

Název a číslo úlohy	#9 - Detekce optického záření
Datum měření	25. 2. 2015
Měření provedli	Tereza Schönfeldová, David Roesel
Vypracoval	David Roesel
Datum	27. 2. 2015
Hodnocení	

1 Úvod

Fotodetektory jsou při práci s elektromagnetickým zářením často využívanými nástroji. Fungují zpravidla na základě převodu optického signálu na signál elektrický, který už umíme měřit. Energie, kterou mají fotony, přejde na energii částic na fotodetektoru, čímž způsobí buď tepelný pohyb, nebo přechod elektronů na vyšší energetickou hladinu, což vede k vytvoření volných nosičů náboje. Tento jev, zvaný *fotoefekt*, způsobuje vznik měřitelného elektrického proudu.

V tomto protokolu jsme se zabývali měřením základních vlastností několika druhů fotodetektorů.

2 Pomůcky

Dvojitý zdroj stejnosměrného napětí, digitální multimetry, červená laserová dioda ($\lambda = 650 \text{ nm}$), IR laserová dioda ($\lambda = 780 \text{ nm}$), halogenová lampa, fotoodpor, křemíková PIN fotodioda, NPN fototranzistor, otočný potenciometr ($R = 0 - 2 \text{ k}\Omega$), otočný atenuátor, zapojovací panel, spojovací kabely, stojánky k uchycení prvků.

3 Postup a výsledky

3.1 Ověření vlastností fotoodporu

3.1.1 Požadované výsledky

Určete velikost zátěžového odporu R_z . Do grafu vynesete závislosti $R_f(P_i)$ tak, že na obou osách použijete logaritmické měřítko.

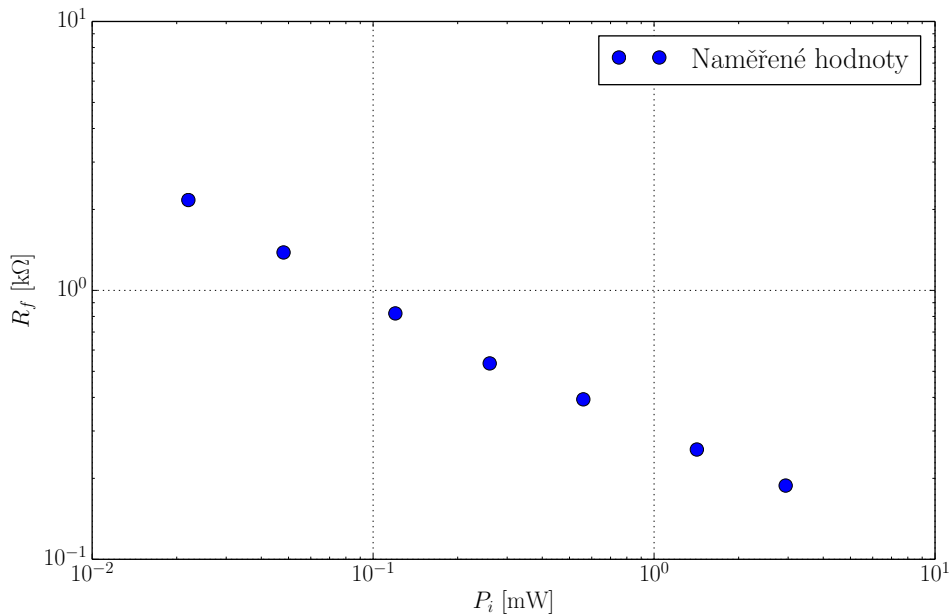
3.1.2 Postup a naměřené hodnoty

Před začátkem měření jsme za pomoci asistenta zběžně zkontrolovali, zda hodnoty prošlého výkonu skrze otočný atenuátor odpovídají hodnotám uvedeným v tabulce pro laserovou diodu na konci zadání úlohy [1]. Vzhledem k relativně malým odchylkám pozorovaných hodnot vůči tabulkovým jsme nadále používali jen hodnoty z tabulky.

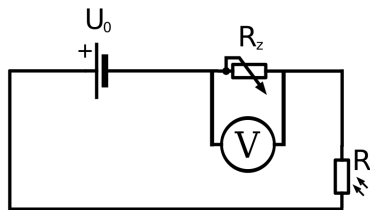
Naším cílem bylo proměřit závislost elektrického odporu R_f fotoodporu na optickém výkonu na něj dopadajícího světla P_i z červené laserové diody. Zapojení jsme zvolili dle schématu na Obr. 2. Fotoodpor jsme tedy zapojili do série se zátěžovým odporem R_z , který jsme zvolili 2050Ω , jelikož na otočném potenciometru nešla nastavit hodnota bližší pořadovaným $10 \text{ k}\Omega$. Výše zmíněnou hodnotu maximálního odporu potenciometru jsme změřili pomocí digitálního multimetru. Ze zdroje stejnosměrného napětí jsme do obvodu přivedli $U_0 = 10 \text{ V}$. Z Ohmova zákona pro jednotlivé součástky obvodu jsme před měřením určili závislost R_f na napětí měřeném na potenciometru U_z jako

$$R_f = R_z \left(\frac{U_0}{U_z} - 1 \right).$$

Závislost $R_f(P_i)$, kterou jsme naměřili, je vynesena v grafu na Obr. 1.



Obrázek 1: Ověření vlastností fotoodporu; závislost el. odporu R_f fotoodporu na výkonu záření P_i na něj dopadajícího.



Obrázek 2: Schéma zapojení pro ověření vlastností fotoodporu.

3.2 VA charakteristika fotoodporu

3.2.1 Požadované výsledky

Do jednoho grafu vykreslete VA charakteristiky fotoodporu.

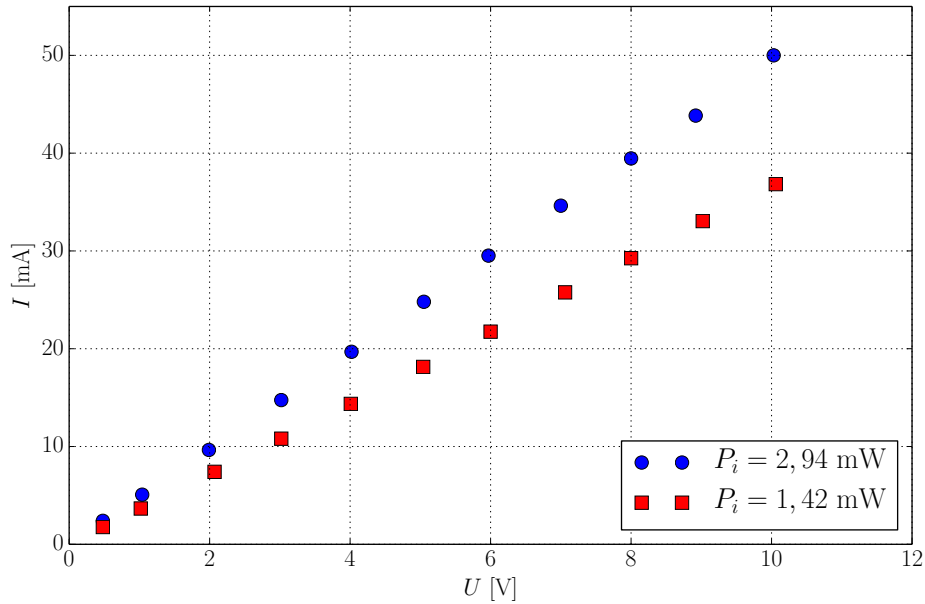
3.2.2 Postup a naměřené hodnoty

Naším úkolem bylo ověřit linearitu VA charakteristiky fotoodporu při alespoň dvou různých hodnotách dopadajícího optického výkonu. Zapojení jsme zvolili dle schématu na Obr. 4. Na fotoodpor jsme přivedli napětí zhruba v rozsahu $U_0 = 0 - 10\text{ V}$ a měřili jsme pomocí digitálního multimetru obvodem protékající proud (napětí jsme odečítali přímo ze zdroje). Na fotoodpor jsme přitom svítili červenou laserovou diodou jednou přímo, a podruhé přes otočný atenuátor. Naměřené hodnoty jsou vyneseny do grafu na Obr. 3.

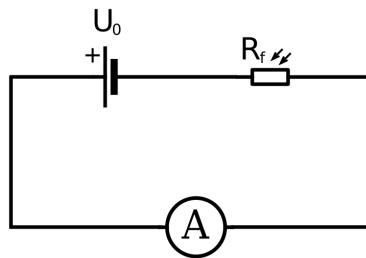
3.3 VA charakteristika fotodiody

3.3.1 Požadované výsledky

Do jednoho grafu vykreslete VA charakteristiky PIN fotodiody při různých velikostech dopadajícího optického výkonu P_i . Okomentujte závislost VA charakteristiky na hodnotě P_i .



Obrázek 3: VA charakteristika fotoodporu; závislost proudu I na napětí na zdroji U při volbě dvou různých výkonů dopadajícího záření.



Obrázek 4: Schéma zapojení pro měření VA charakteristiky fotoodporu.

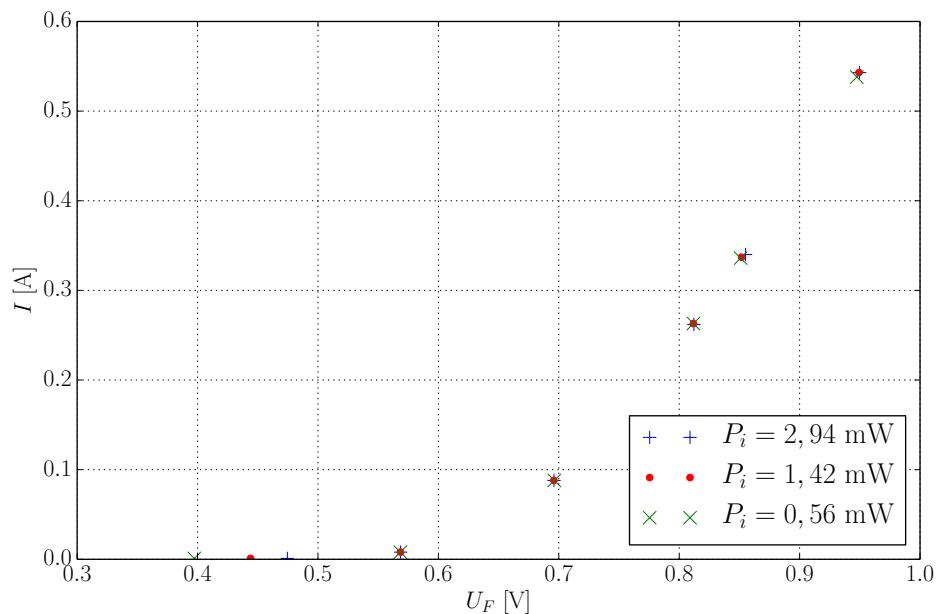
3.3.2 Postup a naměřené hodnoty

Měli jsme za úkol zapojit PIN fotodiodu do obvodu v přímém a následně také závěrném směru bez zátěžového odporu. Zapojení jsme zvolili dle schématu na Obr. 7, přičemž pro druhý směr byl zdroj zapojen opačně. V přímém směru jsme měnili napětí U_F přibližně v rozmezí $0,4 - 1$ V a sledovali na digitálním multimetru napětí na fotodiodě spolu s proudem v obvodu, který jsme odečítali přímo ze zdroje. V závěrném směru jsme s napětím U_R pohybovali v rozsahu $-10 - 0$ V. Charakteristiku jsme proměřili pro stejné hodnoty napětí se třemi různými intenzitami dopadajícího světla pro každý ze směrů, přičemž ty jsme určili experimentálně. Naměřené hodnoty jsou pro přímý směr vyneseny do grafu na Obr. 5 a pro závěrný do grafu na Obr. 6.

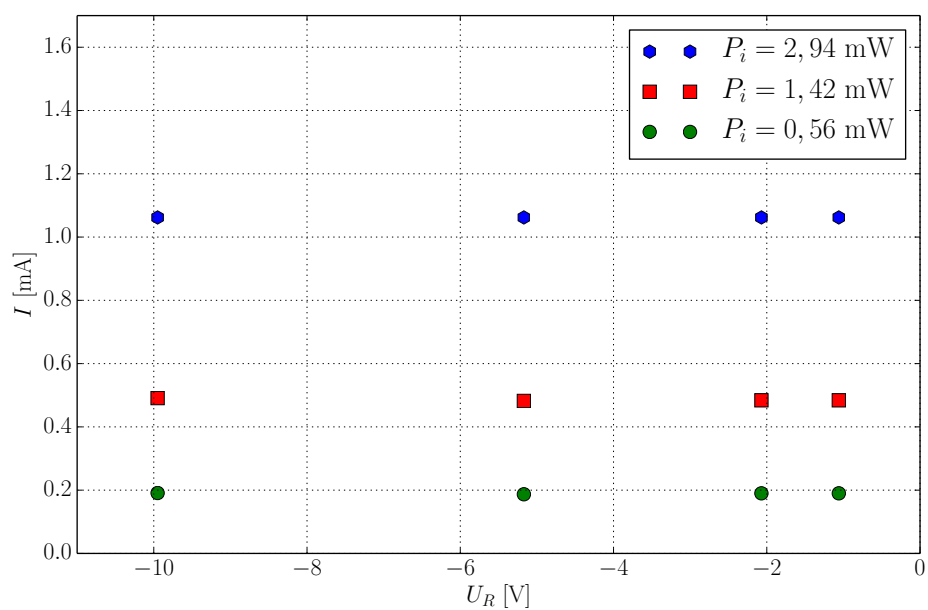
3.4 Spektrální citlivost fotodiody

3.4.1 Požadované výsledky

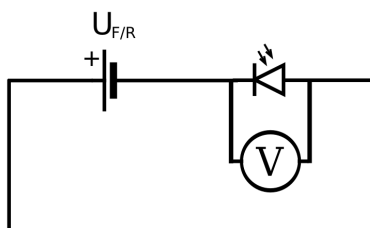
Určete hodnoty citlivosti \mathcal{R}_λ a η_λ pro vlnové délky použitých zdrojů světla. Porovnejte získané hodnoty s teorií. Naměřené hodnoty $I_f(P_i)$ vynesete do jednoho grafu a získanou závislost porovnejte s teorií.



Obrázek 5: VA charakteristika fotodiody; závislost proudu I na napětí U_F v přímém směru při volbě tří různých výkonu dopadajícího záření.



Obrázek 6: VA charakteristika fotodiody; závislost proudu I na napětí U_R v závěrném směru při volbě tří různých výkonu dopadajícího záření.



Obrázek 7: Schéma zapojení pro měření VA charakteristiky fotodiody.

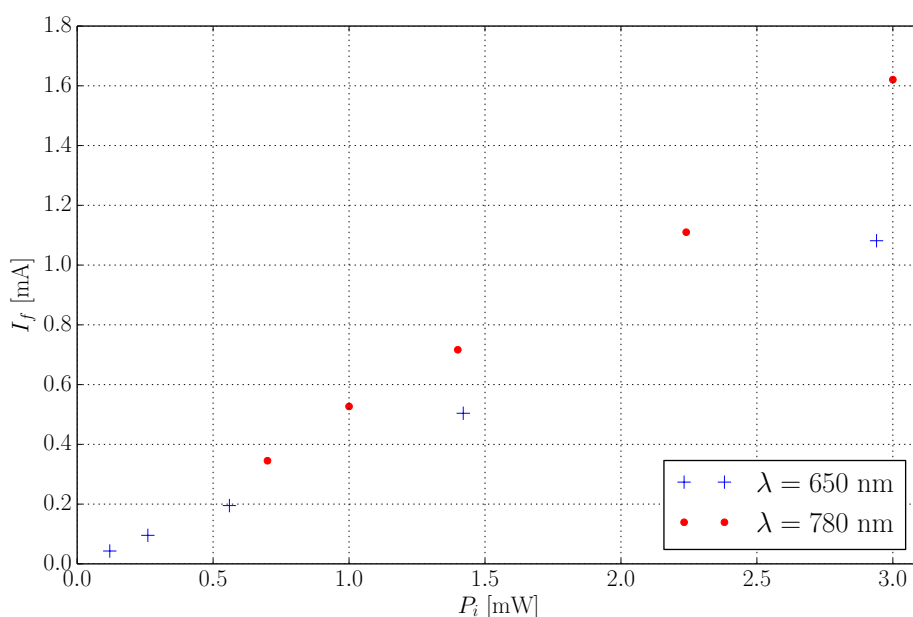
3.4.2 Postup a naměřené hodnoty

Měli jsme za úkol určit hodnoty citlivosti \mathcal{R}_λ a η_λ pomocí vztahu

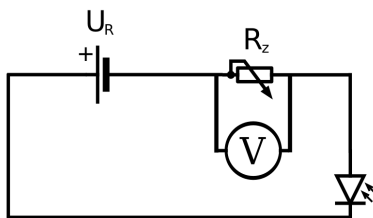
$$\mathcal{R}_\lambda = \frac{I_f}{P_i} = \eta_\lambda \frac{e}{h\nu} = \eta_\lambda \frac{\lambda}{1,24},$$

kde I_f je elektrický proud protékající detektorem, P_i je výkon dopadajícího záření, λ je vlnová délka záření v mikrometrech a η_λ je *kvantová účinnost*, která vyjadřuje pravděpodobnost, že foton po dopadu na fotodetektor vygeneruje pár elektron-díra, který vytvoří elektrický proud.

Zapojení jsme zvolili dle schématu na Obr. 9. Diodu jsme tedy zapojili v závěrném směru do série se zátěžovým odporem a přivedli jsme na ni napětí $U_R = -10$ V. Proud I_f jsme měřili nepřímo (skrže Ohmův zákon) změřením napětí U_z na zátěžovém odporu $R_z = 1,006$ k Ω pomocí digitálního multimetru. Naměřená závislost $I_f(P_i)$ je po vyškrtnutí chyb měření (viz diskuse) vynesena do grafu na Obr. 8. Původní naměřené hodnoty i s těmi chybnými jsou v Tab. 1.



Obrázek 8: Naměřená závislost proudu I_f , který protékal detektorem, na výkonu na detektor dopadajícího záření P_i .



Obrázek 9: Schéma zapojení pro měření spektrální citlivosti fotodiody.

3.5 Fotovoltaické zapojení fotodiody

3.5.1 Požadované výsledky

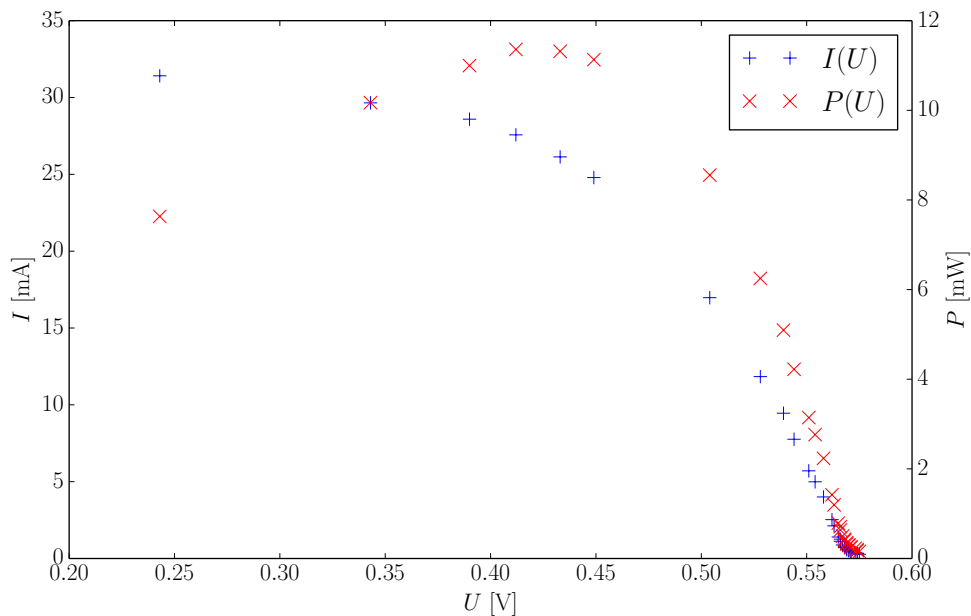
Vykreslete VA charakteristiku PIN fotodiody ve fotovoltaickém režimu a její závislost výstupního výkonu $P(U)$ do jednoho grafu. Uveďte hodnotu maximálního výstupního výkonu fotodiody P_{max} a schéma zapojení solárního panelu s výkonem 1 W při napětí 1 V.

P_i [mW]	I_f [mA]	U_z [V]	\mathcal{R}_λ $[\frac{A}{W}]$	η_λ [-]	P_i [mW]	I_f [mA]	U_z [V]	\mathcal{R}_λ $[\frac{A}{W}]$	η_λ [-]
2,940	1,082	1,0880	0,37	0,70	3,00	1,621	1,6304	0,54	0,86
1,420	0,504	0,5071	0,35	0,68	2,24	1,110	1,1167	0,50	0,79
0,560	0,195	0,1963	0,35	0,66	1,40	0,717	0,7209	0,51	0,81
0,260	0,096	0,0961	0,37	0,70	1,00	0,527	0,5300	0,53	0,84
0,120	0,043	0,0433	0,36	0,68	0,70	0,345	0,3473	0,49	0,78
0,048	0,020	0,0201	0,42	0,79	0,46	0,146	0,1470	0,32	0,50
0,022	0,011	0,0107	0,48	0,92	0,34	0,080	0,0803	0,23	0,37

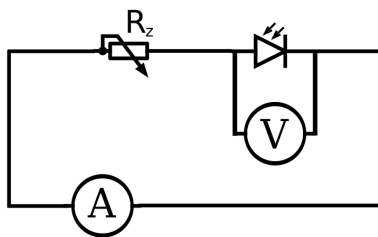
Tabulka 1: Naměřené hodnoty, závislost proudu I_f , který protékal detektorem, na výkonu na detektor dopadajícího záření P_i , pro červenou (nalevo) a IR (napravo) laserové diody. U_z je napětí naměřené na zátěžovém odporu, \mathcal{R}_λ citlivost fotodetektoru a η_λ kvantová účinnost. Chyby měření jsou zvýrazněny.

3.5.2 Postup a naměřené hodnoty

Zapojili jsme halogenovou lampu a nasměrovali ji na PIN fotodiodu. Zapojení ostatních součástí jsme volili dle schématu na Obr. 11. PIN fotodiodu jsme tedy zapojili do série s otočným potenciometrem a měřili proud protékající obvodem spolu s napětím na fotodiodě, obojí pomocí digitálních multimetrů. Výsledná VA charakteristika a závislost výkonu fotodiody ve fotovoltaickém režimu na napětí jsou vyneseny do grafu na Obr. 10. Maximální výstupní výkon P_{max} jsme změřili při napětí $U = 0,412$ V a proudu $I = 27,57$ mA jako $P_{max} = 11,35$ mW. Napětí naprázdno jsme určili jako $U_{OC} = 0,576$ V a proud nakrátko jako $I_{SC} = 31,33$ mA. Fotočlánek s výkonem 1 W při napětí 1 V by vypadal jako 37 paralelně zapojených trojic námi proměřovaných fotodiod (vzhledem ke tvaru naměřené závislosti $P(U)$ a předpokládanému výkonu 9 mW každé z fotodiod za daného napětí).



Obrázek 10: VA charakteristika PIN fotodiody ve fotovoltaickém režimu; závislost proudu v obvodu I a výstupního výkonu P na napětí U .



Obrázek 11: Schéma zapojení pro měření fotovoltaiického zapojení fotodiody.

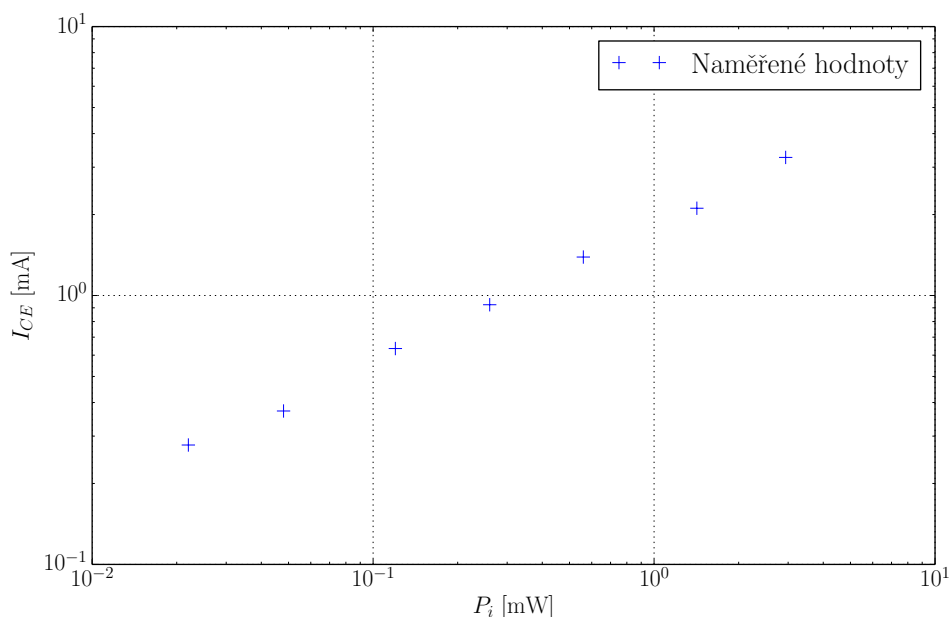
3.6 Proudová charakteristika fototranzistoru

3.6.1 Požadované výsledky

Vykreslete graf závislosti proudu I_{CE} na dopadajícím optickém výkonu P_i tak, že na obou osách použijete logaritmické měřítko.

3.6.2 Postup a naměřené hodnoty

Měli jsme za úkol měřit proud procházející fototranzistorem v závislosti na dopadajícím optickém výkonu. Obvod jsme zapojili podle schématu na Obrázku 5 v zadání [1] se zátěžovým odporem $R_z = 100 \Omega$, na kterém jsme měřili napětí multimetrem. Při napětí ze zdroje $U_C = 5 \text{ V}$ jsme změřili sedm hodnot proudu za svitu červenou diodou skrze atenuátor.



Obrázek 12: Naměřené hodnoty, závislost proudu I_{CE} tranzistorem na výkonu P_i na něj dopadajícího záření.

4 Diskuse a závěr

U předloženého fotoodporu jsme úspěšně proměřili závislost jeho el. odporu na optickém výkonu světla, které na něj dopadalo. Závislost se při logaritmických osách (Obr. 1) jeví jako lineární - při normální škále odpovídá přibližně exponenciálnímu poklesu.

Ověřili jsme linearitu VA charakteristiky fotoodporu při dvou různých hodnotách dopadajícího optického výkonu. Z vynesných bodů (Obr. 3) je dále patrné, že při menší intenzitě

dopadajícího záření protéká obvodem za stejného napětí také menší proud, což odpovídá (byť triviálnímu) předpokladu.

PIN fotodiody jsme zapojili jak v přímém, tak závěrném směru a v obou případech jsme proměřili její VA charakteristiku (pro 3 různé hodnoty dopadajícího záření). V případě propustného směru se zaznamenané body (Obr. 5) na grafu zdánlivě nijak neliší, v závěrném směru však rozdíly patrné jsou. Tento fakt připisujeme tomu, že se v případě závěrného směru pohybujeme na stupnici proudu v jednotkách miliampérů, na rozdíl od směru propustného, ve kterém jsme měřili v ampérovém rozsahu a tudíž s nedostatečnou přesností. V obou směrech však při každém z měření platilo, že nejvyšší intenzita dopadajícího světla měla za následek také větší nebo rovnou odečtenou hodnotu proudu za stejného napětí, což odpovídá našim předpokladům. Vzhledem k tomu, že jsme pro závěrný směr volili napětí v rozsahu $U_R = -10 - 0 \text{ V}$, odpovídá lineární závislost předpokladům o tvaru VA charakteristiky v oblasti nad uváděným průrazným napětím $U_P = -30 \text{ V}$.

Za pomoci obou laserových modulů jsme změřili citlivost PIN fotodiody pro dvě různé vlnové délky. Vypočítali jsme také hodnoty kvantové účinnosti a smysluplné hodnoty jsme vynesli do grafu. Z grafu závislosti protékajícího proudu na výkonu záření (Obr. 8) je patrné, že je fotodioda citlivější na vlnovou délku $\lambda = 780 \text{ nm}$. Ze všech hodnot (Tab. 1) si můžeme všimnout, že pro poslední dvě políčka na atenuátoru byly nezávisle na zdroji záření naměřeny nekonzistentní hodnoty. Tuto skutečnost přisuzujeme tomu, že údaje v tabulce nebyly pro tyto dva filtry zcela přesné. Dalším problémem bylo přesné umístění atenuátoru do správné pozice, jelikož i ta nejmenší změna jeho polohy na podložce a otočení způsobovala obrovské rozdíly naměřených hodnot. Ve výše zmíněné tabulce jsme tedy zvýraznili hodnoty, které jsme do grafu a teoretických závěrů neuvažovali.

Vykreslili jsme VA charakteristiku PIN fotodiody ve fotovoltaickém režimu spolu se závislostí výstupního výkonu na napětí. Určili jsme hodnotu maximálního naměřeného výstupního výkonu jako $P_{max} = 11,35 \text{ mW}$ a určili jsme schéma zapojení solárního panelu s požadovanými parametry.

Jako poslední z úkolů jsme vykreslili graf závislosti proudu v obvodu s fototranzistorem v závislosti na dopadajícím optickém výkonu.

Reference

- [1] *Návod k úloze 9 - Detekce optického záření* [online], [cit. 5. března 2015], http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_09.pdf