

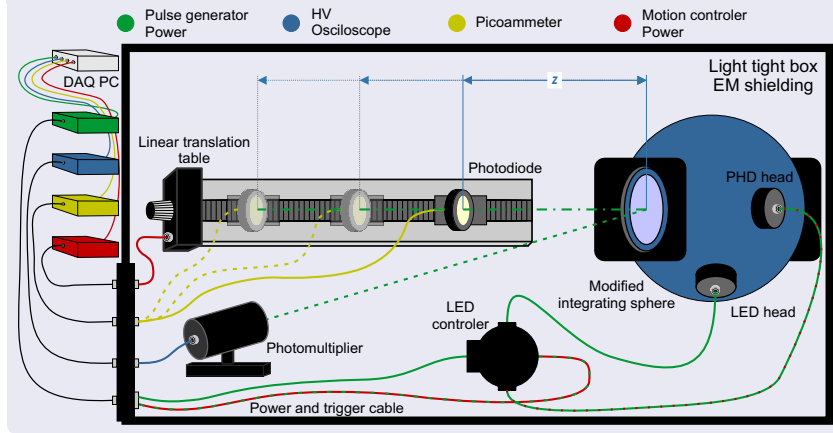
Absolutní kalibrace plošného světelného zdroje Modifikovaná integrační koule

Martin Vacula, Ladislav Chytka, Pavel Horváth

31.1.2024

Cíl absolutní kalibrace

Určit počet fotonů pouštějící výstupní port integrační koule



Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule

- 1 Použít absolutně kalibrovanou fotodiodu (PD)
 - Dvě pracovní PD cross-kalibrovány pomocí dvou (tří) absolutně kalibrovaných PD

Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule

- 1 Použít absolutně kalibrovanou fotodiodu (PD)
 - Dvě pracovní PD cross-kalibrovány pomocí dvou (tří) absolutně kalibrovaných PD
- 2 Určit efektivní spektrální proudovou odezvu PD η_{PD} pro všechny PD

Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule

- 1 Použít absolutně kalibrovanou fotodiodu (PD)
 - Dvě pracovní PD cross-kalibrovány pomocí dvou (tří) absolutně kalibrovaných PD
- 2 Určit efektivní spektrální proudovou odezvu PD η_{PD} pro všechny PD
- 3 Změřit signál (fotoproud) na PD při semi-kontinuálním režimu (frekvence = 100 Hz)

Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule

- 1 Použít absolutně kalibrovanou fotodiodu (PD)
 - Dvě pracovní PD cross-kalibrovány pomocí dvou (tří) absolutně kalibrovaných PD
- 2 Určit efektivní spektrální proudovou odezvu PD η_{PD} pro všechny PD
- 3 Změřit signál (fotoproud) na PD při semi-kontinuálním režimu (frekvence = 100 Hz)
- 4 Určit frekvenční konverzní faktor: 100 Hz \rightarrow 1 Hz pomocí fotonásobiče (PMT)

Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule

- 1 Použít absolutně kalibrovanou fotodiodu (PD)
 - Dvě pracovní PD cross-kalibrovány pomocí dvou (tří) absolutně kalibrovaných PD
- 2 Určit efektivní spektrální proudovou odezvu PD η_{PD} pro všechny PD
- 3 Změřit signál (fotoproud) na PD při semi-kontinuálním režimu (frekvence = 100 Hz)
- 4 Určit frekvenční konverzní faktor: 100 Hz \rightarrow 1 Hz pomocí fotonásobiče (PMT)
- 5 Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule přes světelný tok Φ
 - Použití tzv. *Korekčního faktoru = View factor* pro danou geometrii

Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule

- 1 Použít absolutně kalibrovanou fotodiodu (PD)
 - Dvě pracovní PD cross-kalibrovány pomocí dvou (tří) absolutně kalibrovaných PD
- 2 Určit efektivní spektrální proudovou odezvu PD η_{PD} pro všechny PD
- 3 Změřit signál (fotoproud) na PD při semi-kontinuálním režimu (frekvence = 100 Hz)
- 4 Určit frekvenční konverzní faktor: 100 Hz \rightarrow 1 Hz pomocí fotonásobiče (PMT)
- 5 Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule přes světelný tok Φ
 - Použití tzv. *Korekčního faktoru = View factor* pro danou geometrii
- 6 Určit celkovou nejistotu měření

Cross-kalibrace PD

Momentálně máme k dispozici 5 PD:

Pracovní PD Hamamatsu:

- 2J019
- 2J020

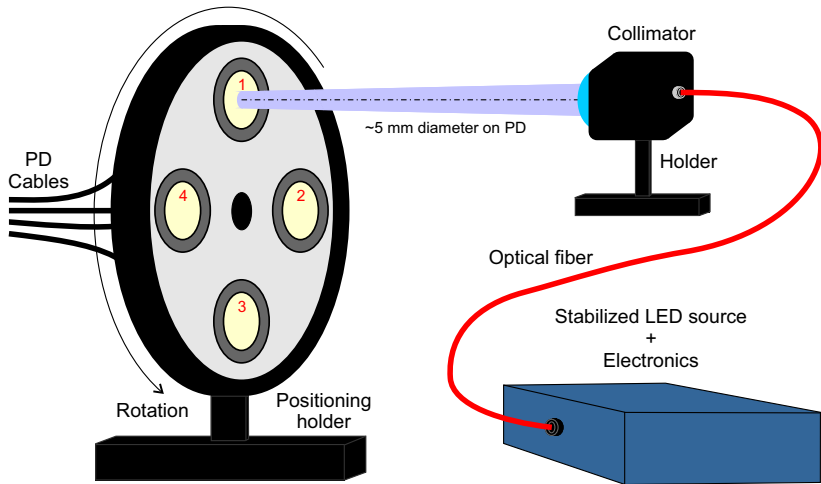
Absolutně kalibrované PD Hamamatsu:

- 2I029
- 2I030

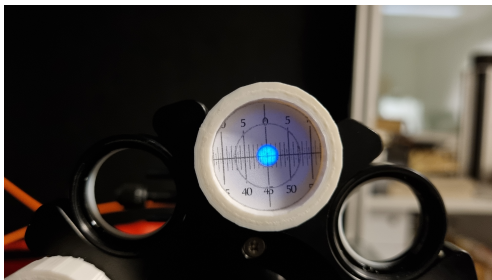
Absolutně kalibrovaná PD NIST:

- NIST
 - Momentálně nepoužívaná, dokud nebude měření odladěno

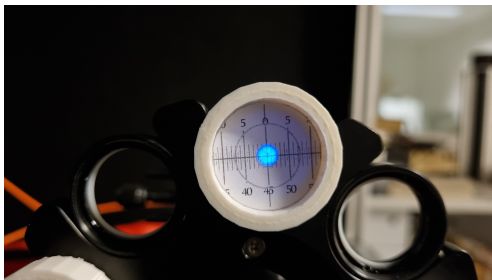
Laboratorní sestava pro Cross-kalibraci



Proces cross-kalibrace

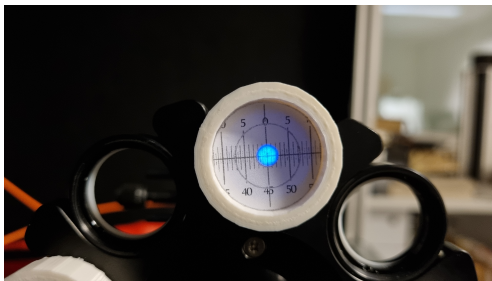


Kolimovaný světelný svazek stabilizované LED na PD (cca 5 mm průměr)



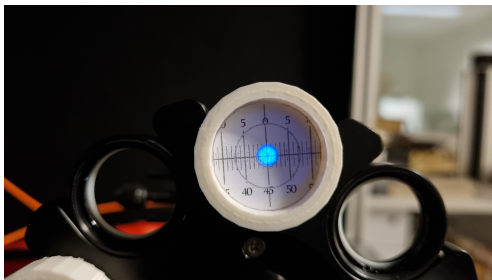
Kolimovaný světelný svazek stabilizované LED na PD (cca 5 mm průměr)

- 1 Změřit temný signál na všech PD – poté co 10 měření



Kolimovaný světelný svazek stabilizované LED na PD (cca 5 mm průměr)

- 1 Změřit temný signál na všech PD – poté co 10 měření
- 2 Změřit signál na všech PD



Kolimovaný světelný svazek stabilizované LED na PD (cca 5 mm průměr)

- 1 Změřit temný signál na všech PD – poté co 10 měření
- 2 Změřit signál na všech PD
- 3 Opakovat proces 600x

Foto laboratorní sestavy Cross-kalibrace

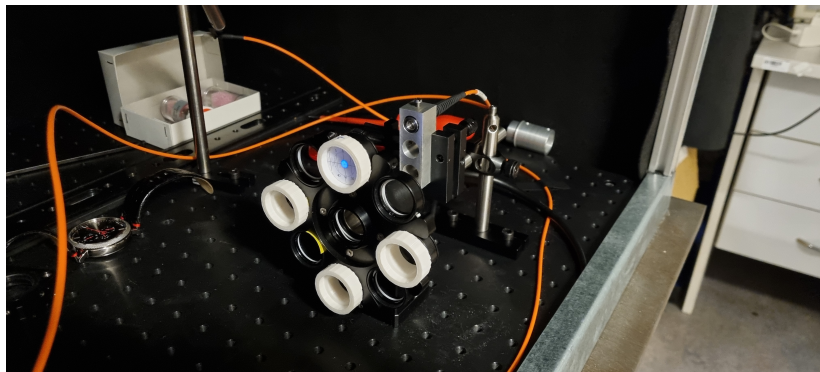
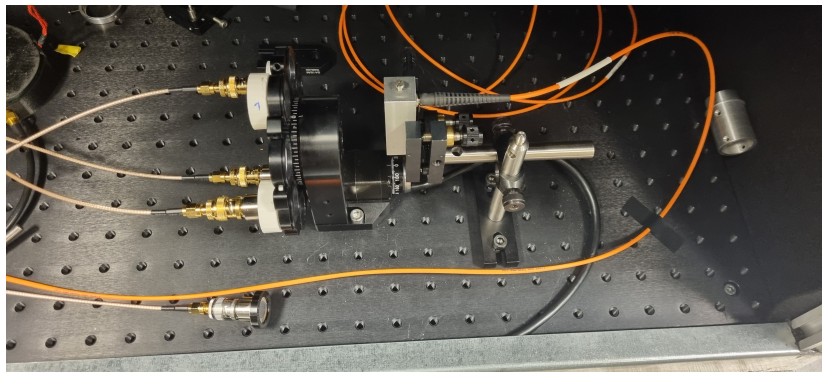
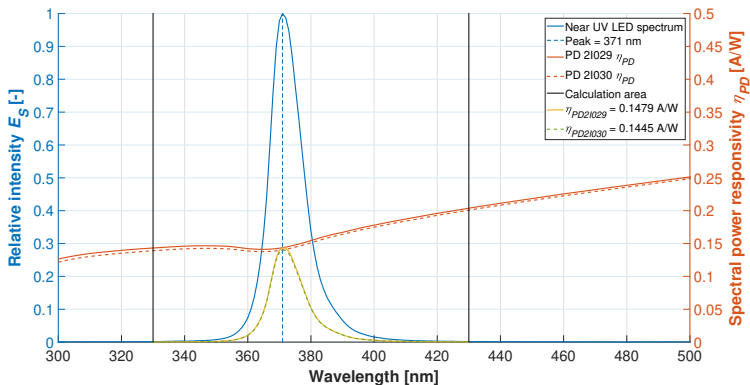


Foto laboratorní sestavy Cross-kalibrace



Cross-kalibrační LED – FAST flasher



Spektrální proudová odezva η_{PD} – výpočet a výsledky

Efektivní spektrální proudová odezva η_{cal} :

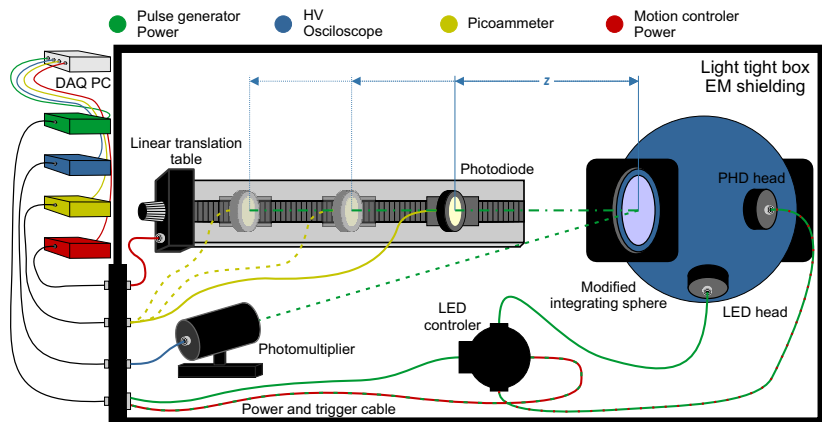
$$\eta_{cal} = \frac{\int_{330}^{430} \eta_{cal}(\lambda) E_S(\lambda) d\lambda}{\int_{330}^{430} E_S(\lambda) d\lambda}$$

Efektivní spektrální proudová odezva η_{PD} :

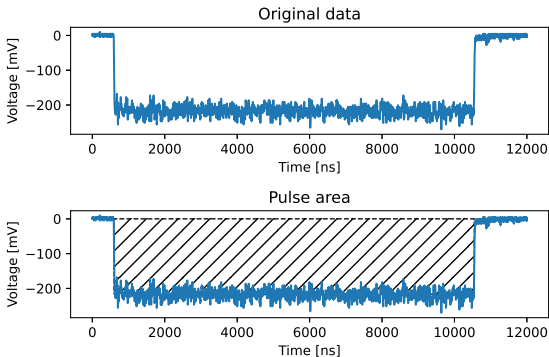
$$\eta_{PD}^i = \frac{1}{N_{cal}} \sum_{j=1}^{N_{cal}} \frac{I_{PD}^{i,j} \eta_{cal}^j}{I_{cal}^j}$$

Sériové číslo	Status	FAST flasher [A/W]
PD 2J019	Pracovní fotodioda	0.1468
PD 2J020	Pracovní fotodioda	0.1515
PD 2I029	Absolutně kalibrovaná	0.1479
PD 2I030	Absolutně kalibrovaná	0.1445

Frekvenční konverzní faktor f_c – stabilita pulzů

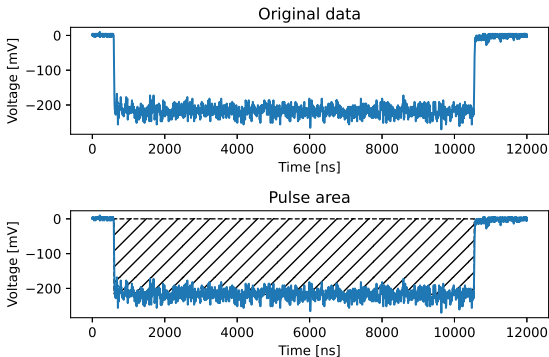


Frekvenční konverzní faktor f_c – stabilita pulzů



PMT mířící do středu výstupního portu integrační koule

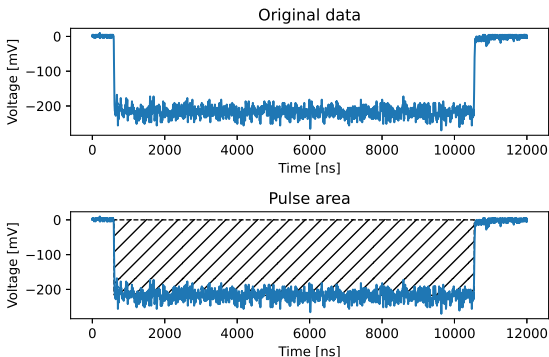
Frekvenční konverzní faktor f_c – stabilita pulzů



PMT míří do středu výstupního portu integrační koule

- 1 Změřit náboj (plocha pulzu) na PMT při $f = 100$ Hz

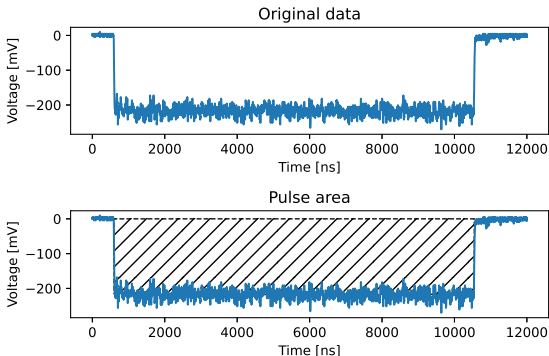
Frekvenční konverzní faktor f_c – stabilita pulzů



PMT mřící do středu výstupního portu integrační koule

- 1 Změřit náboj (plocha pulzu) na PMT při $f = 100$ Hz
- 2 Změřit náboj (plocha pulzu) na PMT při $f = 1$ Hz

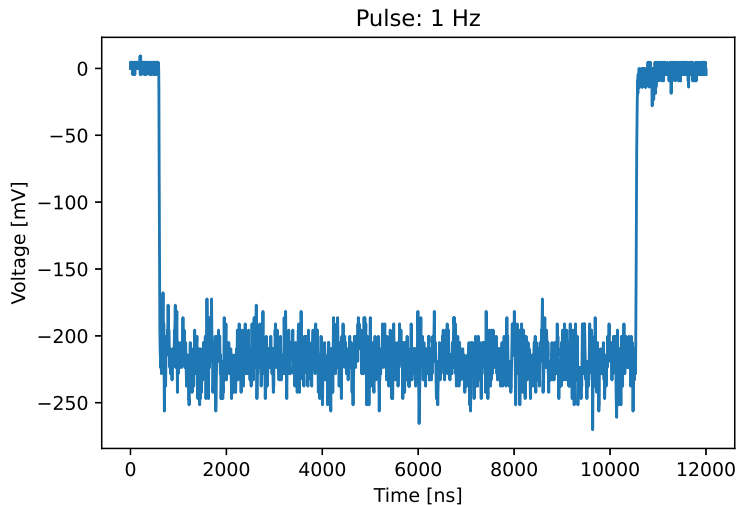
Frekvenční konverzní faktor f_c – stabilita pulzů



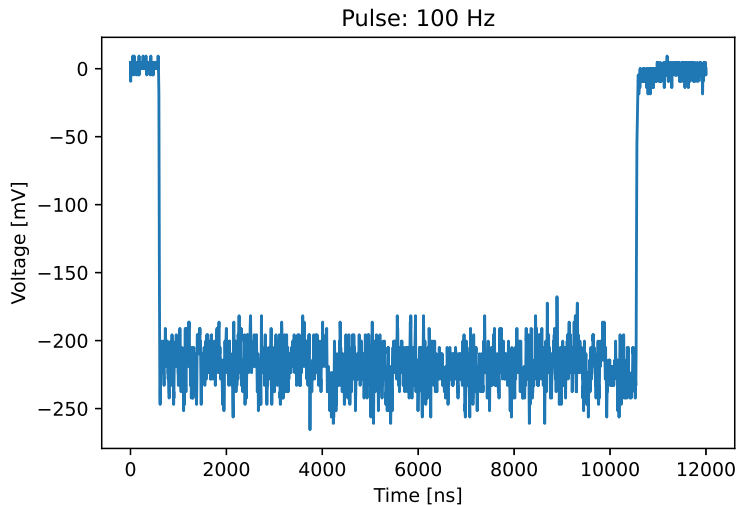
PMT míří do středu výstupního portu integrační koule

- 1 Změřit náboj (plocha pulzu) na PMT při $f = 100$ Hz
- 2 Změřit náboj (plocha pulzu) na PMT při $f = 1$ Hz
- 3 Vypočítat průměrné hodnoty z obou měření a určit f_c jejich podílem

Srovnání 1 Hz a 100 Hz pulzů

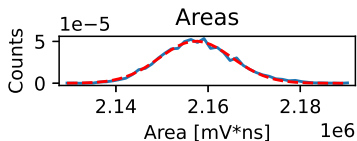
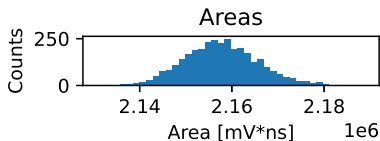
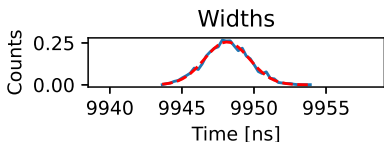
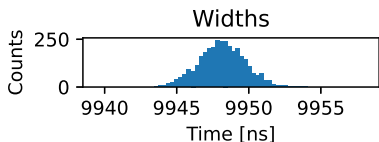
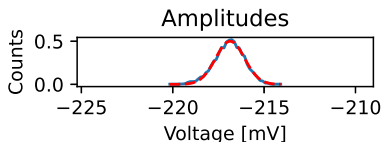
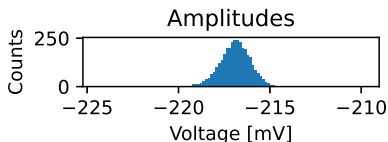


Srovnání 1 Hz a 100 Hz pulzů



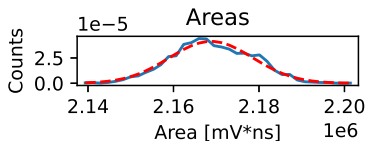
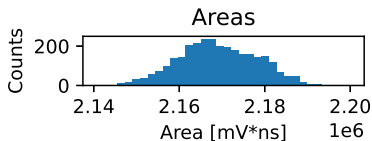
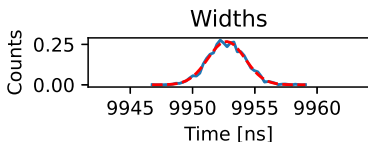
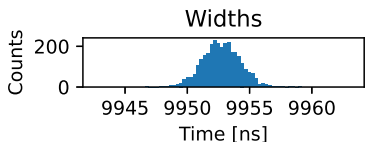
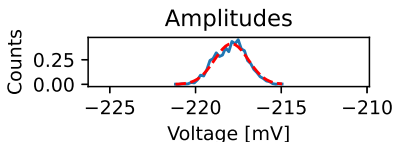
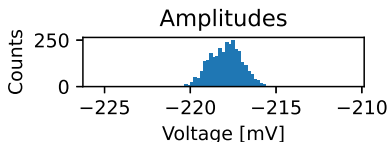
Srovnání 1 Hz a 100 Hz pulzů

1 Hz



Srovnání 1 Hz a 100 Hz pulzů

100 Hz



Frekvenční konverzní faktor f_c – výsledek

Náboj jednoho pulzu Q_f :

$$Q_f = \int_{t_0}^{t_n} U dt$$

Frekvenční konverzní faktor f_c :

$$f_c = \frac{\langle Q_{1\text{Hz}} \rangle}{\langle Q_{100\text{Hz}} \rangle}$$

$f_c = 0.9948 \rightarrow 0.52\%$ rozdíl mezi pulzy při různých frekvencích

Plán: změřit a vypočítat f_c pro $5 \mu\text{s}$ pulz (zatím byl použit $10 \mu\text{s}$ pulz)

Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule

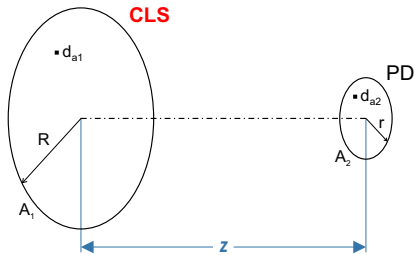
- 1 Použít absolutně kalibrovanou fotodiodu (PD)
 - Dvě pracovní PD cross-kalibrovány pomocí dvou (tří) absolutně kalibrovaných PD
- 2 Určit reálnou spektrální proudovou odezvu PD η_{PD} pro všechny PD
- 3 Změřit signál (fotoproud) na PD při semi-kontinuálním režimu (frekvence = 100 Hz)
- 4 Určit frekvenční konverzní faktor: 100 Hz \rightarrow 1 Hz pomocí fotonásobiče (PMT)
- 5 Určit počet fotonů opouštějící výstupní port integrační koule přes světelný tok Φ
 - Použití tzv. *Korekčního faktoru = View factor* pro danou geometrii
- 6 Určit celkovou nejistotu měření

Teorie určení počtu fotonů $N_{\gamma,S}$ ze světelného toku Φ

- Vychází z teorie přenosu záření (*radiative transfer*)
- Předpoklad Lambertovského zdroje světla
- Analyticky odvozeno pro jednoduché geometrie

Náš případ:

- V přiblížení malých úhlů kruhový Lambertovský zdroj
 - Výstupní port upravené integrační koule
- Kruhová absolutně / křížově kalibrovaná fotodioda
- Detektor umístěn paralelně v optické ose zdroje



Teorie určení počtu fotonů $N_{\gamma,S}$ ze světelného toku Φ

Světelný tok Φ_d :

$$\Phi_d = \frac{I_d \lambda}{fhc} \cdot \frac{f_c}{\eta_{PD}}$$

- I_d – Měřený proud na PD
- f – frekvence (100 Hz)
- η_{PD} – spektrální proudová odezva
- f_c – Frekvenční konverzní faktor

Korekční faktor obecně:

$$F = \frac{1}{\pi} \int_{A1} \int_{A2} \frac{\cos \phi \cos \theta}{z^2} d_{a1} d_{a2}$$

Korekční faktor v praxi:

$$F_{12} = \frac{\Phi_d}{\Phi_S}$$

Korekční faktor pro náš konkrétní případ:

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{\left(\frac{R}{z}\right)^2} + \frac{\left(\frac{r}{z}\right)^2}{\left(\frac{R}{z}\right)^2} \right) - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\left(\frac{R}{z}\right)^2} + \frac{\left(\frac{r}{z}\right)^2}{\left(\frac{R}{z}\right)^2} \right)^2 - \frac{4 \left(\frac{r}{z}\right)^2}{\left(\frac{R}{z}\right)^2}} \right]$$

Teorie určení počtu fotonů $N_{\gamma,S}$ ze světelného toku Φ

Světelný tok Φ_d :

$$\Phi_d = \frac{I_d \lambda}{fhc} \cdot \frac{f_c}{\eta_{PD}}$$

- I_d – Měřený proud na PD
- f – Frekvence (100 Hz)
- η_{PD} – spektrální proudová odezva
- f_c – Frekvenční konverzní faktor

Korekční faktor obecně:

$$F = \frac{1}{\pi} \int_{A1} \int_{A2} \frac{\cos \phi \cos \theta}{z^2} d_{a1} d_{a2}$$

Korekční faktor v praxi:

$$F_{12} = \frac{\Phi_d}{\Phi_S}$$

Počet fotonů v jednom pulzu $N_{\gamma,S}$:

$$N_{\gamma,S} = \frac{I_d \lambda}{fhc} \cdot \frac{f_c t}{\eta_{PD}} \cdot \frac{1}{F_{12}}$$

- t – Délka jednoho pulzu (5 μ s)

Počet fotonů v jednom pulzu $N_{\gamma,S}$:

$$N_{\gamma,S} = \frac{I_d \lambda}{f h c} \cdot \frac{f_c t}{\eta_{PD}} \cdot \frac{1}{F_{12}}$$

Typ zdroje	Pracoviště	I_{LED} [mA]	$N_{\gamma,S}$
KIT IK	SLO	15	2.7881E+09
Orig. IK	WUPP	2.7	4.9269E+09
OLO IK	WUPP	15.6	2.307E+09
Orig. IK	KIT	2.7	335E+09 sr ⁻¹ m ⁻²
OLO IK	KIT	15.9	368E+09 sr ⁻¹ m ⁻²

Diskuse

