

Čítání fotonů

P. Novotný¹, J. Löffelman², A. Pernišová³

Gymnázium Opatov Praha 11¹, Gymnázium Litoměřická Praha 9²,

Bundesrealgymnasium Neusiedl am See³

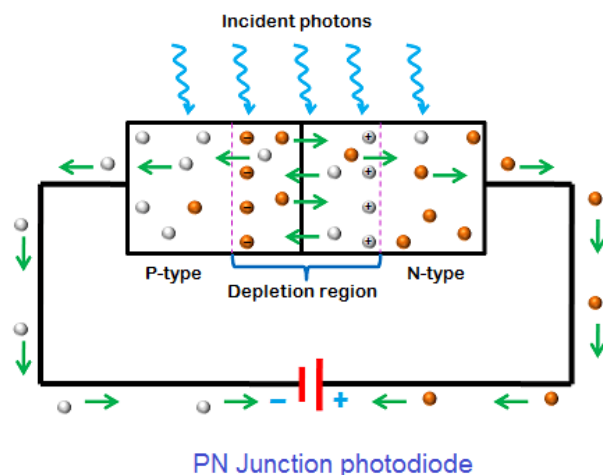
patrik.novotny.jes@seznam.cz¹, jira.leflik@gmail.com², apernisova@hotmail.com³

Abstrakt:

Prováděli jsme experimenty s čítáním fotonů s využitím křemíkaté lavinové diody. Měřili jsme rychlost světla a index lomu skla. Data jsme vyhodnocovali na základě sestavených histogramů. Z našich výsledků se potvrdila velká přesnost použité metody a to v řádu pikosekund.

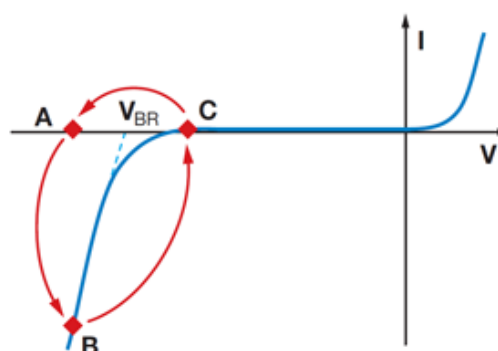
1 Úvod

Pod pojmem čítání fotonů jsou označovány metody, umožňující detekovat velmi slabé optické signály. V našem experimentu byla k detekci fotonů využita lavinová (SPAD) fotodioda. Tato fotodioda je schopna na základě lavinového průrazu detekovat signály až do úrovně jednotlivých fotonů. Fotodioda je zapojená v Geigerově módu na napětí velmi blízké průraznému napětí. Při průchodu fotonu aktivní zónou dojde k průrazu fotodiody a vysokému nárůstu proudu, který je následně možné detekovat. Aby nedošlo k poškození fotodiody, obsahuje detektor také ochranný obvod, který při určité hodnotě proudu fotodiodu odpojí. Při použití tohoto detektoru je možné dosáhnout časového rozlišení v řádu pikosekund.



www.physics-and-radio-electronics.com

Obrázek 1 SPAD fotodiody [2]



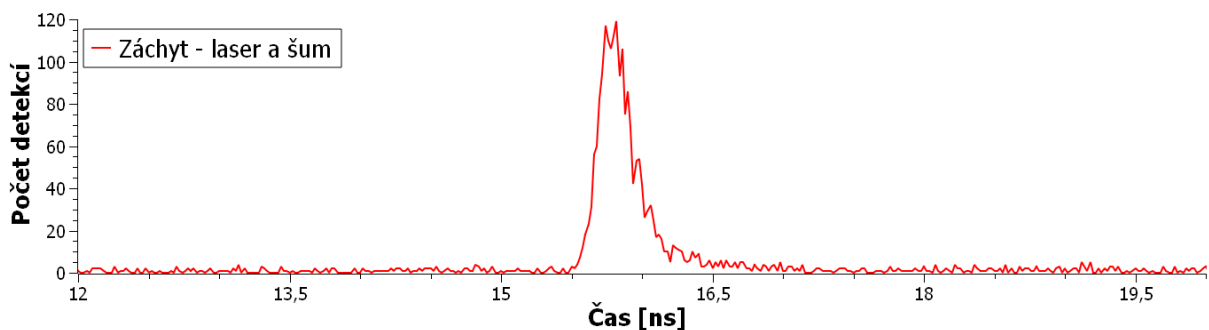
Obrázek 2 Volt-Ampérová charakteristika fotodiody [3]

Vysoké časové rozlišení a citlivost detektoru umožňuje velmi přesné měření vzdáleností a zkoumání atmosférických jevů na Zemi, případně jiných planetách s využitím zpětně rozptýleného laserového záření. Užitím této technologie lze na základě výškových změn satelitu způsobených nehomogenitou gravitačního pole odhadnout geologické složení Země

případně jiných planet. Nejrozšířenějším využitím je synchronizace času satelitů obíhajících kolem Země.

2 Teorie

Pokud by měření probíhalo kontinuálně, nebylo by možno rozeznat laserový zdroj od okolního šumu. Tento problém je řešen měřením v cyklech. Použit byl laser s vlnovou délkou 531 nm a opakovací frekvenci impulsů 10 kHz, který emituje množství fotonů o energii odpovídající dané vlnové délce. Měřicí cyklus začíná spuštěním laseru, kdy se současně spustí časovač. Časovač je tvořen zařízením TAC (Time to Amplitude Converter), ve kterém se při spuštění laseru začne lineárně zvyšovat napětí. Po dopadu fotonu na detektor dojde k zastavení časovače. Poté dostane počítač informaci od zařízení TAC o hodnotě napětí, které převede na čas. Fotony generované laserem dopadají ve stejném čase a v tomto čase se načítají, zatímco fotony z okolního osvětlení dopadají v čase náhodně a rozptylují se rovnoměrně v celé časové ose. Tímto způsobem dochází k naměření peaku odpovídajícímu detekci fotonů z laseru.

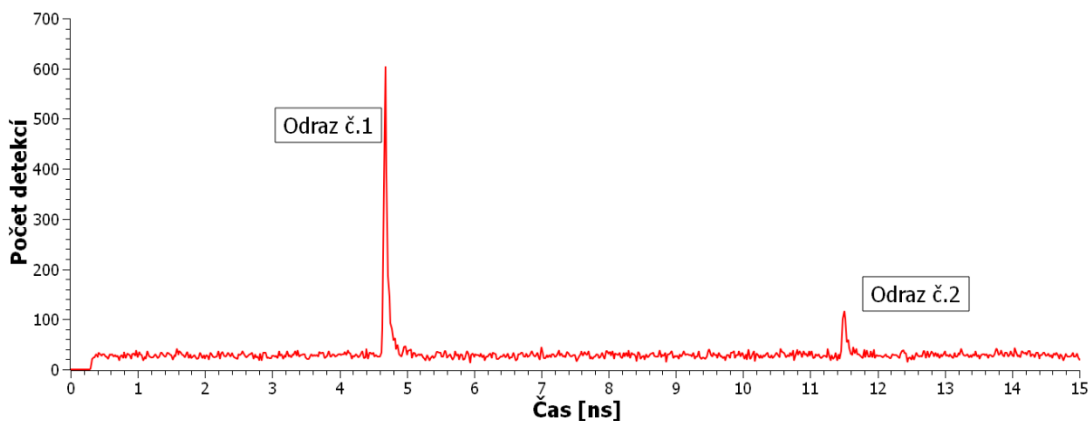


Obrázek 3 Porovnání detekce šumu a laseru

3 Experimenty

Měření rychlosti světla

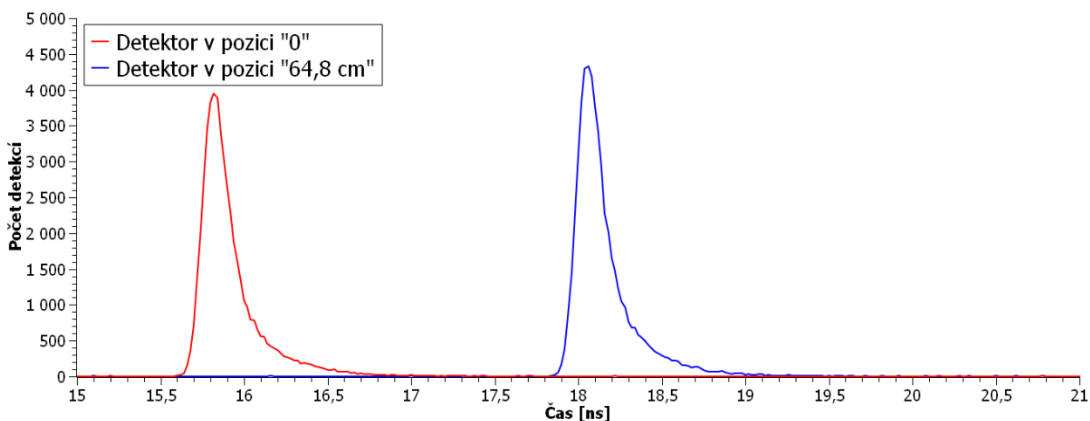
Úvodním měřením byl pokus na zjištění hodnoty rychlosti světla. První variantou pokusu bylo vyslání fotonů z laseru do detektoru v počáteční pozici. V druhé fázi pokusu jsme detektor posunuli o danou vzdálenost a změřili dobu letu fotonů znovu. Z rozdílu doby trvání letu jsme určili rychlost fotonů na dané dráze. Druhou verzi pokusu jsme se pokusili zpřesnit užitím odrazné plochy, kdy paprsek urazil dvojnásobnou vzdálenost, jinak byl pokus proveden stejným způsobem. Při poslední verzi pokusu jsme odráželi fotony od věcí, které k tomu nebyly určeny a nereflektovali paprsek tak dobře jako odrazná plocha (kabel, mikrovlnná trouba).



Obrázek 4 Odrazy – kabel (č.1) a mikrovlnná trouba (č.2)

Název měření/metoda	τ_1 [ns]	τ_2 [ns]	$\Delta\tau$ [ns]	s[cm]	v[m/s]
Rychlost světla A	15.80	18.07	2.27	64.80	293289000
Rychlost světla B	17.27	21.52	4.25	121.20	292688000

Tabulka 1 Měření rychlosti světla



Obrázek 5 Měření rychlosti světla A

Měření indexu lomu

Druhou skupinou měření bylo měření indexu lomu protipožárního skla. Nejprve jsme proměřili dobu letu fotonů mezi laserem a detektorem. Následně jsme do cesty paprsku vložili sklo, jehož index lomu způsobil odlišnou dobu letu. V druhé verzi pokusu paprsek prošel sklem nadvakrát. Užili jsme odrazu ke zvětšení dráhy, na níž měříme dobu letu a současně jsme zachytávali dva odrazy o rozhraní vzduchu a skla.

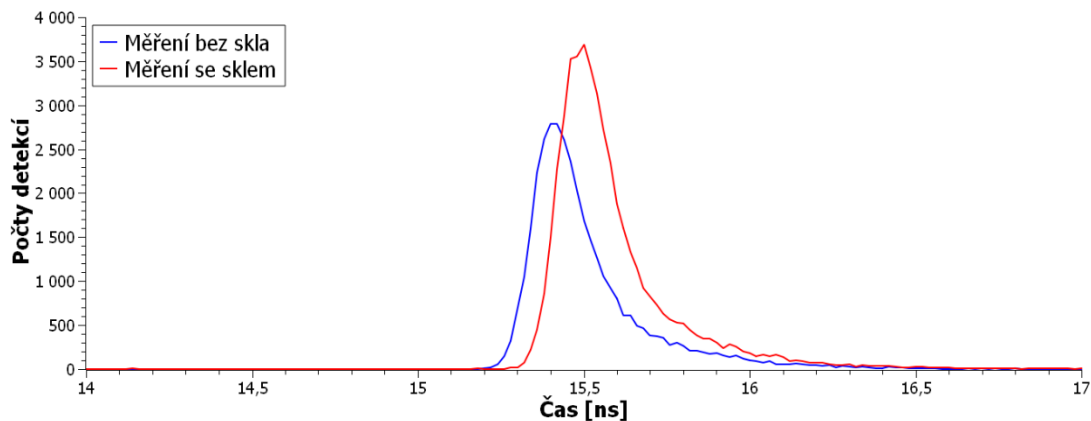
Název měření/metoda	τ_1 [ns]	τ_2 [ns]	$\Delta\tau$ [ns]	s[cm]	n
Index lomu skla A	15.42	15.50	0.08	4.38	1.55
Index lomu skla B	21.55	21.71	0.16	8.76	1.55

Tabulka 2 Měření indexu lomu

K výpočtu indexu lomu jsme využili vztah 1:

$$n = 1 + \frac{\Delta T}{d} c \quad (1)$$

kde ΔT značí rozdíl doby letu se sklem a beze skla, d značí tloušťku skla, c rychlost světla a n index lomu.



Obrázek 6 Index lomu skla A

5 Shrnutí

Hodnoty vypočtené z měření pro rychlost světla vykazovaly odchylku mezi 2,2-2,5 %, což můžeme považovat při měření na krátkou vzdálenost a při takto velké rychlosti za velmi přesný výsledek. Při měření indexu lomu protipožárního skla nám hodnota vyšla blízko udávaným hodnotám (1,5-1,9) [4].

Určením velmi přesné hodnoty rychlosti světla i indexu lomu protipožárního skla se potvrdila přesnost technologie čítání fotonů. Při měření času touto metodou lze dosáhnout přesnosti v řádu pikosekund, což umožňuje ještě přesnější měření nejen času, ale i vzdáleností tam, kde je to důležité. Kupříkladu v oboru meziplanetárního výzkumu či přesném studiu vlastností materiálů.

6 Poděkování

Děkujeme Ing. Pavlu Linhartovi za vedení projektu a podporu při práci s MS-DOS.

7 Reference:

- [1] https://cs.wikipedia.org/wiki/Single-photon_avalanche_diode
- [2] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5255
- [3] <http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/photodiodesymboltypes.html>
- [4] <https://refractiveindex.info/>