

Čítání fotonů a jeho aplikace

M. Pokorný, Gymnázium Plasy, matp11@seznam.cz

Z. Procházková, Gymnázium Na Vítězné pláni, zuza.proch@gmail.com

F. Sváček, SPŠSE Dukelská, České Budějovice, filip.svacek@seznam.cz

D. Vít, Gymnázium Trutnov, dominik.vit@gmail.com

Abstrakt:

Na rozdíl od vícefotonového, jednofotonový princip umožňuje detekci světla po kvantech bez nutnosti analogové-digitální konverze, čehož se využívá především ve vesmírném výzkumu k přenosu přesného času a pro tzv. Satellite Laser Ranging. Tento projekt byl zaměřen na představení tohoto konceptu. Naším úkolem bylo s touto metodou provést několik praktických úkolů jako například změření indexu lomu bezpečnostního skla a vzdálenosti terče.

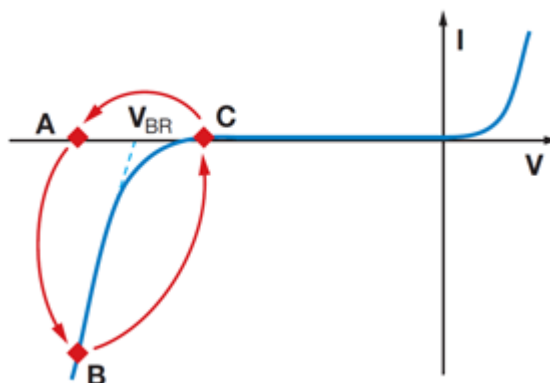
1 Úvod

Metoda čítání fotonů je založena na detekci jednotlivých fotonů emitovaných z laseru a odražených od terče. Oproti více fotonovému měření má výhodu ve sníženém objemu, hmotnosti zařízení a také v jeho energetické úspornosti (méně výkonný laser), čehož se využívá zejména při výzkumu vesmíru. Dále pro měření času s přesností na pikosekundy nebo k měření vzdálenosti či tloušťky. Jeho nevýhoda spočívá v nutnosti opakování měření pro získání potřebného množství dat, proto není možné měřit rychle se měnící děje.

Čítání fotonů

Princip čítání fotonů

Tato dioda se nazývá Single Photon Avalanche Diode (SPAD). Pro měření fotonů používáme lavinovou diodu v Geiger modu. To znamená, že je předepnutá za průrazné napětí. V tomto stavu neprochází diodou žádný proud, je však citlivá na jakýkoliv vzruch (signálový foton, termálně excitovaný elektron, foton z pozadí).



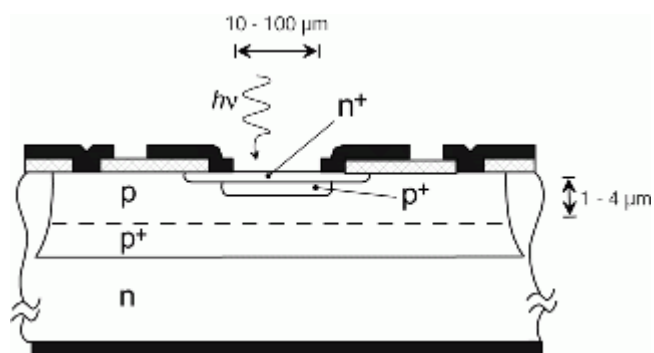
Geiger mód

V bodu C můžeme vidět, že napětí je těsně před bodem průrazu. Pro měření nastavíme napětí do bodu A. V bodě A můžeme vidět Diodu v Geiger módu, kdy jí neprochází proud, i když je napětí za průraznou oblastí. Když přijde na SPAD určitý vzruch, tak se dioda prorazí a dostane se do stavu B. Obslužný obvod SPADu je stavěn tak, že po průrazu v bodě B zajistí,

aby se napětí vrátilo do bodu C. Následně se tento proces opakuje.

Foton v této diodě uvolní elektron a vzniká zde lavinový efekt, kdy jeden elektron naráží do ostatních, které se následovně také uvolňují.

Pro představu, abychom mohli eliminovat fotony z okolí (např. osvětlení, slunce) musíme mít filtr, který nám odfiltruje všechny fotony, které mají jinou frekvenci než ty, které chceme pozorovat. Zbylé šumové fotony rozlišíme od signálových statistickým zpracováním v histogramu.

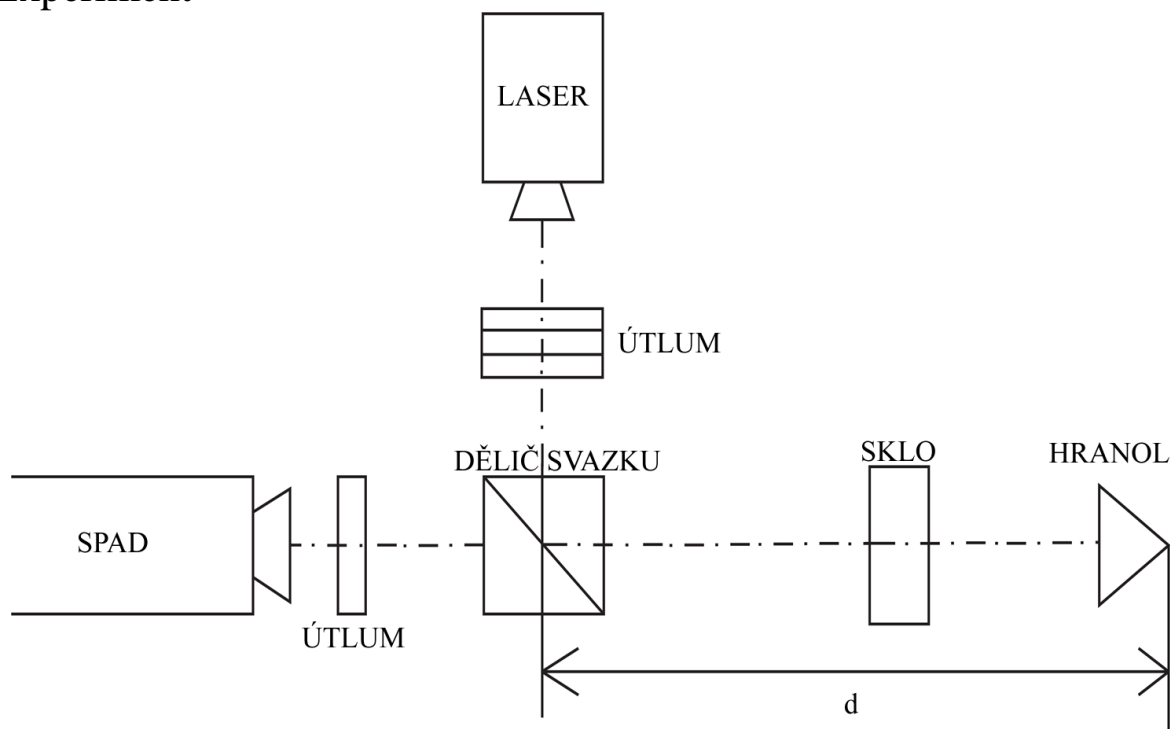


Obr. 2

Použití

Rychlost světla je ve vakuu konstantní a vliv různých optických prostředí není těžké zahrnout. Díky tomu můžeme tuto technologii využít ve výškoměru pro sondy mapující povrch cizích planet a asteroidů. Dále tímto způsobem můžeme měřit složení a hustotu atmosféry u planet. Také tímto způsobem můžeme zpřesnit seřizování času v palubních hodinách satelitů provozujících navigaci.

Experiment



Obr. 3 Schéma zapojení laseru a detektoru SPAD

Náš miniprojekt spočíval ve čtyřech úkolech, které jsme měli provést na soustavě pro měření experimentu (obr. 2). Světlo o vlnové délce 532 nm, odpovídající zelenému spektru, se emituje z laseru o vysoké frekvenci opakování (1 MHz). Cestou se redukuje na utlumovačích, díky nimž na detektor ve výsledku dopadají samostatné fotony, čímž se simuluje měření delších vzdáleností. Po dopadu na dělič svazku se část fotonů ztratí, část se odrazí kolmo, směrem na hranol, na kterém se odrazí zpět a přiletí na detektor (SPAD), a část proletí osou děliče, odrazí se na zadní stěně a poté kolmo, směrem do detektoru. To se nám projeví na grafu v podobě 2 vrcholů, které ukážou dobu, za jakou paprsek laseru dorazí na

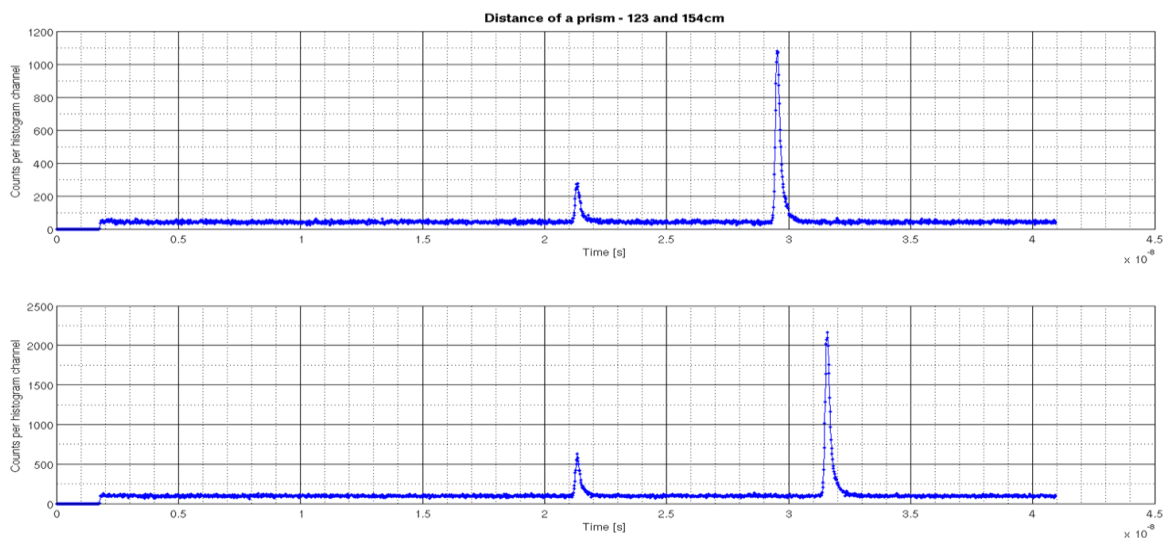
SPAD jenom přes dělič a po odrazu hranolu.

- **měření vzdálenosti terče**

V prvním měření bylo našim cílem vypočítat vzdálenost hranolu od děliče svazku na základě časového rozdílu 2 vrcholů odečteného z histogramu příchodu jednotlivých fotonů. Vzdálenost jsme vypočítali ze vztahu

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

kdy Δt bylo měřeno v kanálech a my jsme jej museli násobit 20 ps odpovídajícími 1 kanálu. Provedli jsme měření pro 5 různých poloh hranolu a dopočítali odpovídající vzdálenost. Při porovnání s hodnotami změřenými metrem jsme zjistili konstantní odchylku (7 cm), která byla zřejmě dána indexem lomu při průchodu světla jiným prostředím.



Obr. 4 Měření vzdálenosti terče při posunutí od 30 cm

- **měření neprůstředného skla**

V dalším měření jsme vkládali mezi dělič a terč kvádr různě tlustého neprůstředného skla.

- index lomu

Nejprve jsme vzali kvádr se známou šířkou a naměřili u něj zpoždění oproti stavu bez něj. Od toho jsme odvodili zpoždění t způsobené změnou rychlosti světla v jiném prostředí a dosadili do vzorce pro index lomu

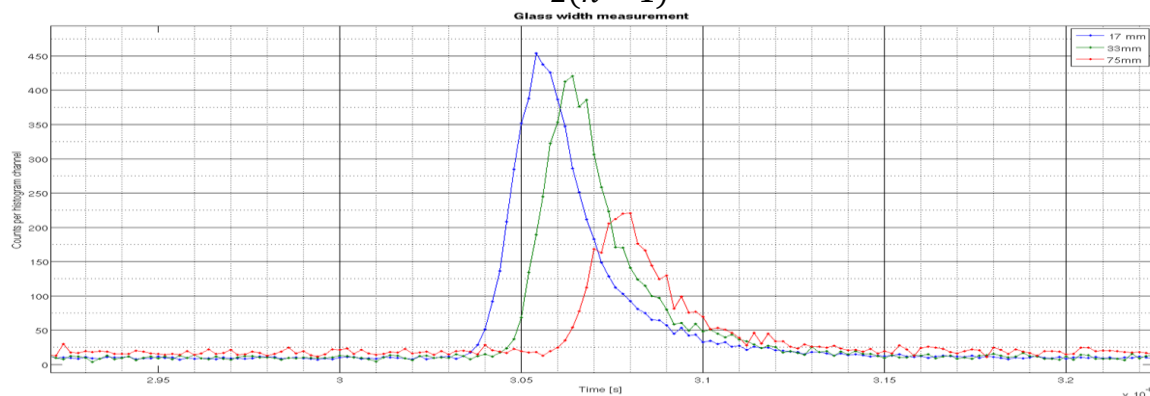
$$n = \frac{c}{v_c} = \frac{\Delta t + t_0}{t_0} = 1,53$$

- tloušťka skla

Opačný proces jsme použili při měření tloušťky vzorku neprůstředného skla, kdy jsme vycházeli z časového zpoždění a za index lomu dosadili předchozí naměřenou hodnotu 1,53.

Konečná výchylka byla 2 cm.

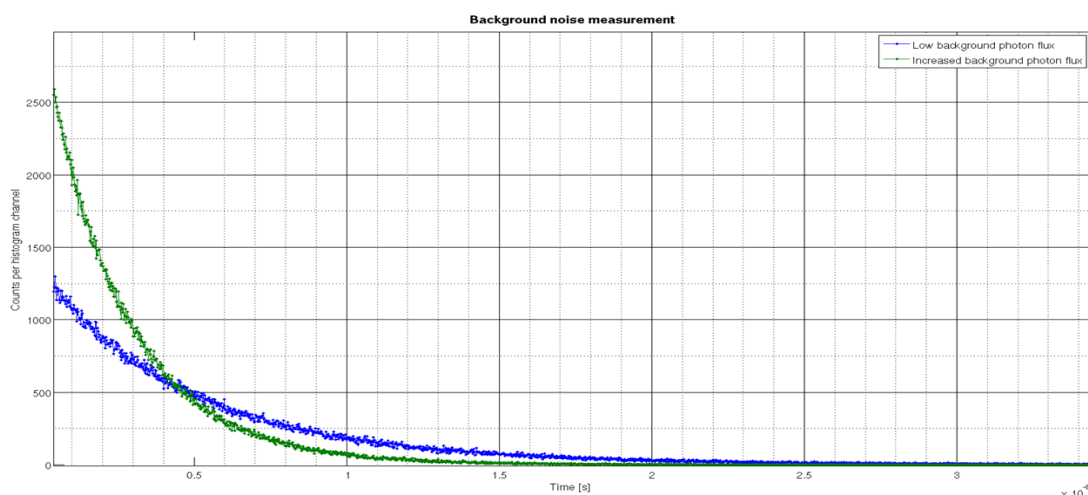
$$d = \frac{\Delta t \cdot c}{2(n - 1)}$$



Obr. 5 Měření tloušťky kvádrů neprůstředného skla

- **měření světelného šumu v místnosti**

Posledním měřením, které jsme prováděli, bylo měření intenzity dopadajícího světla na SPAD. Čas příchodu fotonů se řídí exponenciálním rozdělením. Při rozsvícení lampy bylo množství fotonů větší, čímž se změnil parametr exponenciálního rozdělení, které bylo strmější. Naopak za snížené intenzity závislost klesala pozvolněji. Tedy určením parametru exponenciálního rozdělení fotonu lze spočítat intenzitu dopadajícího záření.



Obr. 6 Měření světelného šumu v místnosti

3 Shrnutí

V rámci miniprojektu jsme se nejprve seznámili s principem čítání fotonů a jeho využití. Poté jsme si sami vyzkoušeli sérii měření. V prvním jsme úspěšně změřili vzdálenost terče od děliče laserového svazku, v druhém jsme zjistili index lomu ve skle, ve třetím jsme u různých skel měřili jejich šířku a naposled jsme zkoumali chování fotodiody při různých intenzitách osvětlení.

Poděkování

Naše poděkování patří prof. Ing. Ivanovi Procházkovi DrSc., Ing. Vojtěchu Michálkovi a Ing. Michaelu Vackovi za vedení při miniprojektu, za rady, za čas, který nám věnovali a za poskytnutí vědeckých prostředků.

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 on-board ACES
- [3] PROCHÁZKA I.- BLAZEJ J.: Photon Counting Module for Laser Time Transfer via Earth Orbiting Satellite