

# Čítání fotonů a jeho aplikace

R. Šípošová, Bilingválne slovensko-španielske gymnázium, Nové Mesto nad Váhom, Športová 41, raquelsiposova@gmail.com

A. Zymin, Škola Velvyslanectví RF v ČR, Krupkovo nám.1, Praha 6, anzymin@gmail.com

E. Yaroslavtseva, Gymnázium Jana Keplera, Parlářova 2, Praha 6, dmivit98@gmail.com

## Abstrakt

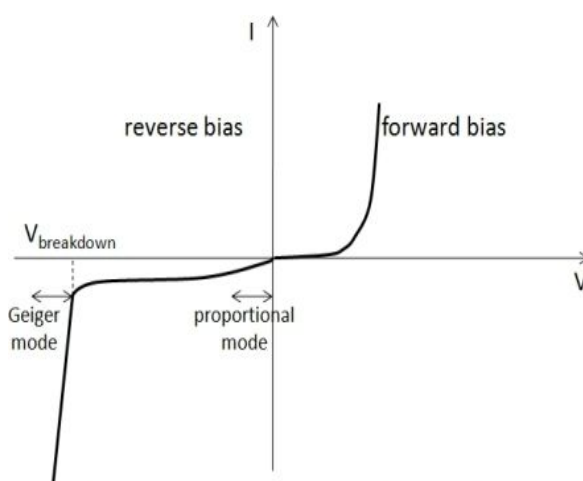
Tato práce představuje metodu čítání jednotlivých fotonů, která umožňuje detekci světla po kvantech. Naším cílem bylo provést několik experimentálních pokusů a vyřešit pár úloh pomocí metody čítání jednotlivých fotonů. Provedli jsme měření indexu lomu skla, jeho tloušťky a vzdálenosti několika skel od sebe.

## 1 Úvod

Metoda čítání jednotlivých fotonů je založena na principu detekce kvant světla takzvaným kvantovým detektorem. Při měření touto metodou se jako zdroj fotonů využívá laser pracující v impulzním režimu. Schopnost detekovat extrémně slabé signály úrovně jednotlivých fotonů umožňuje využití ve vesmírném výzkumu, při měřeních vzdáleností, při měřeních znečištění atmosféry, v astronomii, a v mnoha dalších oborech. Nevýhoda této metody spočívá v tom, že nemůžeme měřit rychle se měnící děje, protože potřebujeme provádět opakovaná měření pro získání potřebného množství dat. Výhodou je, že nám metoda umožňuje získat velice přesné výsledky (např. měření vzdálenosti Země-Měsíc bylo provedeno s chybou 150 mikrometrů).

## 2 Princip

Jako zdroj záření jsme používali zelený laser o vlnové délce 532 nm, ze kterého vycházely krátké světelné impulzy o délce 600 pikosekund, jež byly následně zachytávány na detektoru. Pro detekci fotonů používáme detektor s křemíkovou lavinovou fotodiódou zapojenou v Geigerově módu (zapojenou v závěrném směru). V grafu 1 je znázorněna Volt-Amperová charakteristika pro lavinovou diodu. V propustném směru (forward bias) je proud ze začátku velmi malý, po překročení prahové hodnoty pak prudce stoupá. Lavinová fotodioda v námi použitém detektoru je zapojená v závěrném směru (reverse bias). V tomto stavu neprochází diodou žádný proud, až do okamžiku překročení průrazného (breakdown) napětí. Ani poté však při mírném

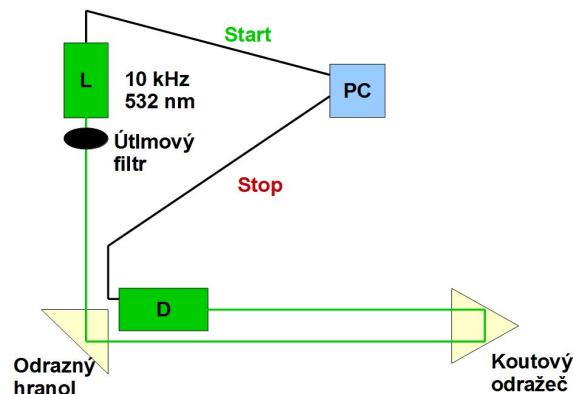


Obr. 1: VA charakteristika fotodiody

překročení průrazného napětí proud diodou neprochází, dioda je však v tomto režimu citlivá na jakýkoliv vzruch (signálový foton, termálně excitovaný elektron, foton z pozadí). Detekce fotonu spustí lavinový průraz, jehož výsledkem je velký proudový impulz, který můžeme detekovat.

### 3 Experimenty

Základem našeho miniprojektu byly 4 jednoduché experimenty, prováděné podle schématu na obr. 2. Laserové impulzy byly emitovány o frekvenci 10 kHz a použité bylo zelené

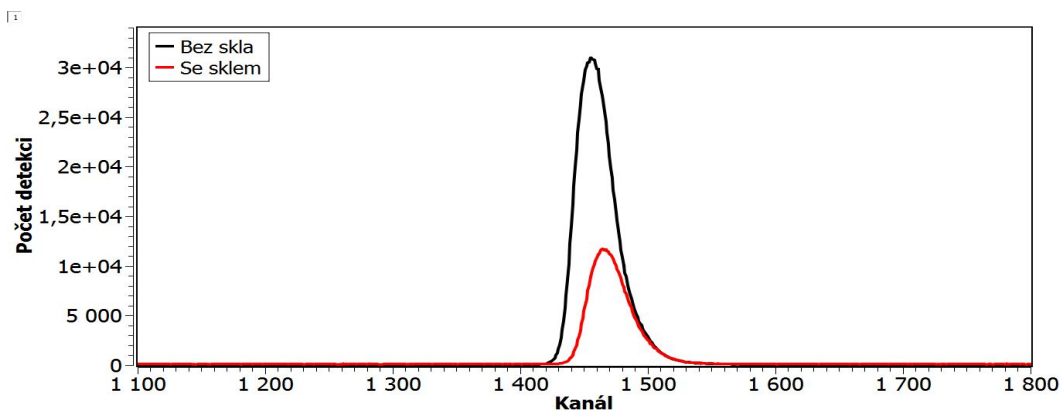


Obr. 2. Experimentální uspořádání

světlo o vlnové délce 532 nm. V okamžiku vyslání impulzu se spustil start měření času. Posléze se svazky fotonů odrazili od odrazného hranolu a dopadly na koutový odražeč, který odrazil svazek fotonů paralelně směrem k detektoru, který ho následně zachytil. To byl impulz stop pro zastavení měření času.

### Měření indexu lomu

Po řešení této úlohy jsme museli najít index lomu skla, které stálo mezi odrazným hranolem a koutovým odražečem a zároveň mezi odražečem a detektorem. Po měření tloušťky skla jsme vyjádřili index lomu vstahem:  $\eta = \frac{c}{v_e} = \frac{2d + \Delta t c}{2d}$ , kde  $v_e$  je rychlost světla ve skle a  $d$  je tloušťka skla. Konečný výsledek vyšel:  $\eta = 1.73$



Obr.3: Měření indexu lomu

Píky v grafu na obr. 2 odpovídají detekovaným fotonům z laseru a mají posunutá maxima o hodnotu  $\Delta t$ , danou rozdílem zpoždění optického svazku při měření se sklem a beze skla.

### Měření tloušťky skla

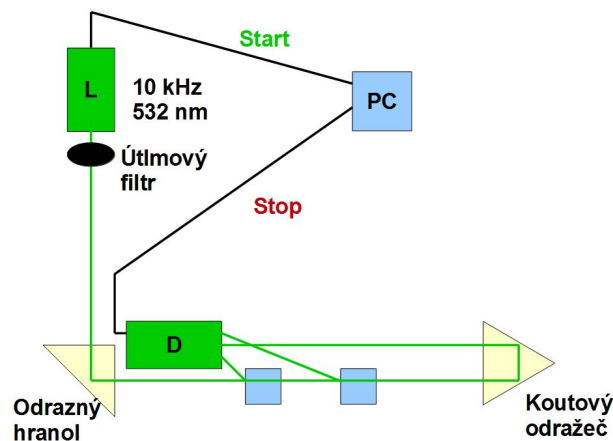
Tato úloha byla v podstatě opakem k předchozímu experimentu. Používali jsme výše odvozený index lomu skla a s jeho pomocí jsme vyjádřili jeho tloušťku jako:

$$d = \frac{\Delta t c}{k-1}$$

Měření bylo provedeno poměrně přesně, chyba byla přibližně  $\Delta d = 0.3\text{cm}$  oproti metrem určené vzdálenosti.

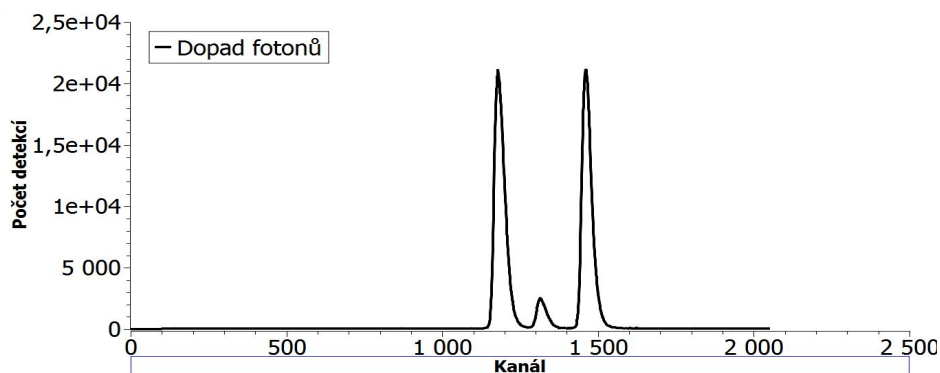
### Měření vzdálenosti odrazných ploch

Toto měření je podobné měření vzdálenosti vrstev v atmosféře, kde se paprsek odráží od jednotlivých vrstev mraků a po částech se vrací zpět. Umožňuje nám to studium struktur a rozložení vrstev atmosféry. Pro simulaci vrstvy atmosféry jsme použili několik sklíček. Vzdálenost mezi nimi jsme vyjádřili jako  $s = 0,5\Delta t c$ , kde  $\Delta t$  je rozdíl časů dopadu fotonů z různých sklíček.



Obr. 4: Experimentální uspořádání pro měření odrazů

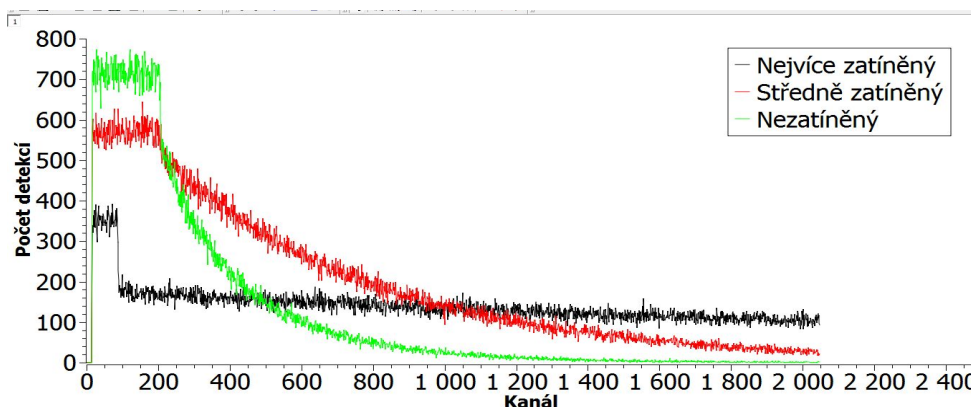
Výsledky měření jsou znázorněny na obrázku 5, kde první dva píky zleva odpovídají odrazům od skleněných ploch. Různá četost (velikost) v naměřených maximech odpovídá různé intenzitě odrazů.



Obr. 5. Graf měření vzdálenosti skleněných destiček

## Měření světelného šumu

Naším posledním experimentem bylo měření šumu v místnosti a vliv intenzity dopadajících fotonů na fotodiodu. Rozebírali jsme 3 případy intenzity světelného záření. Když byl detektor nezastíněný, dopadalo na něj nejvíce fotonů a proto byla vyšší pravděpodobnost detekce na začátku detekčního okna. S rostoucím časem po otevření detekčního okna však v případě vysokého intenzity pravděpodobnost detekce exponenciálně klesá. Když se množství dopadajících fotonů sníží, závislost se postupně stává lineární a klesá pozvolněji, z čehož se dá usoudit, že pro dosažení vyšší přesnosti měření je lepší slabší signál.



Obr.6. Měření světelného šumu

## 4 Shrnutí

V našem miniprojektu jsme se zaměřili na metodu čítání jednotlivých fotonů a její aplikaci. Provedli jsme také serii měření a experimentů. V prvním experimentu jsme úspěšně změřili index lomu skla, posléze určili tloušťku delšího skla a také jsme změřili jednotlivé vzdálenosti mezi skly. Nakonec jsme sledovali chování fotodiody při různé intenzitě světelného záření.

## Poděkování

Chtěli bychom poděkovat organizačnímu týmu Týdne Vědy, našim supervizorům Ing. Pavlovi Linhartovi, Ing. Vojtěchu Michálkovi a prof. Ing. Ivanovu Procházkovi, DrSc., že nám věnovali svůj čas, za podporu a za to, že byli ochotní vysvětlit nám některé věci hodně krát za sebou.

## Reference:

- [1] VACEK M- MICHÁLEK V.: Photon counting altimeter and lidar for air and space borne applications
- [2] Wikipedie: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Single-photon\\_avalanche\\_diode](https://cs.wikipedia.org/wiki/Single-photon_avalanche_diode)
- [3] IVAN PROCHÁZKA, KAREL HAMAL, BRUNO SOPKO, JOSEF BLAŽEJ: Polovodičové detektory jednotlivých fotonů: příspěvek ČVUT k mezinárodním kosmický projektům