LED a fototranzistoru.

LED, neboli luminiscenční dioda, je polovodičová dioda, která díky vhodným příměsím při průchodu proudu v propustném směru svítí. Nejběžnějšími příměsami jsou slitiny typu  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ , kde  $x \in \langle 0, 1 \rangle$ . Dioda s  $x = 0$  emituje světlo o vlnové délce  $\lambda = 565$  nm, dioda s  $x = 1$  má  $\lambda = 920$  nm.[2] Udávaná vlnová délka použité červené diody je  $\lambda = 660$  nm, předpokládáme-li lineární závislost, znamená to, že je vyrobena ze slitiny  $\text{GaAs}_{0,27}\text{P}_{0,73}$ . Udávané příměsi modré diody, která byla použita, jsou InGaN.

Pro V-A charakteristiku běžné polovodičové diody (bez rekombinace) platí tzv. Shockleyova rovnice:

$$I(U_d) = I_S (e^{aU_d} - 1), \quad (1)$$

kde  $I_S$  a  $a$  jsou konstanty závislé na teplotě a vnitřních vlastnostech diody.[3]  $U_d$  je napětí na diodě. Jelikož budeme měření provádět v obvodu, kde je za diodou sériově zapojený ochranný odpor  $R_o$ , platí  $U_d = U_0 - R_o I$ . Dosazením do (1) a vyřešením pro  $I$  získáme vztah:

$$I(U_0) = \frac{W(a R_o I_S e^{a(R_o I_S + U_0)})}{a R_o} - I_S \quad (2)$$

kde  $W(x)$  je Lambertova funkce.

Statický odpor  $R_S = U_d/I$  vyjádříme z (1) jako

$$R_S(U_d) = \frac{U_d}{I_S (e^{aU_d} - 1)}. \quad (3)$$

Pro dynamický odpor platí

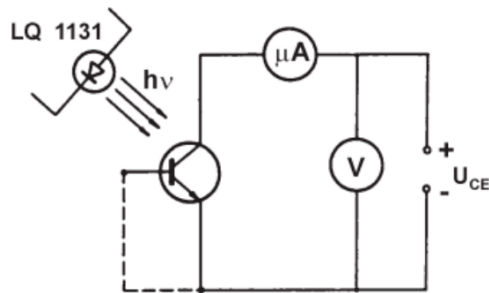
$$R_D(U_d) = \frac{dU_d}{dI} = \left( \frac{dI}{dU_d} \right)^{-1} = \frac{1}{a I_S e^{aU_d}}. \quad (4)$$

Prahové napětí  $U^*$  diody je poměrně arbitrární parametr – tradičně se určuje tak, že se naměřenými daty proloží přímkou a  $U^*$  je potom průsečík této přímky s osou  $I = 0$ , protože je ale závislost  $I(U)$  exponenciální a v žádné části se nepodobá přímce, takto získaná hodnota  $U^*$  silně závisí na intervalu, který pro lin. regresi zvolíme. Pro účely této práce bylo proto  $U^*$  pragmaticky určeno jako napětí na diodě, při kterém  $I = 1 \text{ mA}$ .

Fototranzistor je součástka funkčně ekvivalentní klasickému tranzistoru s tím rozdílem, že fototranzistor je možné otevřít i tak, že na něj necháme dopadat světlo. Proudové zesílení fototranzistoru je charakterizováno tzv. ziskem

$$G = \frac{I_{CO}}{I_\phi}, \quad (5)$$

kde  $I_{CO}$  a  $I_\phi$  je proud na kolektoru při rozpojené, resp. zkratované bázi a emitoru.[2]



**Obrázek 1:** Schéma zapojení fototranzistoru

## Výsledky měření

### Pomůcky

- červená LED LQ1131
- modrá LED 560LB7D
- fotodioda 1PP75
- fototranzistor
- odporová dekáda
- multimetr Keithley 6487

### Zavedené veličiny a notace

$U$  napětí

## Chyby měření

### Naměřené hodnoty

Nejprve bylo provedeno měření sekvenční měřební V-A charakteristiky červené LED. Dioda byla zapojena v sérii za ochranným odporem cca.  $400 \Omega$ , přístrojem Keithley bylo provedeno sériové měření v rozsahu  $U_0 = 0$  až  $10 \text{ V}$  s krokem  $0,1 \text{ V}$ . Naměřené body  $[U_0, I]$  byly proloženy závislostí (2), získané koeficienty a jejich statistické chyby jsou:

$$a = (26,6 \pm 1,5) \text{ V}^{-1}$$

$$R_o = (401,2 \pm 0,3) \Omega$$

$$I_S = (3 \pm 7) 10^{-21} \text{ A}$$

Z parametru  $R_o$  bylo pro naměřená data dopočítáno napětí na diodě  $U_d$ . Do grafů 1a a 1b byly zaneseny body  $[U_d, I]$  a teoretická závislost (1). Prahové napětí vyšlo zhruba  $U^* = 1,52 \text{ V}$ .

Dále byl pro naměřená data vypočítán statický odpor  $R_S = U_d/I$  a dynamický odpor

$$(R_D)_n = \frac{(U_d)_{n+1} - (U_d)_n}{(I)_{n+1} - (I)_n},$$

kde  $(X)_n$  značí  $n$ -tou naměřenou hodnotu veličiny  $X$ . Body  $[U_d, R_S]$  a  $[U_d, R_D]$  byly vyčištěny od šumu (byly odebrány body, které narušovaly monotonii) a společně s teoretickými závislostmi (3) a (4) zaneseny do grafu 2.

Poté byla LED umístěna do neprůsvitné krabičky společně s fotodiodou a přístrojem Keithley ve stejném nastavení byla proměřena závislost proudu protékajícího fotodiodou  $I_{det.}$  na napětí  $U_0$  na LED s ochranným odporem. Naměřeným hodnotám  $I_{det.}(U_0)$  byly přiřazeny odpovídající hodnoty  $U_d(U_0)$  a  $I(U_0)$  z předchozího měření, body  $[U_d, I_{det.}]$  byly zaneseny do grafu 3 a body  $[I, I_{det.}]$  do grafu 4.

Následně bylo totéž provedeno s modrou LED. Koeficienty získané regresí jsou

$$a = (12,6 \pm 0,3) \text{ V}^{-1}$$

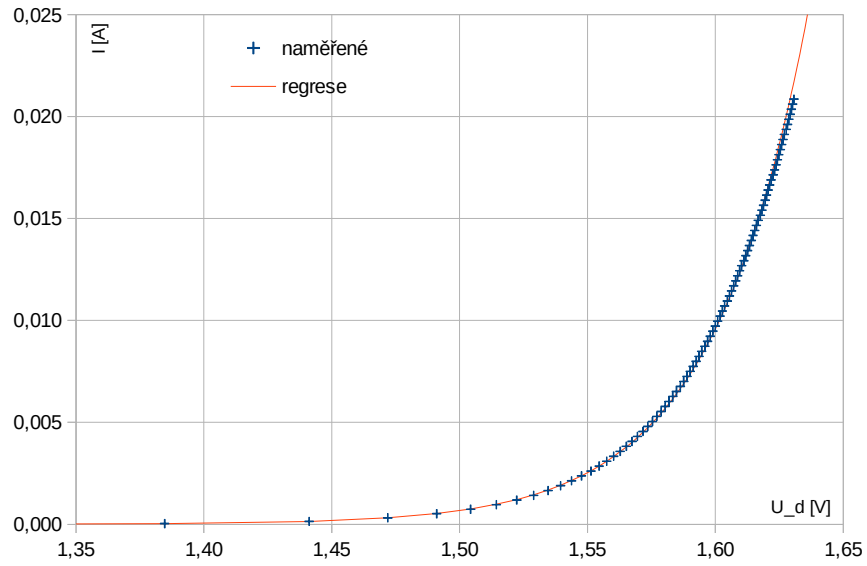
$$R_o = (413,3 \pm 0,3) \Omega$$

$$I_S = (6 \pm 4) 10^{-21} \text{ A}$$

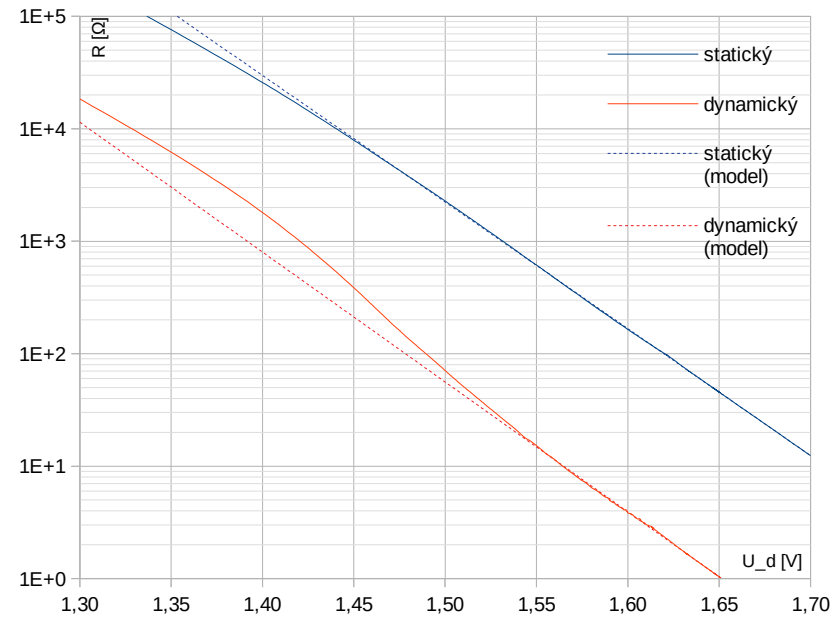
a výsledky byly zaneseny do grafů 4 až 8. Prahové napětí vyšlo zhruba  $U^* = 2,59 \text{ V}$ .

Nakonec bylo provedeno měření fototranzistoru při třech různých úrovních osvětlení. Fototranzistor byl při tom uzavřený v neprůsvitné krabičce s červenou diodou, kterou procházel proud  $I$ . Nejprve byl měřen bázový proud  $I_B$  v závislosti na napětí  $U_{CE}$  mezi emitorem a kolektorem. Tyto hodnoty byly zaneseny do grafu 9. Následně byly proměřeny proudy  $I_{CO}$  a  $I_\phi$  při stálém napětí  $U_{CE} = 5 \text{ V}$ . Z nich vypočítaný zisk  $G$  byl zanesen do grafu 10 proti proudu  $I$  osvětlovací diodou. Mezivýpočty jsou v tabulkách vedle grafu.

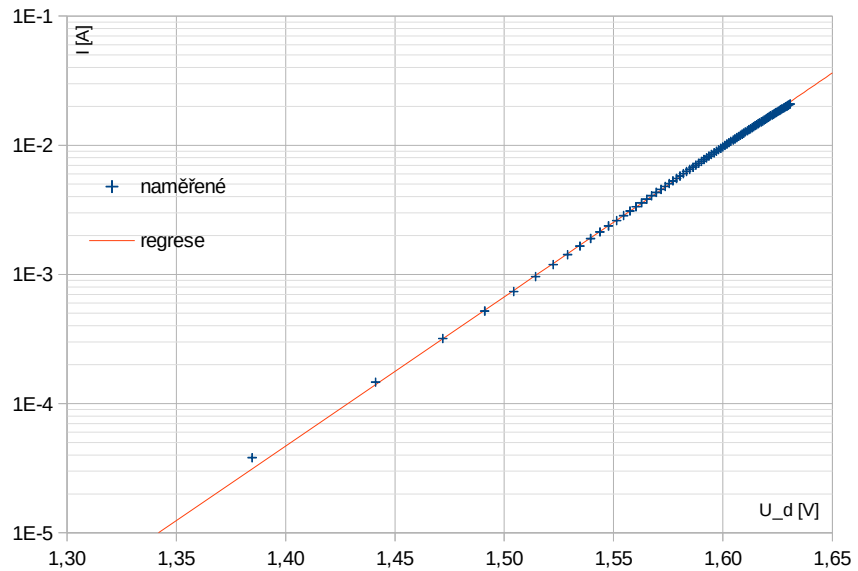
Graf č. 1a: V-A Červená LED



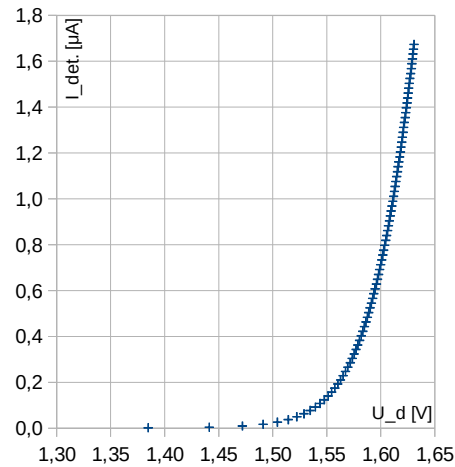
Graf č. 2: R Červená LED



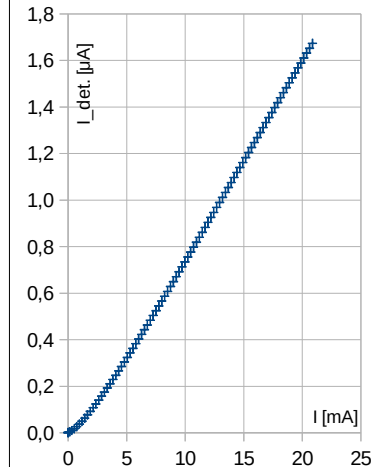
Graf č. 1b: V-A Červená LED



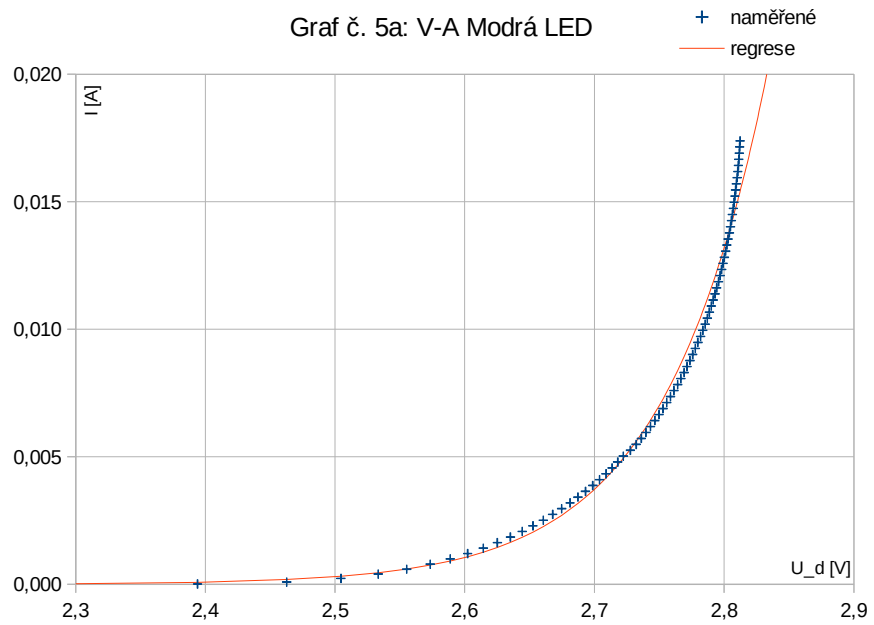
Graf č. 3:  
Napětí na červené LED  
× proud detektorem



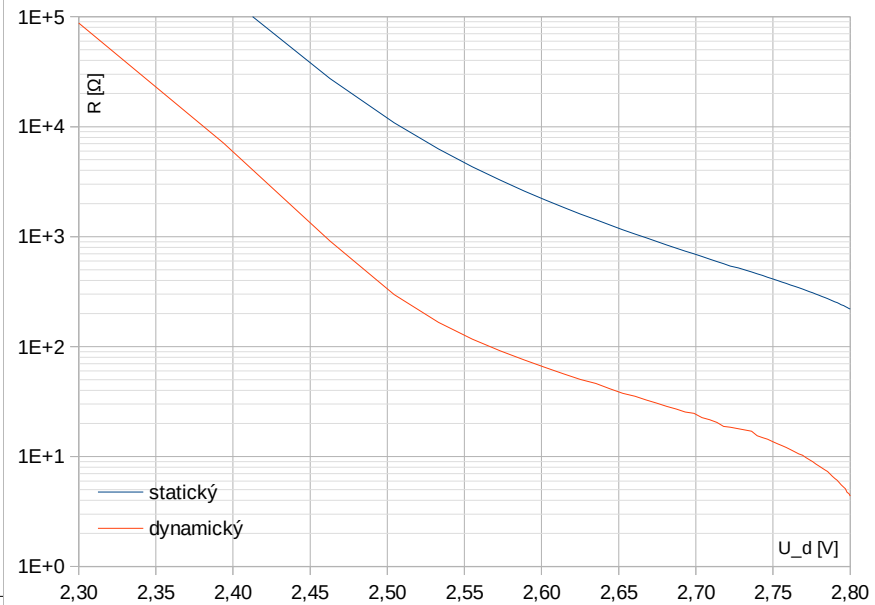
Graf č. 4:  
Proud červenou LED  
× proud detektorem



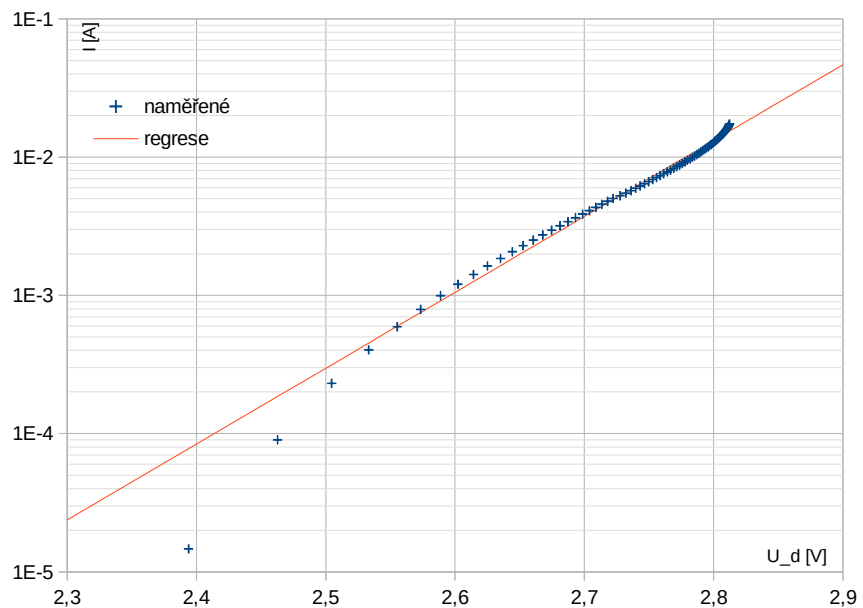
Graf č. 5a: V-A Modrá LED



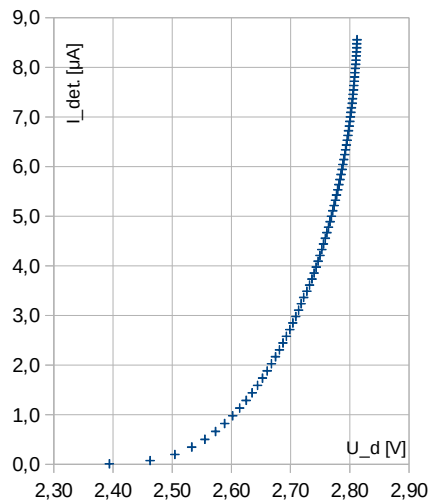
Graf č. 6: R Modrá LED



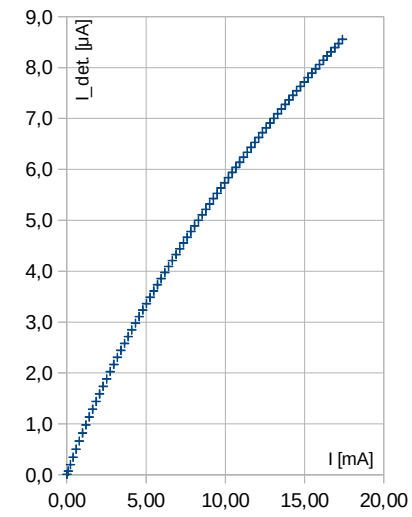
Graf č. 5b: V-A Modrá LED



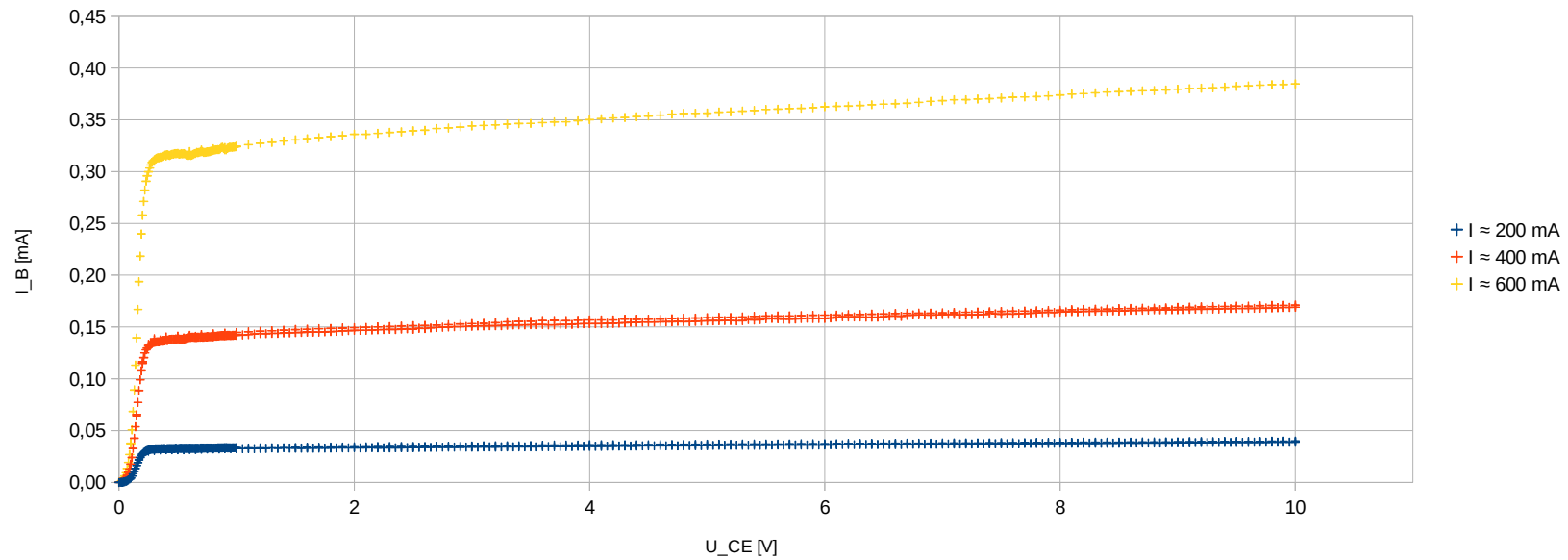
Graf č. 7:  
Napětí na modré LED  
× proud detektorem



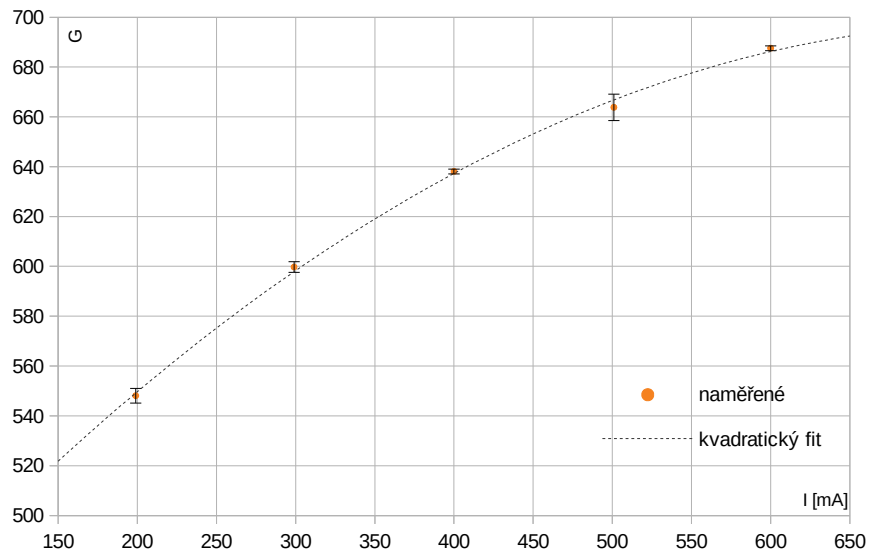
Graf č. 8:  
Proud modrou LED  
× proud detektorem



Graf č. 9: Proud osvětleným fototranzistorem



Graf č. 10: Zisk fototranzistoru



I [mA]	199
I_CO [μA]	35,9 ± 0,1
I_φ [nA]	65,5 ± 0,3
G	548 ± 3

I [mA]	299
I_CO [μA]	86 ± 0,3
I_φ [nA]	143,4 ± 0,05
G	600 ± 2

I [mA]	400
I_CO [μA]	157,1 ± 0,2
I_φ [nA]	246,2 ± 0,2
G	638 ± 1

I [mA]	501
I_CO [mA]	0,2502 ± 0,0020
I_φ [μA]	0,3769 ± 0,0001
G	664 ± 5

I [mA]	600
I_CO [mA]	0,3585 ± 0,0005
I_φ [μA]	0,5214 ± 0,0001
G	688 ± 1

## Diskuse výsledků

V-A charakteristika diod je zatížená systematickou chybou způsobenou odporem vodičů a spojů v obvodu a nepřesným určením odporu dekády. Vliv této systematické chyby jsme omezili tím, že byl odpor  $R$  použit jako volný parametr regrese. U červené LED, kde byl vliv rekombinace/tunelování zanedbatelný, byl Shockleyho model v souladu s naměřenými daty. V případě modré diody už tento vliv zanedbatelný nebyl a model tak přesně nekopíruje naměřenou V-A charakteristiku. Sílu těchto vlivů je možné posoudit také na grafech statického a dynamického odporu – zatímco Shockleyho model předpovídá čistě exponenciální závislost (v semilogaritmickém grafu tedy přímkou), skutečně naměřená data na přímce striktně neleží.

## Závěr

Podářilo se změřit V-A charakteristiku červené i modré LED, určit jejich statický a dynamický odpor i prahové napětí. Shockleyho model použitý při regresi byl vhodným modelem pro červenou LED, ale u modré LED už byl příliš velký vliv rekombinace/tunelování, proto model neodpovídal realitě.

Podářilo se naměřit V-A charakteristiku fototranzistoru pro tři různé úrovně osvětlení a určit zisk pro pět různých osvětlení. Závislost zisku fototranzistoru na proudu osvětlovací diodou (a tedy i přibližně na intenzitě osvětlení) lze aproximovat parabolou.

## Literatura

- [1] KUDRNOVÁ, Hana et al. (5) Charakteristiky optoelektronických součástek. *Základní fyzikální praktikum: ... vše o fyzikálním praktiku najdete právě na těchto stránkách* [online]. Praha, 15. 3. 2018 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/305>
- [2] *Kvantová optika a optoelektronika* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: [https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_305.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_305.pdf)
- [3] Shockley diode equation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Shockley\\_diode\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Shockley_diode_equation)