

Čítání fotonů

D. Vagner, SPŠ SE Dukelská 13, České Budějovice,

M. Šťasný, SPŠ SE Dukelská 13, České Budějovice,

L. Valica, Gymnázium Varšavská cesta 1, Žilina

N. Vacková, Akademické gymnázium, škola hlavního města Prahy

Abstrakt:

V tomto projektu jsme se seznámili s principy čítání jednotlivých fotonů a možnostmi využití této technologie v praxi. Provedli jsme několik experimentů demonstrující využití této technologie.

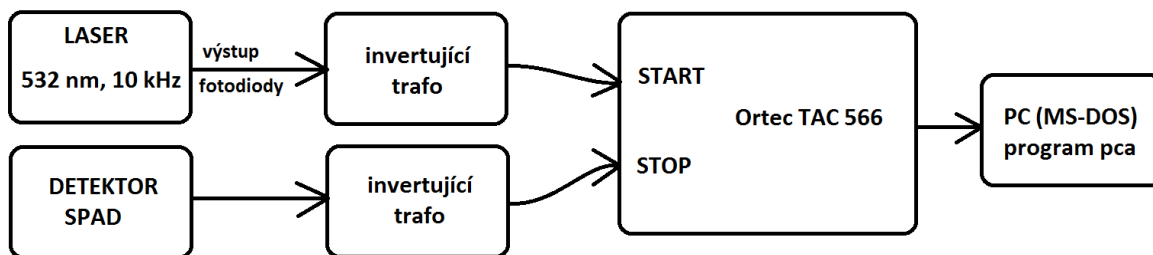
1 Úvod

Moderní kvantové detektory umožňují zachytit velmi slabé optické signály úrovně jednotlivých fotonů a zaznamenat přesný okamžik dopadu fotonu, na čemž je založena metoda čítání jednotlivých fotonů. Tato metoda umožňuje velmi přesné měření velkých vzdáleností, kterého se využívá např. při měřeních v kosmu nebo při mapování gravitačního pole země. My jsme si tuto metodu vyzkoušeli při různých experimentech. Úvodním pokusem bylo měření dráhy uražené laserovým paprskem, dále jsme zjišťovali index lomu tvrzeného skla a rychlost světla ve vzduchu. V posledním měření jsme zaznamenali hladinu šumu světelného pozadí v místnosti. K provedení měření pomocí této metody je nutné sbírat data po delší časový úsek, což je důvod, proč se tato metoda nedá použít k měření rychle probíhajících dějů.

2 Měření

Základní schéma

V okamžik, kdy laser vyšle světelný impuls, se část odrazí do zpětnovazební diody uvnitř laseru, tím je vyvolán kladný elektrický impuls, který je naveden do zařízení TAC 556 (zařízení, které používáme k měření času), kde slouží jako signál start. V této chvíli se spouští čas měření a počítač může zaznamenávat čas dopadu jednotlivých fotonů po každém impulsu laseru. Fotony dopadající na detektor jsou převedeny pomocí lavinové fotodiody do elektrického signálu (impulzu), který pokračuje jakostop signál do převodníku čas - amplituda (TAC 566). V počítači je stop signál zaznamenáván jako jednotlivé dopady fotonů v čase od vyslání laserového impulsu. Protože zařízení TAC reaguje na impulzy opačné polarity, je signál start i signál stop invertován pomocí trafa. Experimentální schéma je znázorněno na obrázku 1. Počet fotonů dopadajících ve stejném čase (časovém intervalu určité šířky) se v programu sečítá. Výhodou je, že při zachování geometrie experimentu dopadají fotony z laseru stále ve stejném čase od vyslání laserového impulsu a mohou se tak načítat. Naproti tomu, fotony z okolí dopadají v čase náhodně a proto se v našem měření načítají mnohem méně. Díky tomu můžeme měřit kvantovým detektorem i při běžném osvětlení místnosti.



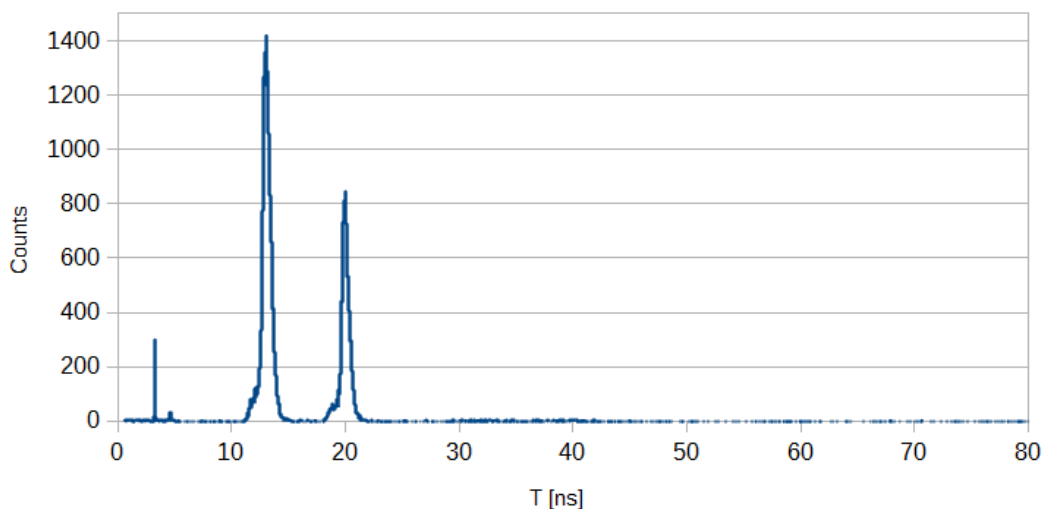
obr. 1 – Schéma zapojení

Měření vzdálenosti dvou objektů

První experiment demonstruje způsob měření vzdálenosti dvou objektů. Do dráhy paprsku umístíme dvě optická sklíčka. Každé z nich odrazí cca 8% světla do detektoru. Program PCA nepracuje s jednotkami SI. Na osu x místo času dosazuje tzv. kanály, kterých je celkem 2048 (díky digitálně-analogovému převodníku). V našem nastavení TAC převodníku odpovídá jednomu kanálu čas 39 ps. Tato hodnota určuje také naše časové rozlišení. Graf měření zobrazuje dva píky, viz obr. 2. Jejich vzdálenost odpovídá časovému zpoždění světelného svazku mezi oběma sklíčky. Po odečtení hodnot kanálů, ve kterých se nachází vrcholové hodnoty a následném vynásobení 39 ps získáme čas potřebný k přechodu paprsku od jednoho sklíčka k druhému. Vzdálenost vypočítáme pomocí vzorce (1):

$$s = c \cdot \frac{t}{2} \quad (1)$$

Měření vzdálenosti



obr. 2 – graf měření vzdálenosti

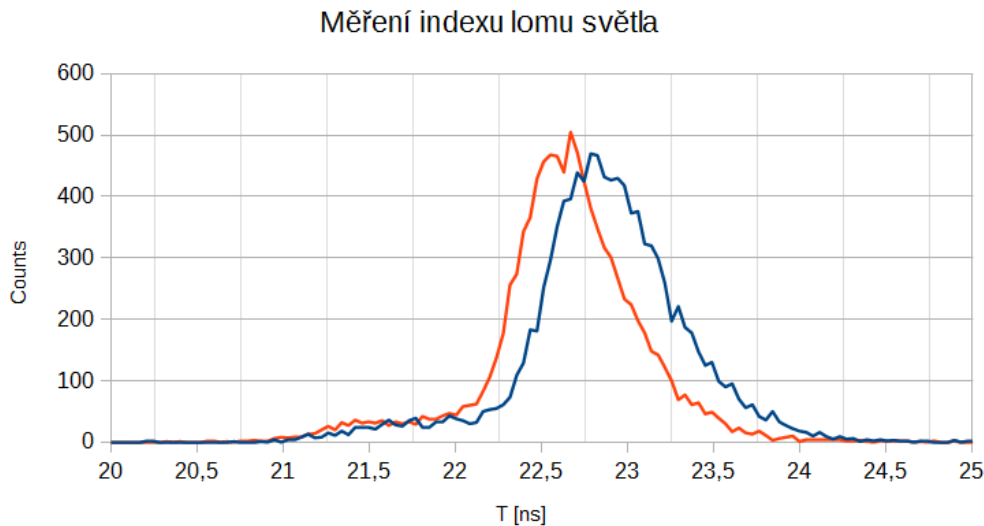
Z výpočtu jsme určili vzdálenost $d=1,03$ m, což odpovídalo fyzicky změřené vzdálenosti mezi oběma odraznými sklíčky.

Index lomu tvrzeného skla

V tomto pokusu do dráhy laserového paprsku umístíme sklíčko a odraz svazku od tohoto skla nasměrujeme do detektoru. Vypočítáme čas, za který paprsek urazí dráhu od laseru ke sklíčku a zpět k detektoru. Zjistíme číslo kanálu, ve kterém se nachází největší počet zachycených fotonů. Z čísla kanálu vypočítáme čas jako v předchozím měření. V druhém měření vložíme před sklíčko náš vzorek tvrzeného skla, tak aby jím procházel svazek tam i zpět a znovu čas změříme. Ze znalosti tloušťky skla vypočítáme jeho index lomu dle vztahu (3):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2) \quad n = \frac{c \cdot (\Delta t + \frac{2d}{c})}{2d} \quad (3)$$

kde n značí index lomu, c rychlost světla a Δt značí časový rozdíl obou naměřených píků. V našem případě jsme určili tloušťku skla jako $d = 4,475$ cm. Výslednou hodnotu indexu lomu jsme vypočítali jako $n = 1,78$. Posun píku způsobený dvojitým průchodem opticky hustším prostředím bloku tvrzeného je znázorněn na obr. 3(modrý pík odpovídá zpožděnému svazku).



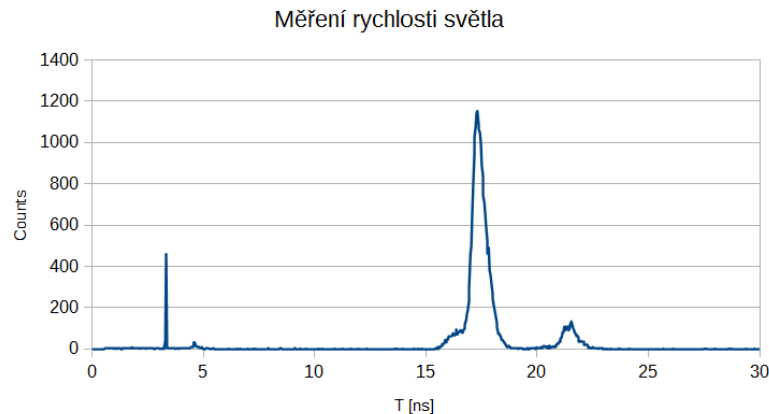
obr. 3 – posun píku po průchodu opticky hustším prostředím

Rychlost světla ve vzduchu

Použijeme stejné experimentální uspořádání jako v prvním pokusu (měření vzdálenosti dvou objektů). Manuálně změříme rozestup sklíčků. Pomocí laseru a detektoru, stejně jako v prvním pokusu, zjistíme čas potřebný k tomu, aby paprsek dorazil od prvního sklíčka k druhému. Ze zjištěného času a naměřené vzdálenosti vypočteme rychlost světla.

$$c = \frac{2s}{\Delta t} \quad (4)$$

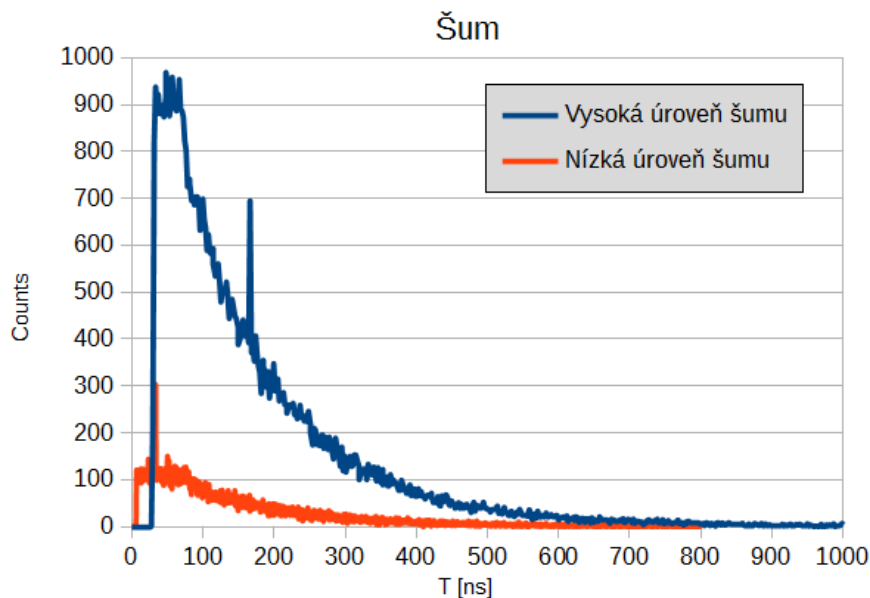
Na optické dráze délky $s=58,8$ cm jsme naměřili časové zpoždění $\Delta t= 4066,14$ ps a hodnotu rychlosti světla jsme vypočetli jako $c= 289\,217\,783$ m/s.



obr. 4 – odrazy fotonů od sklíčků

Šum

Poslední částí našeho bádání bylo zaznamenání světelného šumu a pochopení vlivu vnějších činitelů na výsledné grafy. V důsledku větší pravděpodobnosti dopadu fotonu v prvních okamžicích měření a následného zahlčení detektoru (na krátkou dobu) je výslednicí grafu při větším časovém úseku exponenciála. Tato nekonstantnost se neprojeví při měření ve větším časovém rozlišení (kratším časovém úseku). Zahlčení detektoru je také ovlivněno úrovní okolního osvětlení (vyšší úroveň se projevuje vyšší nekonstantností a nelinearitou výslednice), jak znázorňuje obrázek 5.



obr. 5 – změna úrovně šumu pro různou intenzitu osvětlení

3 Shrnutí

Hlavní výhoda metody sčítání jednotlivých fotonů se skýtá v její vysoké přesnosti a použitelnosti na velké vzdálenosti, kde není možné získat dostatečně silný signál. Ovšem nedá se využívat pro měření rychle se měnících dějů, protože potřebuje delší čas pro sběr dat.

Poděkování

Závěrem bychom chtěli poděkovat Ing. Pavlu Linhartovi.

Reference:

- [1] VACEK M- MICHÁLEK V.: Photon counting altimeter and lidar for air and space borne applications
- [2] PROCHÁZKA I.- SCHREIBER U.: The European Laser Timing (ELT) experiment onboard ACES