1 Pracovní úkol

1. Pomocí fotometrického luxmetru okalibrujte normální žárovku (stanovte její svítivost). Pro určení svítivosti normální žárovky (a její chyby) vyneste do grafu závislost osvětlení na převrácené hodnotě kvadrátu vzdálenosti luxmetru od žárovky a proveďte lineární regresi.

2. Lummerovým - Brodhunovým fotometrem proměřte fotometrické diagramy žárovky 12 V / 35 W v horizontální i vertikální rovině. Jako normál použijte žárovku okalibrovanou v bodě 1. Naměřené výsledky zpracujte graficky. V grafu vyznačte chyby nepřímého měření.

3. Lummerovým - Brodhunovým fotometrem změřte směrovou závislost svítivosti plošného zdroje světla a ověřte platnost Lambertova zákona. Stanovte jas zdroje s relativní chybou výsledku.

2 Teorie

Bodový zdroj světla či zdroj světla malých rozměrů charakterizujeme pomocí svítivosti I. Jednotkou svítivosti je kandela (cd), jedna ze základních jednotek SI. Svítivost obecně závisí na směru.

Fotometrický diagram vznikne tak, že v každém směru od zdroje vyneseme velikost svítivosti v daném směru. Osvětlení E vyvolané zdrojem o svítivosti I spočítáme jako:

$$E = \frac{I}{r^2}, \tag{1}$$

kde r je vzdálenost zdroje světla od místa, ve kterém nás osvětlení zajímá.

Plošný zdroj světla charakterizujeme pomocí jasu B:

$$B_\vartheta = \frac{I_\vartheta}{S \cos \vartheta}, \tag{2}$$

kde I_ϑ značí svítivost plošky o ploše S, ϑ je úhel mezi normálou plochy a směrem, pod kterým plošku pozorujeme. B_ϑ je potom příslušný jas.

Je-li svítivost I_ϑ dána vztahem:

$$I_\vartheta = I_0 \cos \vartheta, \tag{3}$$

potom zdroj nazýváme kosinovým zářičem. Vztah (3) nazýváme Lambertovým zákonem. I_0 je svítivost v kolmém směru.

Jestliže dosadíme z (3) do (2), dosáváme:

$$B_\vartheta = \frac{I_0}{S} = B \tag{4}$$

Vidíme tedy, že jas kosinového zářiče B nezávisí na úhlu pozorování.

Fotometrický diagram v změříme pomocí Lummerova - Brodhunova fotometru. Jeho náčrt nalezneme v [1], str. 130. Je založen na tom, že porovnáváme osvětlení dvou ploch. Jedna je osvětlována normálovým zdrojem, druhá plocha je osvětlována ze zdroje, jehož fotometrický diagram měříme. Mají-li obě plochy stejné osbětlení, podle (1) platí:

$$I_z = I_n \frac{r_z^2}{r_n^2}, \tag{5}$$

kde I_n je svítivost normálového zdroje, r_n je jeho vzdálenost od fotometru, I_z je svítivost měřeného zdroje, r_z je potom jeho vzdálenost od fotometru. Pro zvýšení přenosti můžeme fotometr otočit o 180° a měření opakovat.

3 Výsledky měření

Nejprve okalibrujeme normální žárovku. K změření osvětlení v příslušné vzdálenosti použijeme luxmetr. Naměřené výsledky jsou v tabulce 1. Luxmetr neměl stanovenou třídu přesnosti, proto jsme maximální chybu měření odhadli na polovinu dílku stupnice, směrodatnou odchylku potom na třetinu maximální chyby.

Grafické znázornění závislosti opsvětlení na převrácené hodnotě kvadrátu vzdálenosti luxmetru od žárovky je v grafu 1. Použitím lineární regrese (viz [2]) dostáváme závistlost:
$E = (5,68 \pm 0,06)/r^2 + (-7,5 \pm 0,7)$
Svítivost I normální žárovky je:
I=(5,68±0,06) cd

K proměření fotometrického diagramu v horizotnální i vertikální použijeme Lummerův - Brodhunův fotometr. Fotometr i normálovou žárovku fixujeme. Vzdálenost mezi fotometrem a normálovou žárovkou je:
$r_n = (20 \pm 1)\, cm$
Jako normálovou žárovku použijeme žárovku okalibrovanou v bodu 1 pracovního úkolu.

Měřenou žárovku (natočenou v požadovaném úhlu) budeme posouvat tak, abychom měli obě plochy fotometru stejně osvětlené. Měření provedeme v obou polohách fotometru. Naměřené hodnoty pro fotometrický diagram v horizontální rovině vidíme v tabulce 2. Hodnoty pro fotometrický diagram ve vertikální rovině jsou v tabulce 3. r_z je vzdálenost mezi fotometrem a měřenou žárovkou. Uvádíme průměrnou hodnotu ze zjištěných vzdáleností mezi měřenou žárovkou a fotometrem. Svítivost I spočítáme podle vztahu (5).

Nulovou hodnotu úhlu ϑ při proměřováni fotometrického diagramu v horizontální rovině jsme volili natočení žárovky, při kterém jsme očekávali maximální svítivost, tj při kolmé poloze vlákna na spojnici žárovka-fotometr. Nulová hodnota úhlu ϑ při měření fotometrického diagramu ve vertikální rovině značí polohu žárovky objímkou vzhůru, 90° potom znamená vodorovnou polohu.

Je třeba poznamenat, že měření fotometrického diagramu v horizontální a vertikální rovině proběhlo s odlišnými žárovkami. Fotometrický diagram v horizontální rovině jsme proměřili s žárovkou 12 V, ve vertikální rovině pak s žárovkou 8 V. Vzhledem ke konstrukci držáku jsme fotometrický diagram ve vertikální rovině proměřili pouze v rozsahu do 160°.

Měření s plošným zdrojem probíhalo analogicky jako v předchozím případě. Plošným zdrojem byl kruh o průměru:
$d = (2,8 \pm 0,1)$ cm
Plocha S tedy byla:
$S = (6,1 \pm 0,4)$ cm^2
Naměřené hodnoty, stejně tak jako hodnoty jasu pro jednotlivé úhly natočení, jsou v tabulce 4. Nulová hodnota úhlu ϑ značí přímý směr.

Průměrná hodnota jasu je:
$B = (3200 \pm 700)$ cd.m^{-2}
Relativní chyba je 22%.

4 Diskuse

Při kalibraci normální žárovky jsme nesprávně odhadli, ve kterých bodech měřit osvětlení. Z tohoto důvodu jsou v grafu 1 body koncentrovány u počátku, zatímco pro vyšší hodnoty $1/r^2$ jich je mnohem méně. Bývalo by potřeba více promyslet následné zpracování.

Proložená přímka neprocházela počátkem, což zřejmě znamená, že vzdálenost mezi vyznačenými ryskami nebyla skutečnou vzdáleností mezi luxmetrem a žárovkou. Z tohoto důvodu jsme chybu vzdálenosti r_n odhadli na 1 cm, i když přesnost měřidla byla vyšší.

Při měření pomocí Lummerova - Brodhunova luxmetru záleželo na subjektivním názoru experimentátora, kdy mají obě plochy stejné osvětlení. Protože plochy neměly stejnou barvu, bylo to občas nesnadné rozhodnout. Měření bylo též náročné pro oči, je proto možné, že se na výsledcích (zejména pozdějších měření) podepsala únava očí. Z tohoto důvodu jsme chybu určení r_z uvažovali 0,5 cm.

Měření fotometrického diagramu v horizontální rovině dopadlo podle očekávání. Nejmenší svítivost byla při rovnoběžné poloze vlákna žárovky na spojnici žárovka-fotometr (úhly ϑ=90° a ϑ=270°)

Fotometrický diagram ve vertikální rovině se nepodařilo proměřit v celém rozsahu. Bránila tomu konstrukce držáku žárovky. I tak ale lze pozorovat jistou symetrii ve fotometrickém diagramu okolo úhlu ϑ=90°, což byla vodorovná poloha žárovky.

Při porovnání teoretických a naměřených hodnot v grafu 4 vidíme, že se moc neshodují. Příčinou může být hrubá chyba při měření v přímé poloze plošného zdroje. Avšak ani v případě, že bychom za referenční svítivost brali hodnotu při ϑ=10°, hodnoty pro velké úhly natočení by byly menší, než praví teorie. Plošný zdroj tedy zřejmě nemůžeme nazvat kosinovým zářičem, nesplňuje Lambertův zákon. Hodnota jasu závisí na úhlu natočení ϑ, což je též v rozpodu s Lambertovým zákonem.

5 Závěr

1. Požadovaná závislost je v grafu 1. Svítivost normální žárovky je:
   $I = (5,68 \pm 0,06)$ cd
2. Fotometrický diagram žárovky 12 V v horizontální rovině je v grafu 2. Fotometrický diagram žárovky 8 V ve vertikální rovině je v grafu 3.

3. Závislost svítovosti na natočení plošného zdroje je v grafu 4. Jas zdroje byl:
   $B = (3200 \pm 700)\,\mathrm{cd.m^{-2}}$
   Relativní chyba činí 22%. Plošný zdroj nesplňoval Lambertův zákon.

6 Literatura

[1] I. Pelant, J. Fiala, J. Pospíšil, J. Fähnrich: Fyzikální praktikum III - Optika, Karolinum, Praha, 1993
[2] J. Englich: Zpracování výsledků fyzikálních měření, Praha, 2000

Tabulka 1: Kalibrace normální žárovky

osvětlení E [lx]	vzdálenost r [cm]	osvětlení E [lx]	vzdálenost r [cm]
700±8	9±0,1	10±2	64±0,1
250±8	15±0,1	10±2	66±0,1
130±2	20±0,1	10±2	68±0,1
80±2	25±0,1	10±2	70±0,1
50±2	29±0,1	10±2	72±0,1
40±2	33±0,1	10±2	74±0,1
30±2	36±0,1	10±2	76±0,1
30±2	39±0,1	10±2	78±0,1
20±2	42±0,1	10±2	79±0,1
20±2	44±0,1	10±2	80±0,1
20±2	46±0,1	10±2	81±0,1
20±2	48±0,1	10±2	82±0,1
20±2	50±0,1	10±2	83±0,1
10±2	52±0,1	10±2	84±0,1
10±2	54±0,1	10±2	85±0,1
10±2	56±0,1	10±2	86±0,1
10±2	58±0,1	0±2	87±0,1
10±2	60±0,1	0±2	88±0,1
10±2	62±0,1	0±2	89±0,1

Tabulka 2: Fotometrický diagram v horizontální rovině

úhel ϑ [°]	r_z [cm]	E [lx]
0	41,4±0,5	24±3
20	39,3±0,5	22±2
40	41,1±0,5	24±2
60	40,5±0,5	23±2
80	41,95±0,5	25±3
100	36,4±0,5	19±2
120	40,4±0,5	23±2
140	41,0±0,5	24±2
160	38,5±0,5	21±2
180	39,3±0,5	22±2
200	38,9±0,5	21±2
220	42,2±0,5	25±3
240	42,5±0,5	26±3
260	35,8±0,5	18±2
280	37,9±0,5	20±2
300	40,4±0,5	23±2
320	41,4±0,5	24±3
340	39,1±0,5	22±2

Tabulka 3: Fotometrický diagram ve vertikální rovině

úhel ϑ [°]	r_z [cm]	E [lx]
0	42,4±0,5	26±3
10	43,9±0,5	27±3
20	44,0±0,5	27±3
30	44,7±0,5	28±3
40	46,8±0,5	31±3
50	49,0±0,5	34±4
60	50,7±0,5	37±4
70	47,0±0,5	31±3
80	47,1±0,5	32±3
90	47,1±0,5	32±3
100	47,0±0,5	31±3
110	47,6±0,5	32±3
120	50,4±0,5	36±4
130	48,1±0,5	33±3
140	46,0±0,5	30±3
150	43,4±0,5	27±3
160	44,7±0,5	28±3

Tabulka 4: Fotometrický diagram pro plošný zdroj

úhel ϑ [°]	r_z [cm]	I [cd]	B [cd.m^{-2}]
-50	8,3±0,5	1,0±0,2	2400±500
-40	9,7±0,5	1,3±0,2	2800±500
-30	10,7±0,5	1,6±0,2	3000±500
-20	11,9±0,5	2,0±0,3	3400±600
-10	12,1±0,5	2,1±0,3	3400±500
0	13,8±0,5	2,7±0,4	4400±700
10	12,4±0,5	2,2±0,3	3600±600
20	11,9±0,5	2,0±0,3	3400±600
30	11,1±0,5	1,7±0,3	3300±500
40	10,2±0,5	1,5±0,2	3100±500
50	8,9±0,5	1,1±0,2	2800±500
60	7,7±0,5	0,8±0,2	2700±500