

Fotometrie moderně – s fototranzistorem a digitálním multimetrem

Josef Hubeňák

Univerzita Hradec Králové

Vnímání světla je pro člověka prvním (a snad i posledním) prožitkem a světlo je tak úzce spojeno s životem, že bylo součástí všech kultů a náboženství. I Kniha první Mojžíšova Genesis obrací pozornost ke světlu: "I řekl Bůh: Budiž světlo. A bylo světlo. Viděl, že světlo je dobré, a oddělil světlo od tmy." [1]

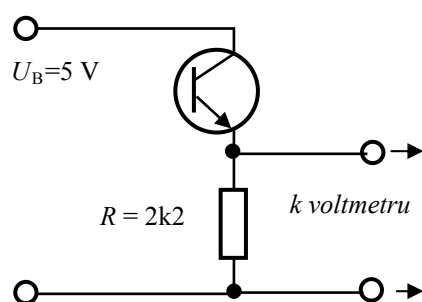
Pro fyziku je studium světla a přenosu energie zářením velmi podstatnou oblastí; zde bylo dosaženo hranic klasické fyziky a začínala fyzika kvantová a relativistická - ultrafialová katastrofa byla zažehnána kvanty energie hf (Max Planck), nezávislost rychlosti šíření světla na volbě vztažné soustavy vyřešila Einsteinova speciální teorie relativity. Ve škole je ale obtížné měřit spektrální hustotu intenzity záření nebo rychlost světla. Je ale možné :

- sestavit laboratorní práci z fotometrie,
- využít Excel pro zakreslení polárních grafů,
- počítat měrný světelný výkon žárovky,
- vypočítat kvantovou účinnost emise světla na PN přechodu,
- sestavit laboratorní práci s polarizací světla žárovky a laseru,
- zakreslit v Excelu graf v polárních souřadnicích.

První pomůckou je sonda pro měření osvětlení.

Sonda je osazena fototranzistorem BPW42 (výrobce Vishay-Telefunken). Jde o křemíkový fototranzistor s maximálním napětím $U_{ke} = 30 \text{ V}$ a maximálním kolektorovým proudem 50 mA. Saturační napětí je asi 400 mV a kolektorový proud bez osvětlení je menší než 200 nA. Sonda má jednoduché zapojení:

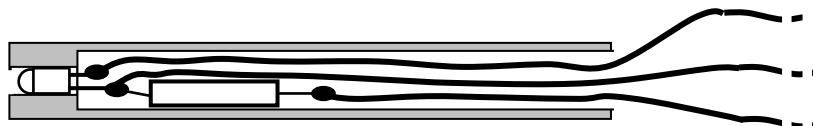
Obr.1 Zapojení sondy



Kolektorový proud roste lineárně s osvětlením a na rezistoru měříme napětí v rozsahu od 0,01 V do 4,5 V. V tomto rozsahu je výstupní napětí přímo úměrné osvětlení. Při kalibraci je vhodné použít jako zdroj světla matovou žárovku 60 W a luxmetr, např. PU150 METRA. Tento fototranzistor má maximum spektrální citlivosti pro vlnovou délku 830 nm (infračervená oblast) a pokud bychom ke kalibraci použili denní světlo a k měření žárovku, bude měření zatíženo systematickou chybou. Konstrukce sondy není

náročná, stačí plastová trubička od popisovače (Centropen 0,3 liner 2921 nebo něco podobného) a její špičku převrtat na průměr tranzistoru.

Obr.2 Sonda

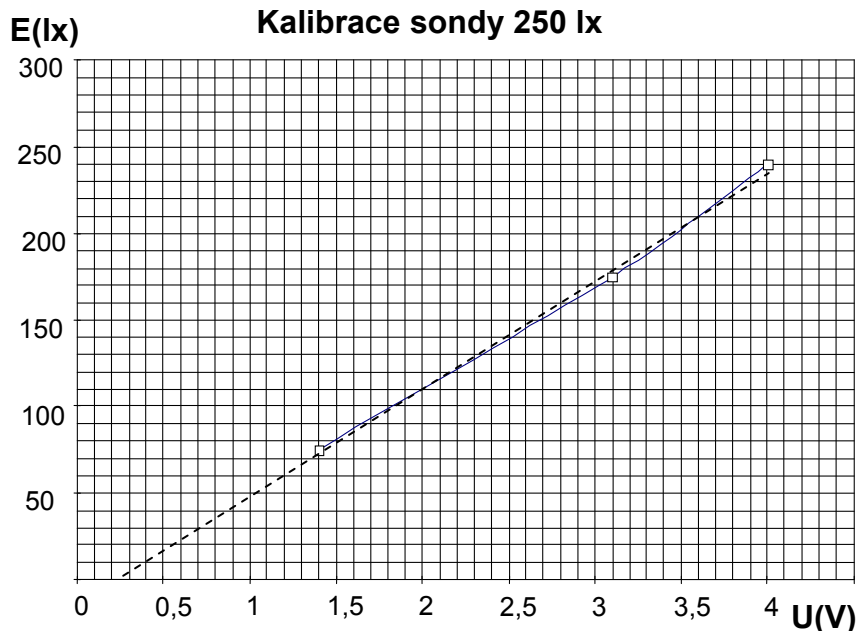


Vzhledem k dobré linearitě sondy stačí určit výstupní napětí pro osvětlení $E = 0 \text{ lx}$, pak zvětšovat osvětlení, až naměříme na výstupu sondy 4 V a luxmetrem zjistit odpovídající osvětlení $E_{\max}$. Naměřená osvětlení v daném intervalu mohou studenti odečítat z grafu, ale při zpracování na počítači se nabízí výpočet v Excelu a z grafu určená lineární aproximace. Pro použitou sondu (šedé pouzdro) platí $E_x = 63,47(U_x - 0,25)$. Osvětlení E měříme

v relativně malé vzdálenosti a sonda s rozsahem do 250 lx je použitelná pro žárovky s malým příkonem.

Pro měření větších osvětlení stačí v sondě použít rezistor s menším odporem – další sonda má vestavěn $R = 470$ ohmů a je použitelná pro měření do 1100 lx (červené pouzdro). Lineární aproximace pro výpočet osvětlení je $E_X = 226,8(U_X - 0,15)$

Obr.3



Další pomůckou je upravený tank pro vyvolávání svitkových filmů.

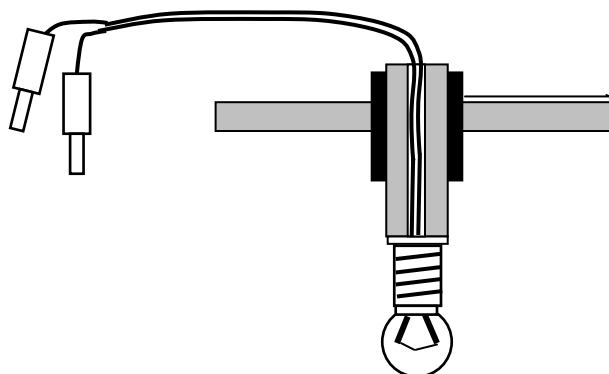
Obr 4.

Víko tanku doplníme úhломěrnou stupnicí. Postačí dva plastové úhlooměry, které přilepíme na víko. Cívka z tanku má dvě části, z nichž použijeme tu spodní. Dovnitř vsadíme válcový trn, na jehož konec vlepíme objímku pro žárovku se závitem E 10 a vyvedeme vodiče. Na čelo této části cívky přilepíme ukazatel pro odečítání úhlu otočení. Uzavřeme tank a shora vsadíme část cívky se žárovkou. Odměříme výšku vlákna žárovky nade dnem tanku a ve stejné výšce vyvrtáme do nádoby otvor pro vsazení sondy s fototranzistorem.



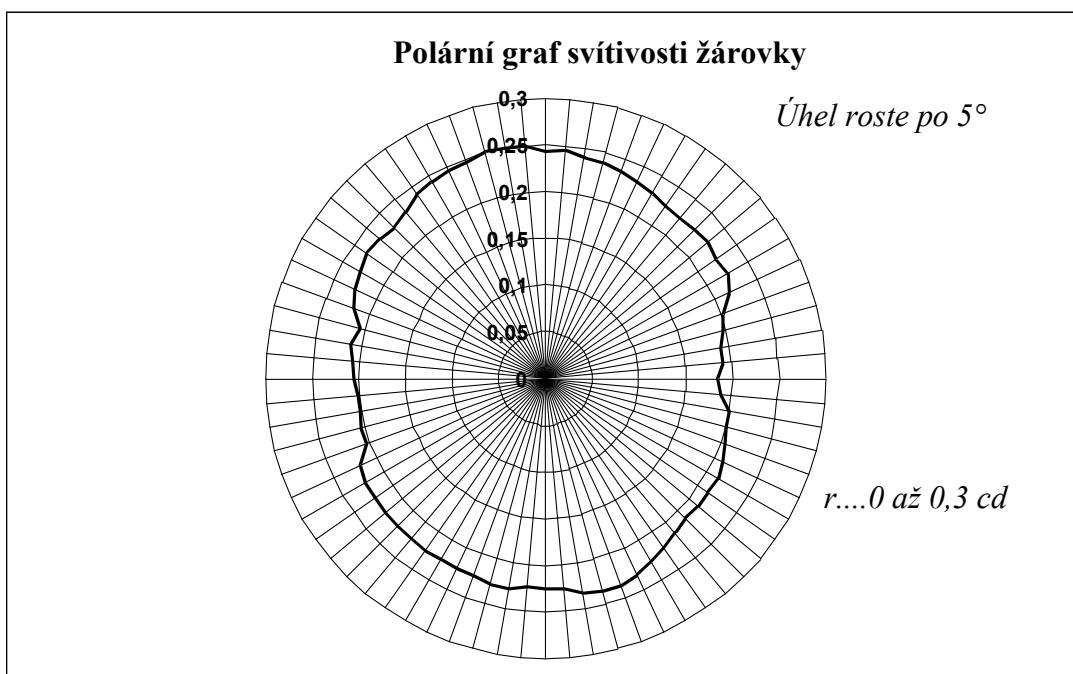
Osvětlení měříme pro úhel rostoucí po 5° a dostaneme 72 hodnot. Z digitálního multimetru odečítáme výstupní napětí a v Excelu převedeme pomocí kalibračního vzorce na hodnoty osvětlení.

Obr.5 Část cívky se žárovkou



V Excelu lze snadno vytvořit polární graf svítivosti:

Obr.6



Je patrné, že žárovka nesvítí do všech směrů stejně. Dvě protilehlá maxima jsou ve směrech kolmých na rovinu vlákna, které je u použitého typu napjato do tvaru obráceného písmene V. Minima jsou ve směrech rovnoběžných s rovinou vlákna a vzniknou tak, že vzdálenější rameno vlákna je zastíněno ramenem bližším. Rozdíl v dosaženém osvětlení je asi 60 luxů, ale pouhým okem jej nepostřehneme. Průměrná hodnota osvětlení je asi 210 luxů a s touto znalostí si můžeme dovolit výpočet průměrné svítivosti žárovky, jejího světelného toku a konečně i měrného světelného výkonu žárovky.

Výpočet průměrné svítivosti :

$$I = E \cdot r^2 = 210 \cdot 0,032^2 = 0,215 \text{ cd}$$

Výpočet celkového světelného toku žárovky vychází z předpokladu, že vlákno žárovky svítí do všech směrů stejně a dále zanedbáme ztrátu světelného toku, který směřuje do patice žárovky.

$$\Phi = 4\pi I = 12,56 \cdot 0,215 = 2,7 \text{ lm}$$

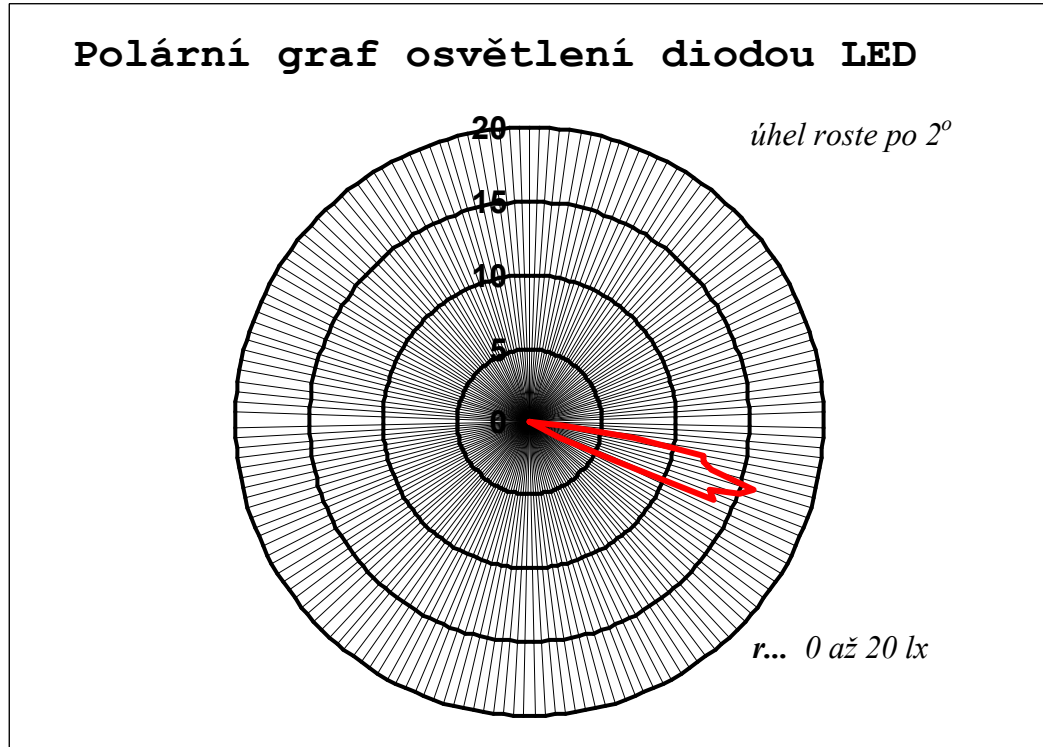
Měrný světelný výkon žárovky určíme jako podíl celkového světelného toku a elektrického příkonu (je třeba ještě změřit proud žárovkou, zde $I = 52 \text{ mA}$) :

$$\frac{\Phi}{P} = \frac{\Phi}{UI} = \frac{2,7}{6,3 \cdot 0,052} = 8,24 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

V technické literatuře [2] lze nalézt pro žárovku s wolframovým vláknem hodnotu 6 až 8 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

Polární graf pro červenou diodu LED má výraznou směrovou charakteristiku:

Obr.7



Tady se nabízí určit kvantovou účinnost jako poměr počtu emitovaných fotonů za jednu sekundu a počtu elektronů, které prošly PN přechodem svítivé diody. Počet elektronů za jednu sekundu je roven

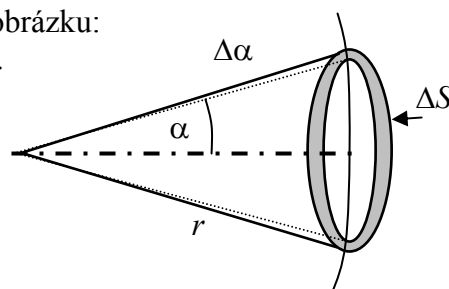
$$n_e = \frac{I_D}{q_e} = \frac{15,9 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}} = 9,92 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}, \text{ kde } I_D \text{ je proud diody.}$$

Počet fotonů, vyzářených diodou za jednu sekundu, je roven podílu zářivého toku P a energie jednoho fotonu. Zářivý tok P je roven $\Phi / 683$ pro vlnovou délku 555 nm, ale naše dioda vysílá fotony s vlnovou délkou 660 nm. Samotný světelný tok určíme jako součet příspěvků $\Delta\Phi = \Delta\Omega I(\alpha)$,

$$\Delta\Phi = \Delta\Omega \frac{E(\alpha)}{r^2}, \text{ kde } \Omega \text{ je prostorový úhel ve steradiánech, } E(\alpha) \text{ je osvětlení naměřené ve}$$

vzdálenosti $r = 3 \text{ cm}$. Úhel $\alpha = 0$ platí pro směr maxima svítivosti. Výpočet přírůstku prostorového úhlu $\Delta\Omega$ je zřejmý z obrázku:

Obr.8.



Platí $\Delta S = r \cdot \Delta\alpha \cdot 2\pi \cdot r \sin\alpha$ a z toho $\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{r^2} = 2\pi \sin\alpha \cdot \Delta\alpha$

Při výpočtu musíme přírůstek $\Delta\alpha$ dosadit v radiánech.

Tabulka:

α°	E (lx)	$\Delta\Omega$ (sr)	$\Delta\Phi$ (lm)
1	15.5	$0.9569 \cdot 10^{-3}$	$13.35 \cdot 10^{-3}$
2	15.11	1.9136	26.00
3	13.98	2.8696	36.11
4	13.22	3.8248	45.50
5	13.60	4.7788	58.49
6	13.60	5.7314	70.16
7	11.42	6.6822	68.68
8	7.86	7.6310	53.98
9	5.44	8.5775	41.99
10	3.38	9.5213	28.96
11	1.18	10.4622	11.12
			celkem $\Phi = 454.34 \cdot 10^{-3} \text{ lm}$

$$\text{Zářivý tok } P = \frac{\Phi}{683} \cdot \frac{555}{660} = \frac{0.454}{683} \cdot \frac{555}{660} = 0.559 \text{ mW}$$

Počet fotonů, vyzářených za jednu sekundu

$$n_f = \frac{P}{hf} = \frac{P}{h \frac{c}{\lambda}} = \frac{0.559 \cdot 10^{-3}}{6.626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{0.66 \cdot 10^{-6}}} = 1.856 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

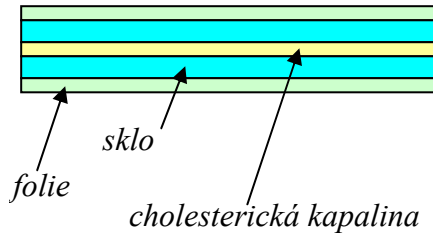
$$\text{Kvantová účinnost } \eta = \frac{n_f}{n_e} = \frac{1.856 \cdot 10^{15}}{9.92 \cdot 10^{16}} = 0.0187 = 1.87\%$$

Zhruba na sto elektronů připadají dva fotony, a to je velmi málo. Na samotném přechodu je kvantová účinnost vyšší, ale konstrukce svítivé diody z průhledného polovodiče (galiumarzenid, galiumfosfid nebo indiumfosfid a indiumarzenid), plastu (epoxid) a přechod do vzduchu vede k totálním odrazům na optických rozhraních a absorpci fotonů v materiálu.

Pro studium polarizovaného světla byla vyrobena třetí pomůcka - polarizátor.

Místo polarizační fólie je v držáku s úhloměry vložen displej získaný z mobilu. Displej má poněkud složitější strukturu :

Obr.9



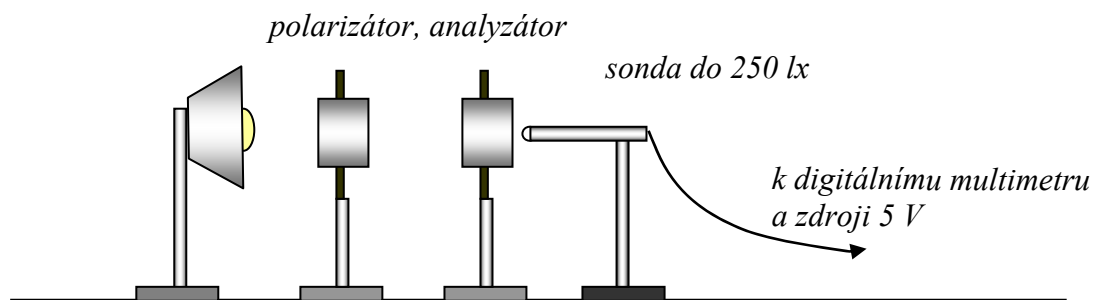
Obr.10



Při průchodu polarizační fólií se viditelné světlo polarizuje, v cholesterické kapalině se jeho polarizační rovina stáčí o 90° a další fólií projde díky tomu, že její polarizační rovina je také otočena o 90° . To lze ověřit jednoduchým pokusem: přes polarizátor pozorujeme světlo odražené na lesklém nátěru lavice nebo odraz na skleněné tabuli a úhel filtru nastavíme na minimum intenzity procházejícího světla. Pak otočíme polarizátor o 180° kolem svislé osy - lesky se rozzáří naplno.

Světlo žárovky je nepolarizované a pro měření použijeme jeden filtr jako polarizátor a druhý jako analyzátor. Měříme v sestavě podle obrázku:

Obr.11



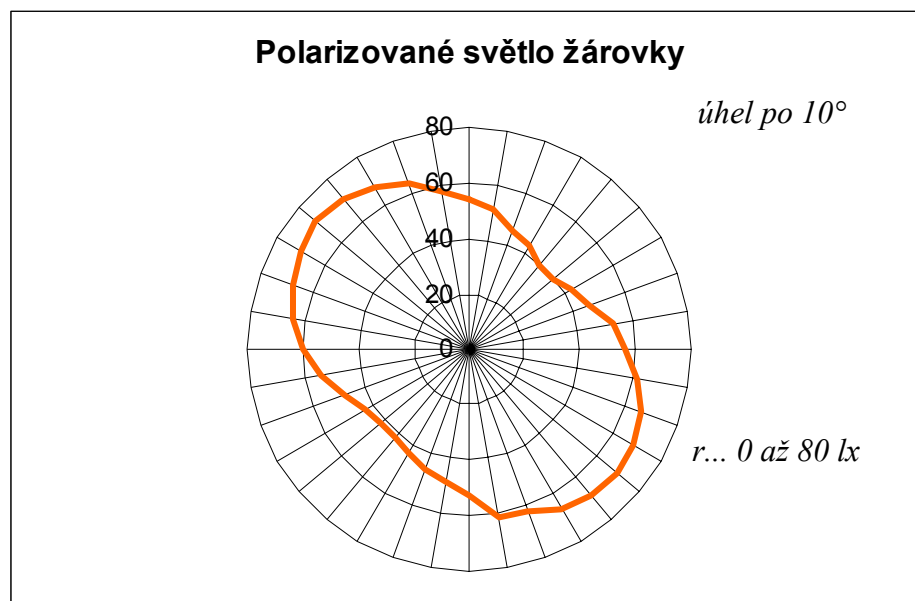
stolní lampa, žárovka 100 W, mléčná

Žárovku je vhodné napájet ze stejnosměrného zdroje, jinak měřené hodnoty kolísají - vlákno žárovky napájené střídavým proudem nemá konstantní teplotu.

V Excelu zpracovaný graf závislosti osvětlení na úhlu otočení analyzátoru ukazuje dvě maxima asi 70 lx a minima přibližně 40 lx. Okem pozorujeme daleko větší rozdíl, a to je třeba vysvětlit.

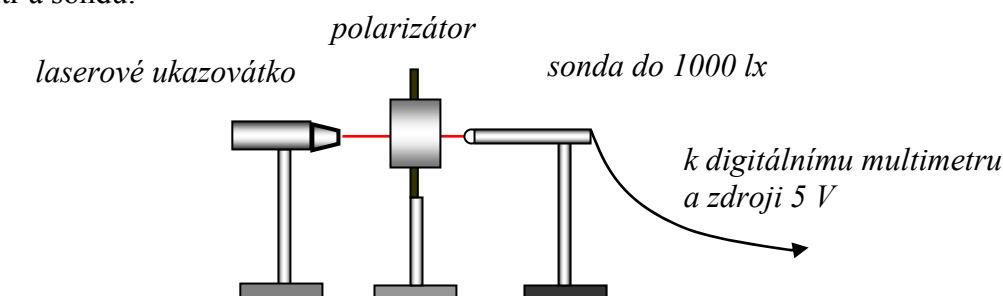
Obr.12

Polarizační fólie jsou účinné v omezeném intervalu vlnových délek, např. fólie s označením BK27 jen v intervalu 320 až 700 nm -viz [4]. Infračervené záření projde oběma filtry bez polarizace a sonda je zaznamenána v plné intenzitě.



Poslední z navržených měření je studium světla laseru. Použijeme laserové ukazovátko, jeden filtr a sondu:

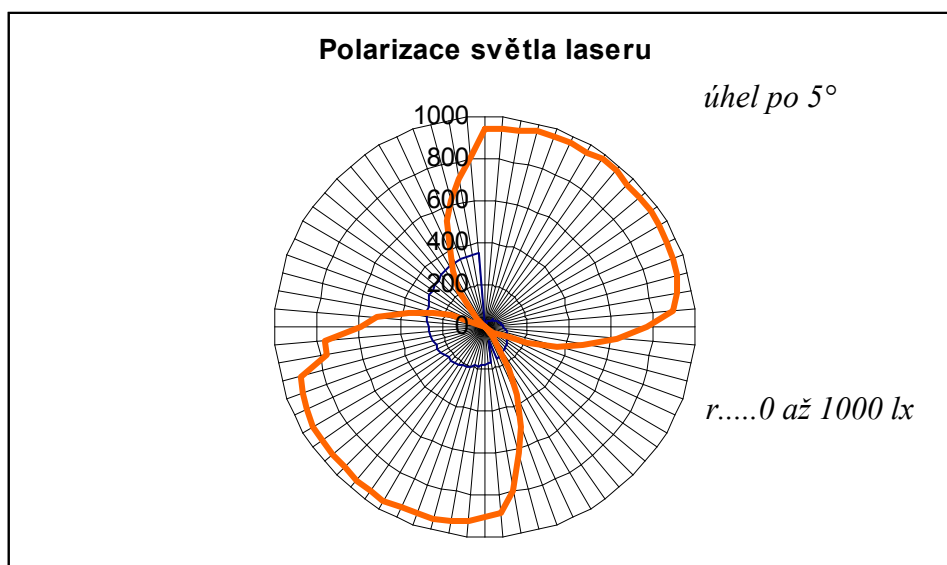
Obr.13



Závislost osvětlení sondy na otočení polarizátoru je velmi výrazná:

Obr.14

Graf má nulová minima ve dvou směrech a maxima až 1000 lx. Je to tím, že světlo je v tomto případě polarizováno již při svém vzniku a jeho vlnová délka spadá do oblasti účinnosti polarizační fólie.



Navržená měření jsou časově nenáročná a zpracování zvládnou studenti snadno se svými znalostmi z informatiky. Neobvyklé polární grafy jsou esteticky zajímavé a dávají jiný pohled na závislosti než běžný kartézský graf. Důležitým momentem je také seznámení s funkcí fototranzistoru, svítivé diody a diodového laseru: tady lze doporučit vedle středoškolských učebnic také práci slovenských kolegů *Fyzikálne základy elektroniky*, kde přístupnou formou autoři vysvětlují vše, s čím se můžeme v elektronice setkat [3].

Literatura:

- [1] Bible Písmo svaté Starého a Nového zákona Ekumenický překlad Praha 1985
- [2] Miškařík, S.: Moderní zdroje světla SNTL 1979
- [3] Baník Ivan, Baník Rastislav, Baník Igor: Fyzika *Fyzikálne základy elektroniky* Slovenská technická univerzita v Bratislavě 1999
- [4] : <http://www.optikavod.cz>