



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Šimon Šatra

**Časové a spektrální vlastnosti emICCD
kamery**

Katedra chemické fyziky a optiky

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. František Trojánek, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2020

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 30.7.2020

Šimon Šatra

Chci velmi poděkovat mému vedoucímu doc. RNDr. Františku Trojánkovi, Ph.D. za jeho vedení, pomoc při měření a za jeho cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat mojí rodině a mým přátelům za jejich velikou podporu při mých studiích.

Název práce: Časové a spektrální vlastnosti emICCD kamery

Autor: Šimon Šatra

Katedra: Katedra chemické fyziky a optiky

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. František Trojánek, Ph.D., Katedra chemické fyziky a optiky

Abstrakt: V této práci se zaměřujeme na určení vlastností emICCD kamery PI-MAX4: 512 EM, jež se spojena se spektrografem IsoPlane 320. První část práce obsahuje stručný popis emICCD detekce a shrnutí parametrů kamery, spektrografu a základy softwaru Lightfield. Druhá část je věnována popsání výtěžnosti funkce zesílení, spektrálnímu rozlišení a porovnání emICCD kamery s klasickou CCD kamerou. Práce by měla poskytnout shrnutí základů o emICCD kameře spolu s informacemi, které jsou zásadní k její správné obsluze.

Klíčová slova: emICCD kamera, spektroskopie, slabý optický signál

Title: Time and spectral properties of emICCD camera

Author: Šimon Šatra

Department: Department of Chemical Physics and Optics

Supervisor: doc. RNDr. František Trojánek, Ph.D., Department of Chemical Physics and Optics

Abstract: In this work we focus on determining the properties of emICCD camera PI-MAX4: 512 EM, which is connected to IsoPlane 320 spectrograph. The first chapter contains a brief description of emICCD detection and a summary of parameters of the camera, spectrograph and basics of Lightfield software. The second chapter is dedicated to describing the utilization rate of the gain function, the spectral resolution and comparing the emICCD camera with a classic CCD camera. This work should provide a summary of the basics about the emICCD camera together with the information which are fundamental to its right operation.

Keywords: emICCD camera, spectroscopy, weak optical signal

Obsah

Úvod	2
1 Teoretická část	3
1.1 Princip detekce	3
1.1.1 Princip detekce ICCD	3
1.1.2 Princip detekce EMCCD	4
1.1.3 Princip detekce emICCD	4
1.2 Vlastnosti a nastavení emICCD	5
1.2.1 Spektrograf IsoPlane 320	5
1.2.2 Kamera PI-MAX4: 512 EM	5
1.2.3 Software LightField	6
2 Experimentální část	9
2.1 Měření výtěžnosti zesílení	9
2.2 Měření spektrálního rozlišení	14
2.3 Experimentální část - porovnání s CCD	19
Závěr	21
Seznam použité literatury	22
Seznam obrázků	24
Seznam tabulek	25
Seznam použitých zkratk	26

Úvod

Lidé zprvu pozorovali svět a neznámé přírodní jevy primárně svýma očima. Když zjistili, že jim oči nestačí, začali si vyrábět detekční stroje a přístroje, až se dostali ke kamerám. Průlom v detekčních kamerách nastal v 60. a 70. letech 20. století vynálezem Charge-Coupled Device (CCD) kamer využívajících vázaných nábojů. Ty se postupně vylepšovaly, až v roce 2013 Princeton Instruments vyvinula kameru PI-MAX4, již budeme zkoumat.

Námi používaná kamera PI-MAX4 patří mezi nejmodernější přístroje, které umožňují detekci rychlých i velmi slabých pulzů. Kamera disponuje časovým rozlišením až okolo půl nanosekundy, vysokým zesílením signálu a schopností detekovat i jednotlivé fotony. V kombinaci se spektrografem dovede i změřit spektrum signálu. Tyto vlastnosti z ní dělají velmi užitečný a přesný přístroj při práci s velmi krátkými pulzy či slabým signálem.

Tato práce je rozdělena do dvou kapitol. První je teoretický úvod popisující fungování kamer využívajících vázaných nábojů a vlastnosti a nastavení zkoumané kamery. Druhá kapitola je věnována experimentální části, kde se zajímáme o výtěžnost kamerové funkce zesílení, dále jejího spektrálního rozlišení a nakonec porovnání této kamery s klasickou CCD kamerou. Poté následuje závěr.

Součástí práce mělo původně být i proměření časového rozlišení této kamery. To bohužel nebylo možné, protože u laseru, který jsme k tomu chtěli použít, došlo k závadě a nefungoval správně.

1. Teoretická část

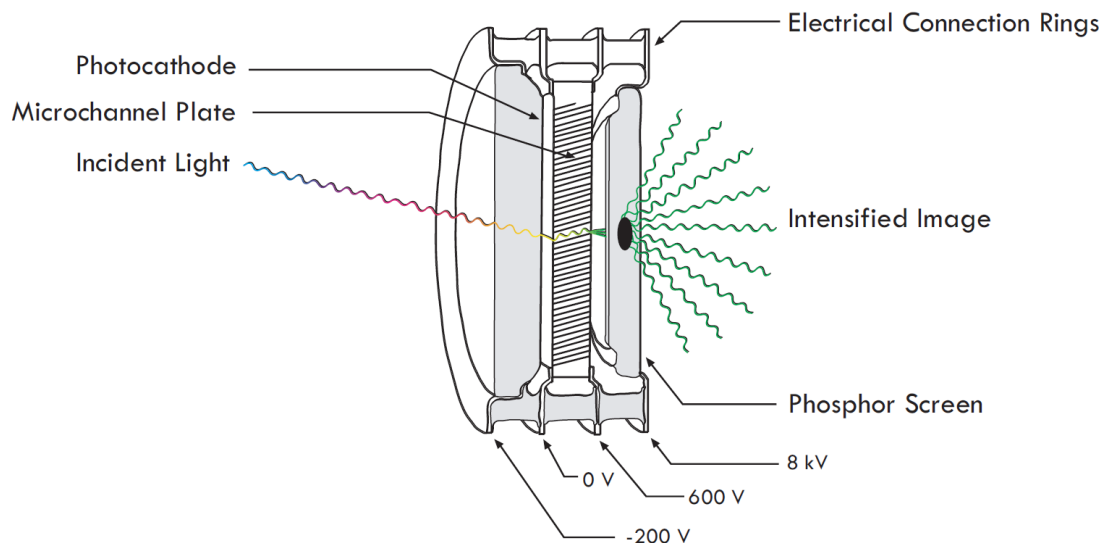
1.1 Princip detekce

V této kapitole se budeme snažit nastínit princip kamer využívajících vázaných nábojů. Princip detekce klasických CCD kamer je shrnut například v bakalářské práci Václava Dědiče [1]. Detailněji, než je zde popíšeme my, lze způsob detekce intenzifikovaných CCD či CCD využívajících elektronovou multiplikaci nalézt např. v [2]. Nyní stručně popíšeme princip těchto verzí CCD kamer.

1.1.1 Princip detekce ICCD

Jednou z „vylepšených“ verzí CCD kamer je Intensified CCD (ICCD). S ICCD lze detekovat velmi slabé signály díky velkému zesílení, které umožňuje zesilovač [3]. Schéma zesilovače (průřez) je vidět na obr. 1.1. Zesilovač sestává z fotokatody, mikrokanálové desky (Microchannel plate (MCP)) a fluorescenční vrstvy. Část fotonů, které dopadnou na fotokatodu, přejde v elektrony, tzv. fotoelektrony. Každý fotoelektron je v MCP znásoben a vychází z něj mnoho elektronů. Tato sprška elektronů pak dopadá na fluorescenční vrstvu, kde jsou elektrony konvertovány zpět na fotony. To ve výsledku znamená, že z jednoho příchozího fotonu vzejde mnohem více fotonů, které následně dopadnou na CCD, a tedy detekujeme silnější signál. V ICCD kamerách může být zapnutí/vypnutí zesilovače provedeno ve velmi krátkých intervalech, čímž se dá získat časové rozlišení, zatímco prostorové rozlišení je zachováno díky mikrokanálkům.

Napětí mezi jednotlivými komponenty určuje znásobení signálu a navíc může i zrušit detekci úplně — má-li fotokatoda vůči MCP kladné napětí, tak elektrony nedojdou k MCP a nezesílí se signál, naopak má-li fotokatoda vůči MCP záporné napětí, elektrony budou urychleny k MCP a signál se zesílí. Omezujícím faktorem u ICCD kamer jsou nelinearity způsobené saturací MCP a dále neschopnost rozlišit při detekci jednotlivé fotony.



Obrázek 1.1: Schéma zesilovače v Princeton Instruments ICCD kameře [3]

1.1.2 Princip detekce EMCCD

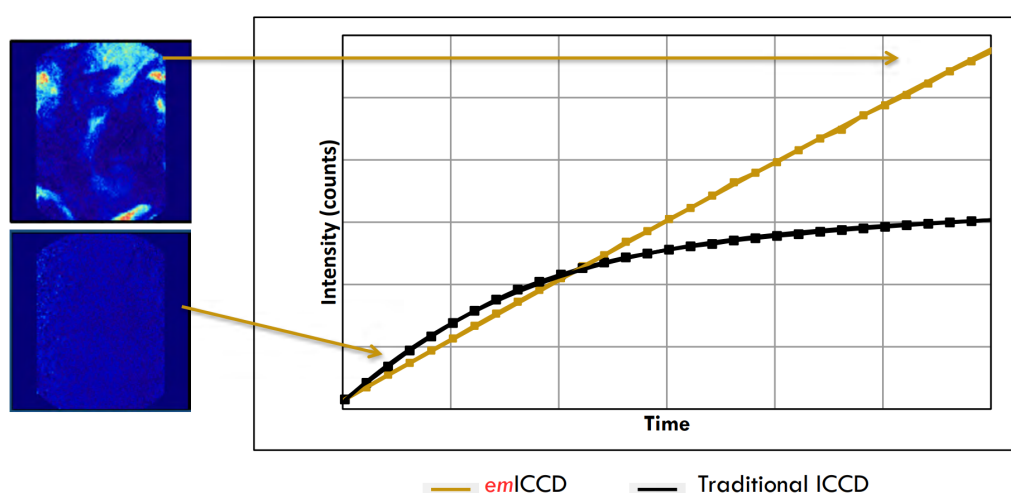
Electron-Multiplying CCD (EMCCD) kamery nepoužívají externího zesilovače, jako tomu bylo u ICCD kamer. Naopak po dopadu fotonů na CCD se klasicky zachytí elektrony v matici pixelů. Ty se ale přesunou na jinou matici, kde se následně procesem nárazové ionizace (impact ionization) generují sekundární elektrony. Tím se ve výsledku zvětší počet nasčítaných elektronů v každém pixelu a dojde k zesílení původního signálu. U nárazové ionizace dochází k tomu, že dostatečně energetický elektron je schopen vyrazit z atomu jiný elektron, čímž se zvyšuje počet použitelných elektronů. Typicky je však důležité mít dostatečně silné elektrické pole, aby urychlilo elektrony na požadovanou energii. Zesílení signálu tímto způsobem závisí exponenciálně na napětí. Jednou z nevýhod EMCCD kamer je, že postrádají ultrarychlé (piko- až nanosekundy) detekční schopnosti, tzn. že typicky je jejich doba osvětlení řádově až v mikrosekundách.

1.1.3 Princip detekce emICCD

Electron-Multiplying Intensified CCD (emICCD) postrádá zmíněné nedostatky ICCD i EMCCD kamer. V kamerách emICCD je EMCCD optickými vlákny spojeno se zesilovačem s fotokatodou. Existují ICCD kamery, které propojují zesilovač s EMCCD pomocí čočky. U nich je však průchodnost světla čočkou menší než optickým vláknem a poměr signálu ku šumu je také horší.

Vhodným využíváním zesílení (gain) zesilovače (tzn. MCP) a zesílení EMCCD dosahuje detektor širšího dynamického rozsahu¹ než by měl samotný zesilovač. Pro vysoké zesílení pak lze detekovat jednotlivé fotony, aniž by se ztratily v šumu.

Důležitost vysoké linearitě je demonstrována v grafu 1.2, kde jsou různé druhy zbytkových výfukových plynů (CO , NO , C_2 , OH , atd.) studovány za různých podmínek. Vhodným využitím zesílení se dosáhne vyšší linearitě než u ICCD kamer, jež jsou limitovány MCP. Linearitou klasické CCD kamery se například zabývá bakalářská práce Michala Vyvlečky v kap. 2.1 [4].



Obrázek 1.2: Demonstrace linearity emICCD kamery. V grafu jde o detekci laserem indukované emise zbytkových výfukových plynů ve spalovacím motoru. [3]

¹Typicky se jedná o poměr jasů nesvětlejšího a nejtmašího bodu, co kamera zvládne rozlišit.

Hustota vrypů [g/mm]	Celkový rozsah [μm]	Optimální rozsah [nm]	Optimální vlnová délka [nm]
50	0 – 36	402 – 950	600
150	0 – 12	200 – 500	300
1 200	0 – 1,5	325 – 1 000	500

Tabulka 1.1: Parametry mřížek, které spektrograf používá

1.2 Vlastnosti a nastavení emICCD

Zkoumali jsme kameru PI-MAX4: 512 EM, ke které byl připojen spektrograf IsoPlane 320. Nejprve stručně popíšeme specifikace spektrografu, pak kamery a na závěr nastavení a práci s dodaným softwarem LightField.

1.2.1 Spektrograf IsoPlane 320

Následující údaje jsou převzaty z [5].

U námi používaného spektrografu IsoPlane 320 odpovídá jedno otočení stupnice rozevření vstupní štěrbinu o $250\ \mu\text{m}$. Dále je zde možné vybrat mezi třemi různými mřížkami. Jejich nejdůležitější vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 1.1, kde hustota vrypů je udána v počtu vrypů (groove) na milimetr a celkový rozsah značí maximální použitelný spektrální rozsah pro danou mřížku. Všechny mřížky mají rozměry $68\ \text{mm} \times 68\ \text{mm}$. Spektrograf má ohniskovou vzdálenost $320\ \text{mm}$, světelnost (resp. clonu) $f/4,6$ a spektrální rozlišení $0,08\ \text{nm}$ v celé ohniskové rovině². Přesnost určení vlnové délky je $0,2\ \text{nm}$ (může být až $0,02\ \text{nm}$ po kalibraci např. automatizovaným systémem IntelliCal). Navíc podle výrobce u tohoto spektrografu vůbec nedochází k astigmatismu díky Schmidt-Czerny-Turner konstrukci [6].

1.2.2 Kamera PI-MAX4: 512 EM

Následující údaje přebíráme z [7].

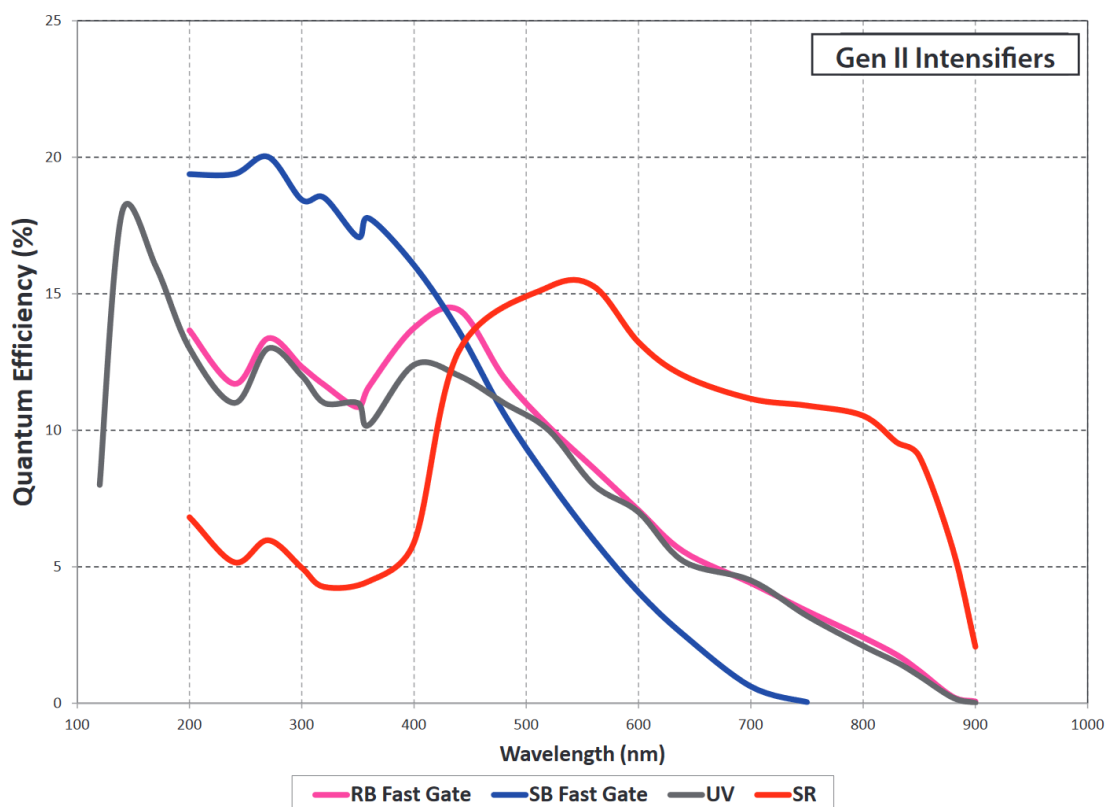
Jedná se o emICCD kameru, tedy má dva způsoby zesílení — externí zesílení jako ICCD a vnitřní zesílení jako EMCCD. Jako CCD v kameře je použito e2v CCD97 (o tomto CCD se dá dozvědět více např. v [8]), jež má rozměry 512×512 pixelů, kde každý pixel má velikost $16\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$.

Pro toto CCD je čtecí šum (readout noise) 25 elektronů při 5 MHz (jedná se o horizontální čtecí rychlost (Readout rate)), resp. 50 elektronů při 10 MHz. Po zapnutí vnitřního zesílení se však tento šum efektivně redukuje na méně než jeden elektron. Vertikální rychlost posuvu pixelů (shift speed) je zde 600 nanosekund na řádek. Temný šum (dark noise) pro toto zařízení je 2 elektrony na pixel za sekundu při teplotě $-25\ ^\circ\text{C}$.³ Příčiny těchto šumů a případné způsoby jejich redukce lze do jisté míry nalézt např. v [4].

²Měřeno pro $10\ \mu\text{m}$ štěrbinu s PIXIS:400F kamerou, která má pixely o rozměrech $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$, a laserem o vlnové délce $546\ \text{nm}$.

³Vnitřně zabudovaným větrákem lze PI-MAX4 kamery chladit až na zmíněných $-25\ ^\circ\text{C}$.

Nyní něco o externím zesilovači (ICCD). Ve zkoumané kameře je zesilovač Gen II 18mm RB Fast Gate, jehož závislost kvantové účinnosti⁴ (a tedy i rozsah) je vidět v grafu 1.3. U použitého zesilovače může být doba osvětlení kamery (gate width) až okolo 2 ns. Toho se docílilo přidáním vrstvy niklu, což má za vedlejší efekt snížení kvantové účinnosti až o 40 % (viz [9]). Ani tomuto zesilovači se nevyhne šum — ekvivalentní intenzita pozadí (EBI) je však jen 0,05 až 0,2 elektronů na pixel za sekundu (v podstatě jde o temný šum externího zesilovače). Poslední komponenta externího zesilovače je fluorescenční vrstva nazývaná P43.⁵ U té je doba, po které klesne fluorescence na 1 %, pouze 3 ms, jak je udáno v [9].



Obrázek 1.3: Kvantová účinnost externího zesilovače v závislosti na vlnové délce. Ve zkoumané kameře jde o RB Fast Gate zesilovač. [7]

1.2.3 Software LightField

Kamera a spektrograf byly dodány se softwarem LightField, se kterým jsou úplně kompatibilní. Budeme zde probírat pouze ty nejdůležitější věci, které se nějak týkají obsluhy kamery a spektrografu. Informace v této sekci bereme z [10].

LightField obsahuje dvě různá pracovní rozhraní: **Experiment** a **Data**. V rozhraní Experiment, lze nastavit a provést experiment a prohlížet data, zároveň co jsou měřena. Rozhraní Data je určeno k prohlížení již naměřených dat, jejich porovnávání, exportování do jiných formátů a provádění statistik.

⁴Kvantová účinnost se zavádí jako podíl fotonů, které dopadnou na fotokatodu a přemění se v elektrony, ku všem fotonům, které dopadnou na fotokatodu.

⁵Konkrétně jde o látku $Gd_2O_2S : Tb$ [9]

Nás bude zajímat pouze rozhraní Experiment, jehož vzhled lze nalézt na obr. 1.4. Vedle přepínání rozhraní jsou tlačítka umožňující uložit, nahrát a začít nový experiment. V tomto případě je experimentem myšleno přepsání, resp. nahrání veškerých nastavení jako je volba mřížky, doba expozice, kalibrace a jiné. Vedle nich jsou tlačítka Run, Acquire a Stop. Run nechá kameru snímat pořád dokola, Stop zastaví měření a pomocí Acquire se doměří proběhlý snímek, uloží se a zastaví se měření.

My se zaměříme na nastavení jednotlivých experimentů v oblasti **Experiment Settings**⁶. V této oblasti jsou lišty, které se dají rozbalit, a jsou to:

Common Acquisition Settings Zde nalezneme počet snímků (Number of Frames), které má kamera zachytit. Expozice (Exposures per Frame) značí kolikrát se osvítilo a nasčítalo CCD, aby se utvořil jeden snímek. Pokud je expozice větší než 1, můžeme nastavit zda se budou osvětlení CCD sčítat nebo průměrovat. Photon Detection značí mód detekce jednotlivých fotonů. Zesílení (gain) lze nastavit v rozsahu od 1 do 10 000. Pro něj je však potřeba zapnout spínač I.I.T. PWR na zadní straně kamery (z důvodu ochrany kamery).

Online Corrections Zde se řeší korekce (odečet pozadí). Acquire New Background File uloží záznam o pozadí a zvolí se to nejnovější naměřené. Je vhodné naměřit pozadí při každé větší změně, např. změna mřížky či rozsahu vlnové délky. Cosmic Ray Removal bere v potaz pozadí kosmického záření. Orientation umožňuje změnit orientaci obrazu tak, jak ji chceme zobrazit.

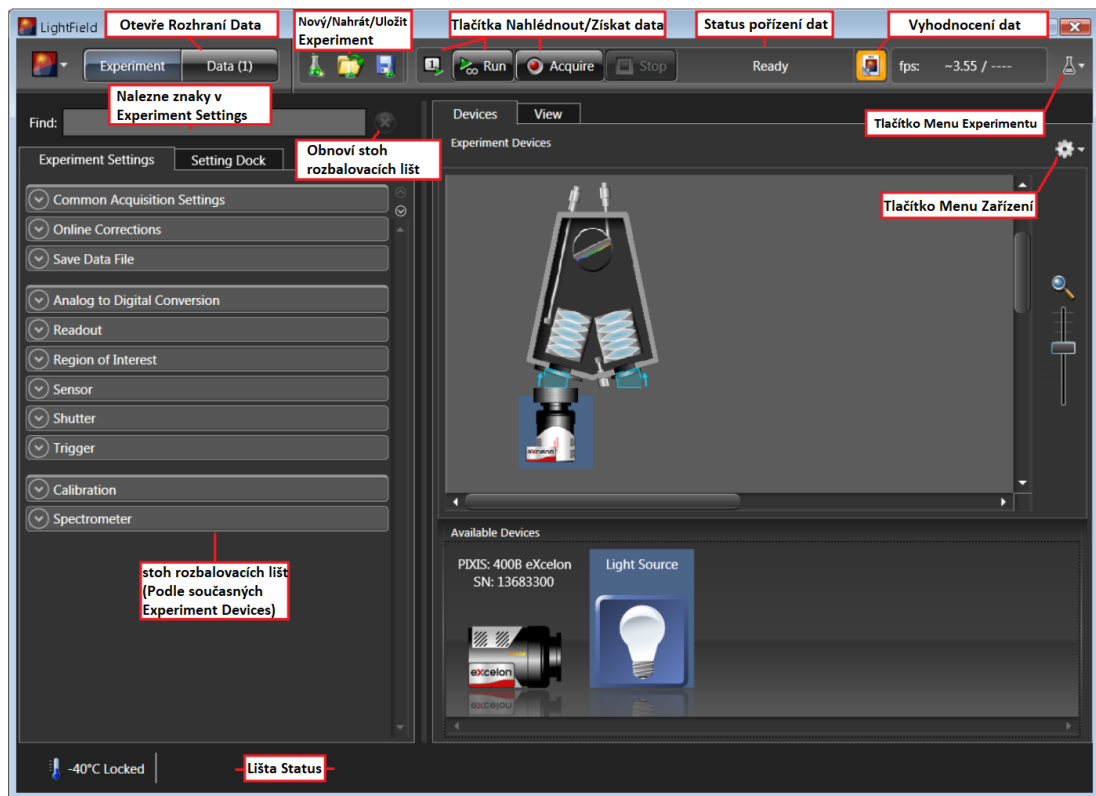
Save Data File Zde si lze vybrat kam a pod jakým názvem se budou ukládat naměřená data. Když chceme uložit měření pomocí tlačítka Acquire, uloží se pod jménem, které je udáno zde. Je tedy třeba změnit název před uložením měření. Jménům souborů lze přidat datum a čas nebo automatické očíslování.

Analog to Digital Conversion První nastavení je Quality, ve kterém si můžeme vybrat Low Noise (minimalizuje šum), High Capacity (maximalizuje dynamický rozsah) a Electron Multiplied (zavede zesílení pomocí nárazové ionizace). Speed určuje frekvenci, se kterou jsou data z CCD digitalizována. Analog Gain lze nastavit Low, Medium nebo High a určuje kolik stačí zachytit elektronů pro přičtení jednoho countu.

Region of Interest Zde se nastavuje binning, kdy dochází ke „slévání“ skupin pixelů dohromady, aby vytvořily jeden větší pixel (viz např. [4]). U Full Sensor k binningu nedochází, při Full Sensor Binned dochází k binningu na celé ploše CCD a u Rows Binned dojde k binningu pouze ve vertikálním směru. Rows Binned je vhodné použít u spektroskopických měření a číslo Center označuje kolik pixelů se k binningu použije. V Custom Region of Interest lze nastavit libovolný rozsah.

Sensor Jedná se o nastavení teploty (Temperature Setpoint) a odebrání přebytečného náboje z CCD (Sensor Cleaning).

⁶Do oblasti Setting Dock se dají přetáhnout libovolná nastavení z Experiment Settings, aby byla pohromadě



Obrázek 1.4: Rozhraní Experiment s popisky [10]

Trigger Nastavujeme externí/interní spínač (trigger) a jeho práh (threshold).

Calibration Volíme způsob kalibrace. Standard Calibration je standardní kalibrace pomocí emisních čar Hg, Ne nebo Ar.

Spectrometer Volí se zde použité mřížky ve spektrografu a její vycentrování na určitou vlnovou délku.

SuperSYNCHRO Timing Zde se řeší časové vlastnosti měření. Gating lze nastavit na Repetitive (gate width i doba, kdy se nic neměří (gate delay), jsou pevné), nebo Sequential (gate width i gate delay, jsou proměnné).

2. Experimentální část

V této kapitole jsou prezentovány výsledky našeho měření s emICCD kamerou PI-MAX4: 512 EM. Bude zde probrána závislost poměru signál/šum na nastavení zesílení, spektrální rozlišení kamery a porovnáme spektrum naměřené CCD kamerou se spektrem naměřeným emICCD kamerou.

V celé kapitole značí I naměřenou intenzitu.

Veškeré grafy byly vykresleny v programu Gnuplot 5.2. Prokládání křivkami bylo programem určeno metodou nejmenších čtverců.

Veškerá měření jsme prováděli za sníženého osvětlení a pokojové teploty. Kamera byla vždy před měřeními ochlazená na -20°C . Ke všem měřením jsme využili zelený kontinuální laser¹ DPSS-532-NL o vlnové délce 532 nm a vždy jsme jím nastavili proud 0,4 A, což odpovídá intenzitě laserového svazku 1 mW. [11]

Nyní nastavení kamery, která byla shodná pro všechna měření. V Common Acquisition Settings v části On-CCD Accumulations jsme vždy měli v emICCD Gain Mode zvoleno Optimal a hodnotu Number of Frames jsme nastavili na 1. V sekci Online Corrections jsme zvolili vhodnou Orientaci. V nastavení Analog to Digital Conversion jsme nechali přednastavenou kvalitu jako Electron Multiplied, Speed 10 MHz a Analog Gain jsme nechali High. Také jsme vždy v Region of Interest nastavili a použili Rows Binned (512 x 1) a vycentrovali na 512. Před měřeními jsme spektrálně zkalibrovali každou mřížku. Kalibrace jsme prováděli pomocí rtuťové výbojky a žlutého filtru OG400 (filtr jsme použili, abychom nedetekovali vyšší řády z výbojky). Spektra nebyla kalibrována na spektrální citlivost detekčního systému.

Světlo z laseru bylo čočkami zaostřeno na vzorek (pozorujeme luminiscenční spektrum vzorku) a emitované světlo ze vzorku bylo dalšími dvěma čočkami zaostřeno do štěrbin spektrografu. Mezi poslední dvě čočky jsme umísťovali různé filtry redukující intenzitu světla. Jeden filtr, který jsme používali při všech měřeních, byl filtr FELH0550, který propouští pouze světlo o vlnové délce nad 550 nm, tj. potlačí rozptyl laserového svazku.

2.1 Měření výtěžnosti zesílení

V této sekci budeme měřit výtěžnost funkce zesílení kamery a to následovně: laserem svítíme na vzorek (jde o oranžový filtr OG570 [12], což je sklo dopované polovodičovými nanokrystaly CdSSe), v kameře detekujeme jeho luminiscenční spektrum² a postupně zvyšujeme hodnotu zesílení. Z grafů určíme hodnotu píku a šumu, podělíme je a vyneseme závislost tohoto podílu na zesílení.

Pro toto měření jsme zvolili mřížku s 50 vrypy na milimetr a vycentrovali ji na 600 nm. Před měřením jsme nastavili zesílení na maximální hodnotu 10 000 a přidávali filtry tak, aby výsledný signál nepřetekl (maximální počet countů je 65 535). Proto jsme mezi čočky přidali filtr NDUV20A, který 100x zeslabuje světlo. Dále jsme nastavili šířku štěrbin spektrografu na $60\ \mu\text{m}$ a gate width na 20 ms. Postupně jsme zadávali hodnoty zesílení 1, 5, 10, 20, 40, 80, 150, 300, 600,

¹Jde o diodami čerpaný pevnolátkový laser (DPSS).

²Jedná se o mezipásovou luminiscenci, u které spektrální pozice maxima odpovídají širce zakázaného pásu.

1 200, 2 500, 5 000 a 10 000 (x-ová osa bude v logaritmické škále) a zaznamenávali luminiscenční spektrum.

Pro každou hodnotu zesílení jsme jako pík vybrali nejvyšší hodnotu intenzity v blízkém okolí vlnové délky 580 nm. Žádné světlo s vlnovou délkou pod 550 nm by do spektrografu nemělo projít, proto jsme tuto oblast zvolili k určení hodnoty šumu. Pro každé zesílení jsme v oblasti 300 až 450 nm určili střední hodnotu intenzit a její směrodatnou odchylku. Jako hodnotu šumu uvažujeme hodnotu této směrodatné odchylky. Toto jsme udělali pro hodnotu expozice 1×20 ms a úplně totéž jsme provedli i pro hodnotu expozice 100×20 ms. Expozice značí kolikrát se nasčítaly elektrony z pixelů CCD, aby vznikl jeden snímek (první číslo), a jak dlouho bylo CCD osvětlováno, tedy gate width (druhé číslo). Místo „expozice 1×20 ms“ budeme psát jen „expozice 20 ms“ a podobně pro libovolnou jinou dobu osvětlení.

Pro ilustraci je zde 6 grafů, které znázorňují jak vypadalo spektrum pro různou hodnotu zesílení při expozici 100×20 ms — jsou to grafy 2.1a až 2.1f.

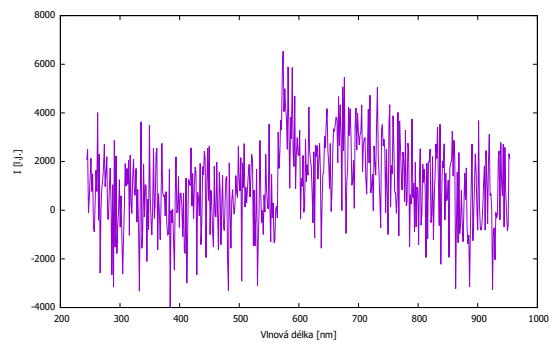
Již od oka je jasné, že hodnoty amplitudy píku rostou rychleji než šum (viz grafy 2.2 a 2.3). Proto očekáváme, že výsledná závislost poměru píku ku šumu na zesílení bude rostoucí funkce. To je vidět ve výsledných grafech 2.4 a 2.5 a znamená to, že při zvyšující se hodnotě zesílení ta důležitá informace vynikne a neztratí se v šumu.

Ale jak rychle roste tato závislost? Z vlastností log-log grafu (logaritmický v obou osách) víme, že funkce Ax^n se v něm jeví jako lineární. Přesně to jsme pro obě expozice pozorovali a proto jsme závislost stejnou funkcí nafitovali. Hodnoty koeficientů A a n jsou udány v tabulce 2.1, kde δ_X značí směrodatnou odchylku veličiny X .

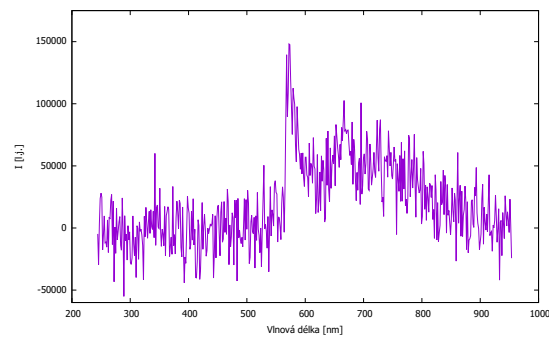
Výsledek tedy je, že při vysoké hodnotě zesílení (a delší expozici) budou píky mít ostřejší rysy a neztratí se v šumu.

	A	n	δ_A	δ_n
expozice 20 ms	4,7	0,152	1,1	0,031
expozice 100×20 ms	4,51	0,261	0,65	0,018

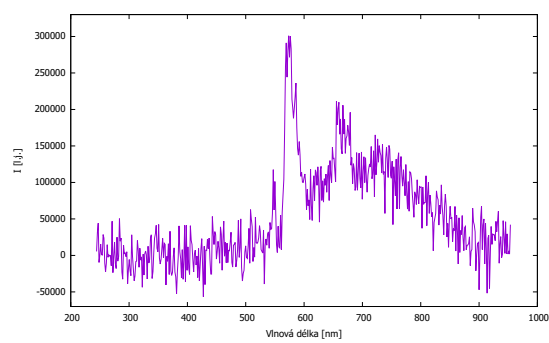
Tabulka 2.1: Koeficienty funkce Ax^n při fitování závislosti poměru pík/šum na zesílení



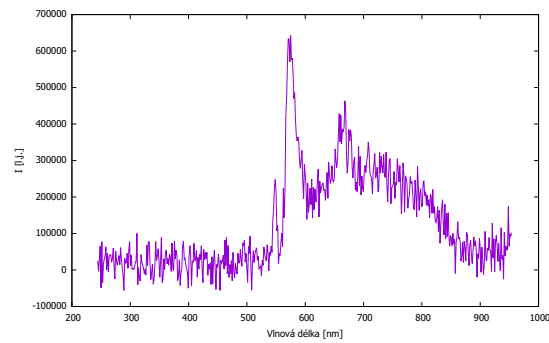
(a) Zesílení 1



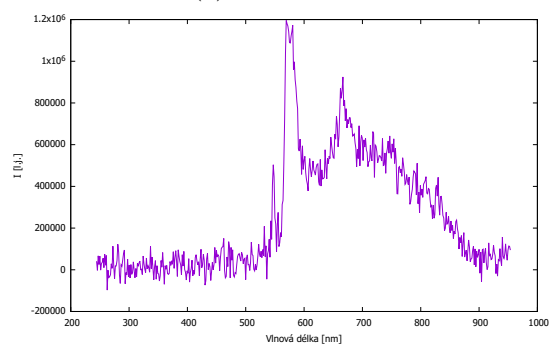
(b) Zesílení 10



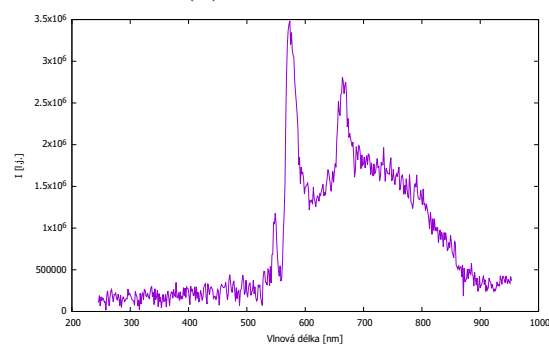
(c) Zesílení 40



(d) Zesílení 300

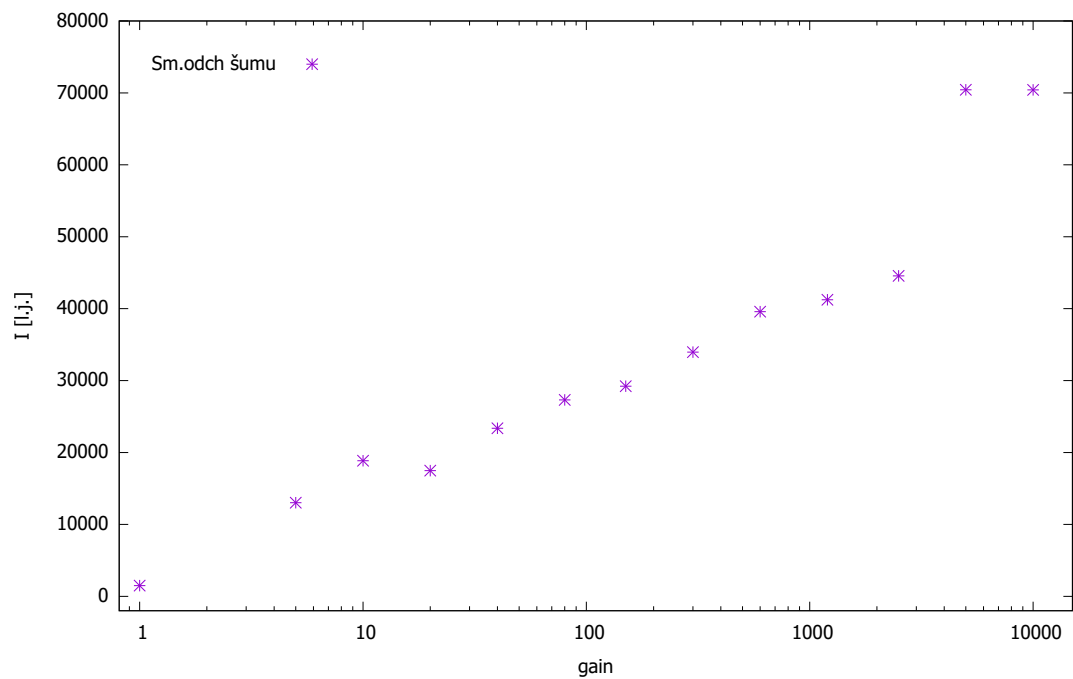


(e) Zesílení 1 200

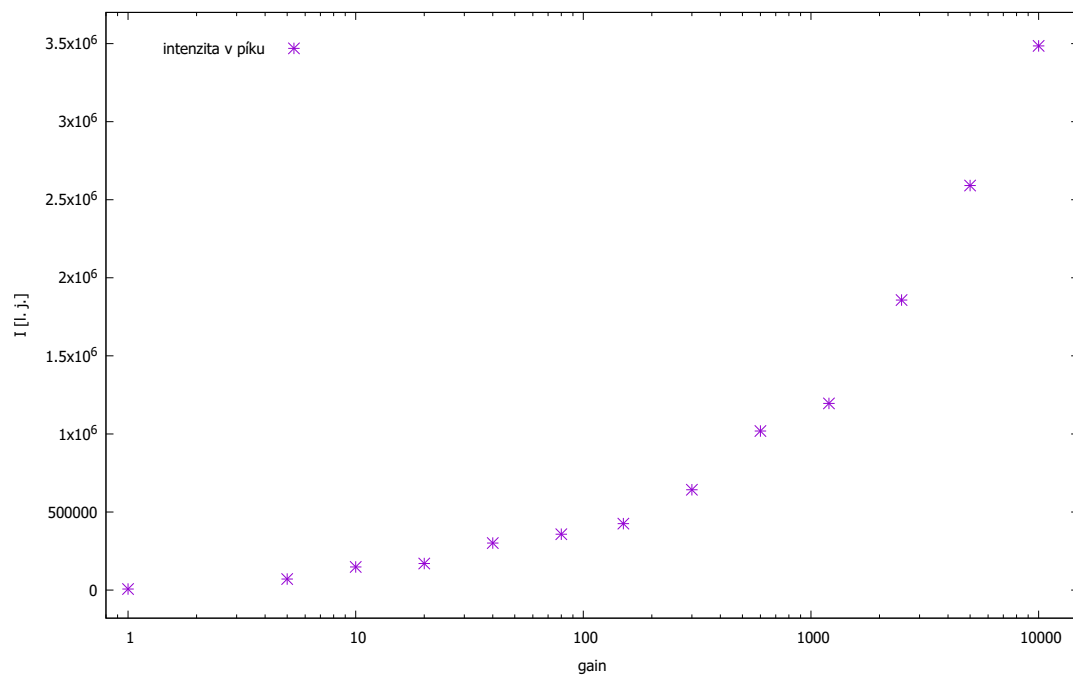


(f) Zesílení 10 000

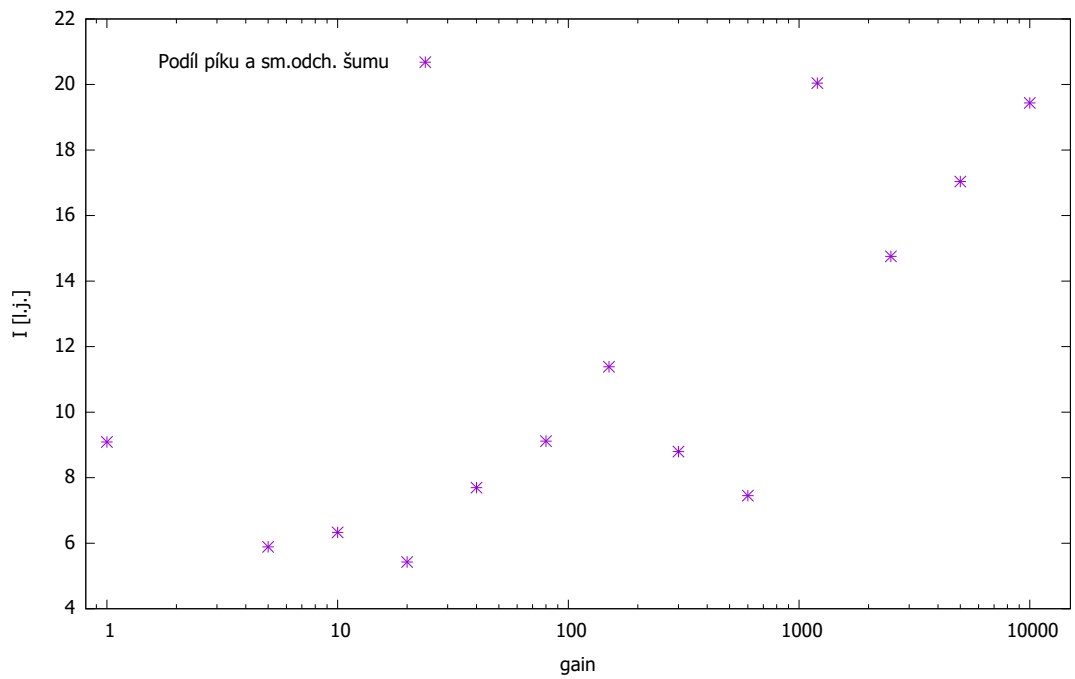
Obrázek 2.1: Spektrum pro expozici 100×20 ms



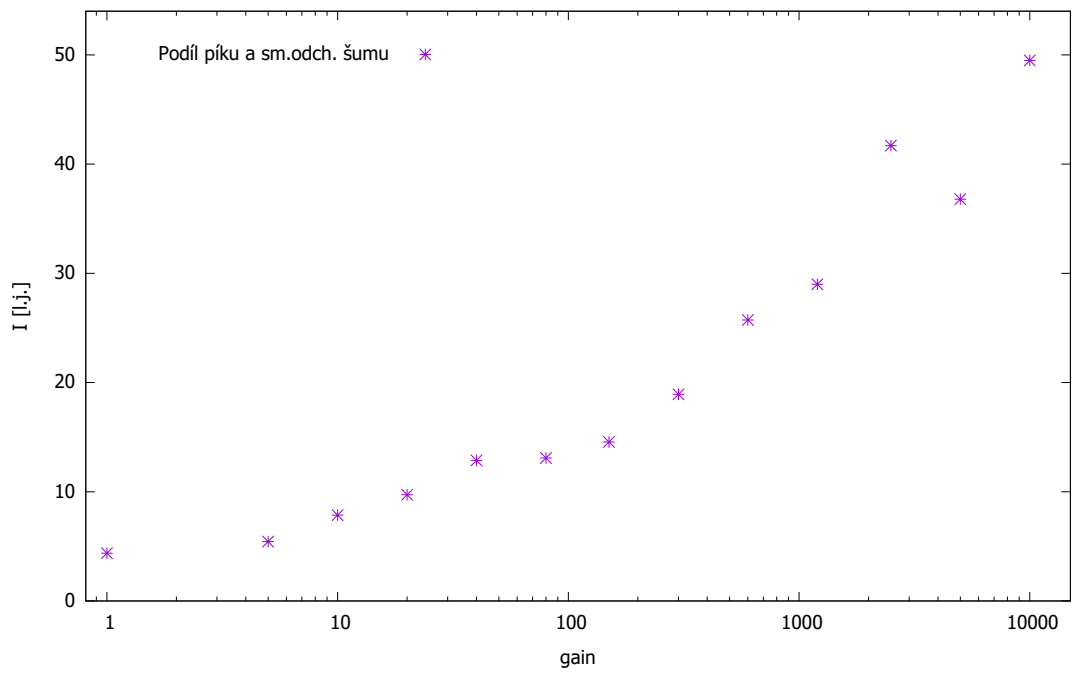
Obrázek 2.2: Závislost šumu na zesílení pro expoziční 100×20 ms



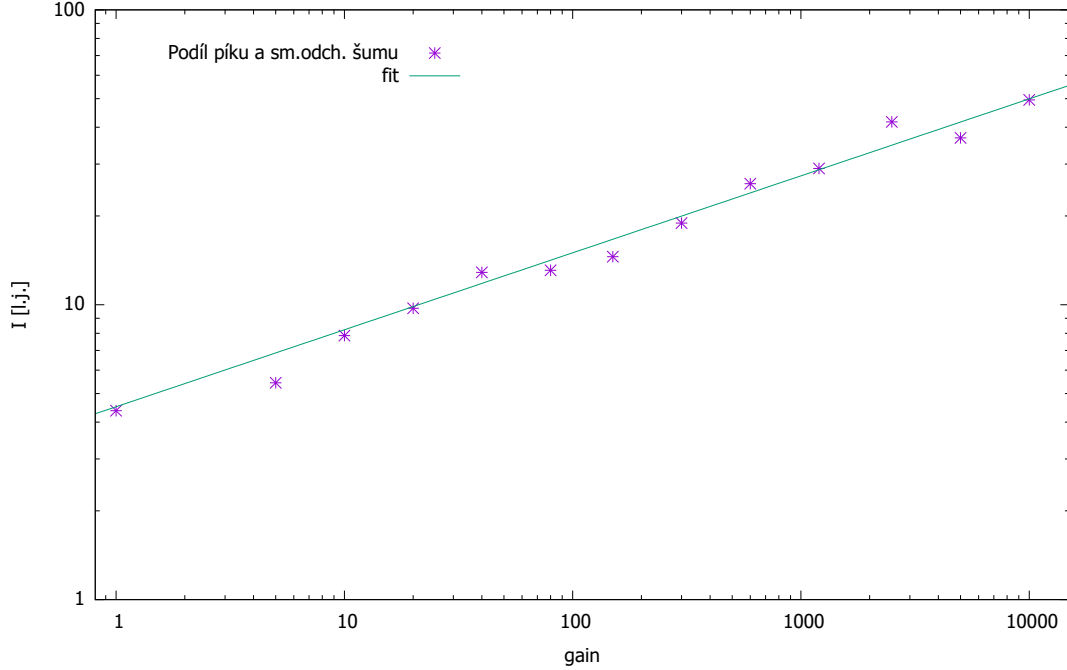
Obrázek 2.3: Závislost amplitudy píku na zesílení pro expoziční 100×20 ms



Obrázek 2.4: Závislost poměru signál/šum na zesílení pro expozici 20 ms



Obrázek 2.5: Závislost poměru signál/šum na zesílení pro expozici 100×20 ms



Obrázek 2.6: Závislost poměru signál/šum na zesílení pro expozici 100×20 ms v logaritmické škále. Proloženo mocninnou funkcí Ax^n , která se v log-log grafu jeví jako přímka.

2.2 Měření spektrálního rozlišení

V této části proměříme spektrální rozlišení emICCD kamery. Nyní jako vzorek, na který budeme svítit, použijeme bílý papír (vizitku), který rozptyluje laserové záření. Světlo, které detekujeme, by mělo být spektrálně mnohem užší než spektrální rozlišení detekčního systému, který máme, a kamera by tak měla detekovat pouze jedinou vlnovou délku.³ Reálně k tomu nedochází a kamera detekuje širší interval vlnových délek. Proměříme proto pro každou mřížku spektrum a určíme Full Width at Half Maximum (FWHM) píku, což koresponduje se spektrálním rozlišením kamery.

Nastavili jsme šířku štěrbinu spektrografu na $25 \mu\text{m}^4$ a zesílení na hodnotu 10. Mezi čočky jsme napevno vložili neutrální filtr OD 2 (číslo filtru X značí optickou hustotu⁵, tzn. že se intenzita světla po průchodu filtrem sníží 10^X -krát). Pro mřížky 50 g/mm a 150 g/mm jsme ještě navíc přidali filtr OD 3, nastavili gate width na 20 ms a hodnotu expozice na 100×20 ms, zatímco pro mřížku 1200 g/mm jsme vložili filtr OD 2,5, nastavili gate width na 80 ms a expozici na 100×80 ms.

Pro každou mřížku jsme okolí píku prokládali lorentzovským rozdělením tvaru

$$B \cdot \frac{2\tau}{1 + [2\pi\tau(x - \mu_0)]^2},$$

kde B je amplituda, μ_0 je střední hodnota a τ reflektuje jeho šířku. Provedením

³Velikost intervalu vlnových délek, které laser vyzařuje, je aspoň o řád nižší, než dovede zkoumaná kamera rozlišit.

⁴Jde o rozumný kompromis, protože při užší štěrbině se začínají projevovat difrakční jevy.

⁵Optickou hustotu filtrů budeme značit OD (z anglického Optical Density).

fitu získáme hodnoty koeficientů a ze znalosti hodnoty τ lze dopočítat hledané FWHM lorentzovského rozdělení (a tedy i měřeného píku) dle vzorce

$$\text{FWHM} = \frac{1}{\pi\tau} .$$

Metodou přenosu chyb (viz např. [15]) lze odvodit nejistotu veličiny FWHM jako

$$\delta_{\text{FWHM}} = \text{FWHM} \frac{\delta_{\tau}}{\tau} .$$

Postupně pro mřížky 50 g/mm, 150 g/mm a 1 200 g/mm jsme provedli proložení lorentzovským rozdělením a vynesli je do grafů 2.7, 2.8 a 2.9. Pro mřížku 1 200 g/mm jsme také změřili dublet ve spektru rtuťové výbojky z kalibrace, zde jsme nafitovali každý pík zvlášť a výsledná křivka je součtem dvou lorentzovských rozdělení (viz graf 2.10). Hodnoty koeficientů fitu jsou i s jejich nejistotami zapsány v tabulce 2.2. Podobně jsou i výsledné hodnoty veličiny FWHM pro jednotlivé mřížky uvedeny v tabulce 2.3.

Jak jsme zmiňovali již v kapitole 1.2.1, výrobce pro tento spektrograf udává s mřížkou 1 200 g/mm rozlišení až 0,08 nm, avšak za použití jiné CCD kamery. Šlo o kameru PIXIS:400F, která má pixely o velikosti $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, použit byl laser o vlnové délce 546 nm a štěrbinu byla otevřena na $10 \mu\text{m}$.

My jsme pro tento spektrograf s mřížkou 1 200 g/mm a použili emICCD kameru PI-MAX4: 512 EM o velikosti pixelů $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, laser o vlnové délce 532 nm a otevřeli jsme štěrbinu na $25 \mu\text{m}$. Z našich měření plyne hodnota spektrálního rozlišení jako $(0,130 \pm 0,006) \text{ nm}$ (viz tabulka 2.3).

Samozřejmě platí, že čím užší štěrbinu a čím menší pixely, tím většího spektrálního rozlišení lze dosáhnout.

Ačkoliv má námi zkoumaná kamera pixely menších rozměrů, nastavení šířky štěrbinu bylo u našich měření dvaapůlkrát větší než u výrobce. Očekáváme proto zhruba dvakrát větší rozlišení udávané výrobcem, než jsme naměřili my. Vskutku, poměr těchto rozlišení je $0,130 \div 0,08 \doteq 1,6$, což přibližně odpovídá hrubým odhadům $25 \times 16 \div (10 \times 20) = 2$.⁶

Ačkoliv zkoumaná emICCD kamera nedisponuje až tak vysokým spektrálním rozlišením jako jiné CCD kamery, její síla by měla tkvět v kombinaci dostatečně dobrého spektrálního rozlišení s velmi dobrým časovým rozlišením. Jak bylo uvedeno dříve, časové rozlišení jsme, bohužel, nebyli schopni proměřit, protože laser, který jsme k tomu chtěli použít, byl nefunkční.

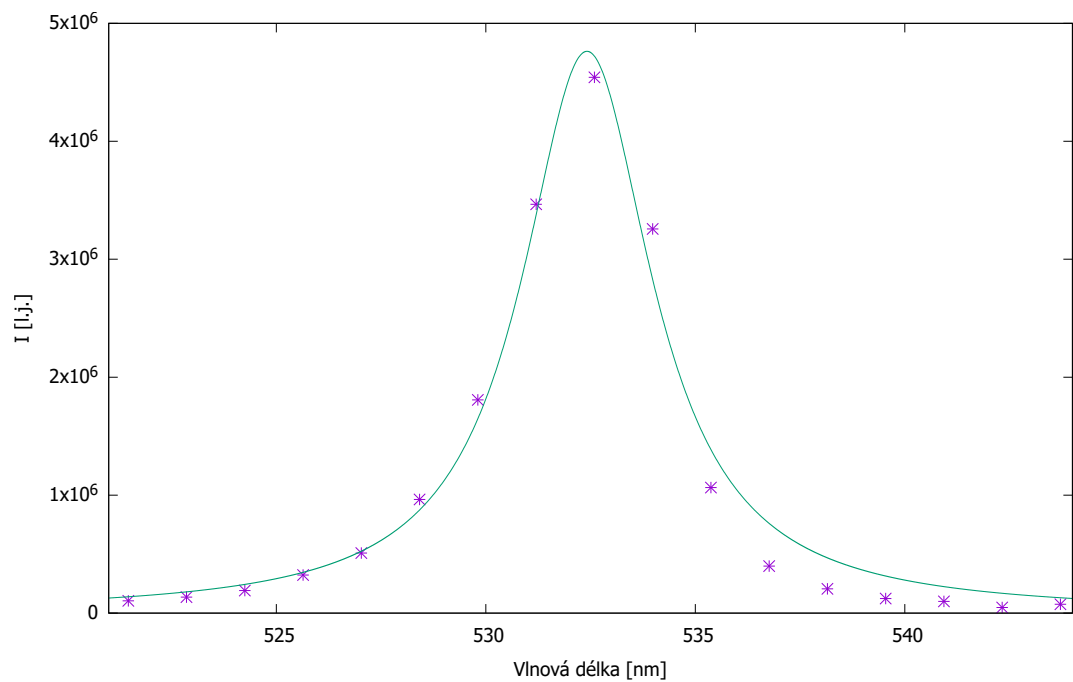
⁶Jde o odhad $(\text{šířka štěrbinu}_1) \times (\text{šířka pixelu}_1) / [(\text{šířka štěrbinu}_2) \times (\text{šířka pixelu}_2)]$.

Mřížka	B [$10^5 \cdot \text{nm}$]	τ [nm]	μ [nm]	δ_B [$10^5 \cdot \text{nm}$]	δ_τ [nm]	δ_μ [nm]
50 g/mm	283,6	0,084	532,415	12,3	0,005	0,087
150 g/mm	37,1	0,265	532,035	1,7	0,018	0,035
1 200 g/mm	5,88	2,45	532,125	0,11	0,002	0,012
dublet L	3,76	1,825	577,012	0,11	0,069	0,011
dublet P	3,95	1,829	579,110	0,11	0,066	0,010

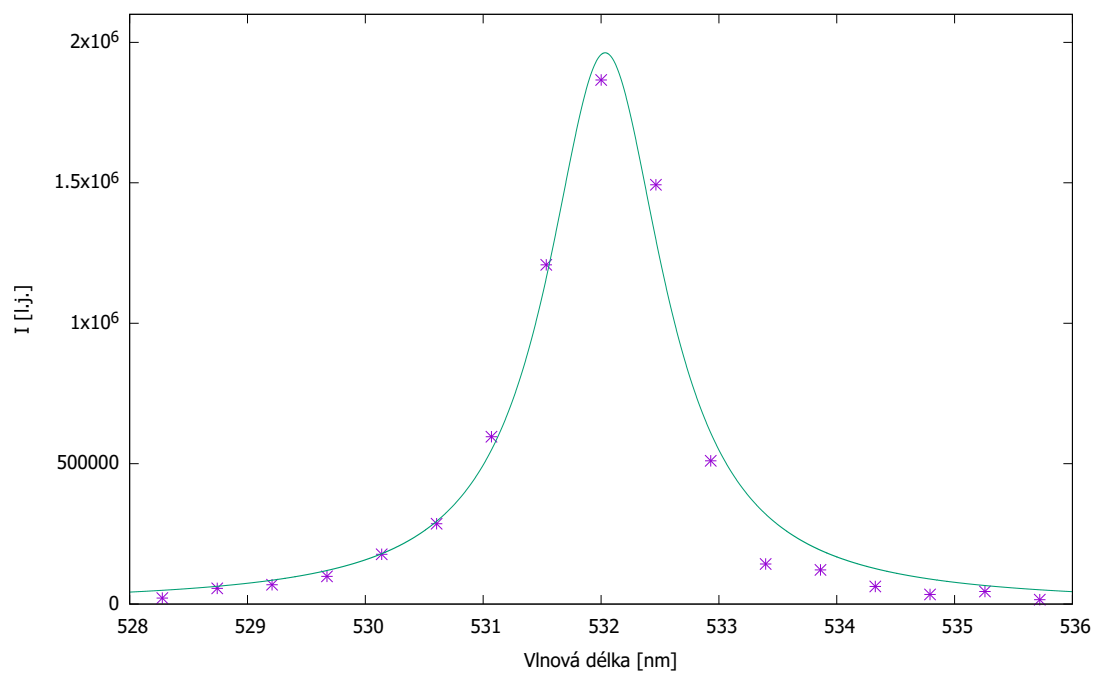
Tabulka 2.2: Koeficienty lorentzovského rozdělení při fitování okolí píku pro každou mřížku. Levý, resp. pravý pík dubletu měřeného mřížkou 1 200 g/mm je označen L, resp. P.

Mřížka	FWHM [nm]	δ_{FWHM} [nm]
50 g/mm	3,80	0,23
150 g/mm	1,202	0,084
1 200 g/mm	0,130	0,006
dublet L	0,174	0,007
dublet P	0,174	0,006

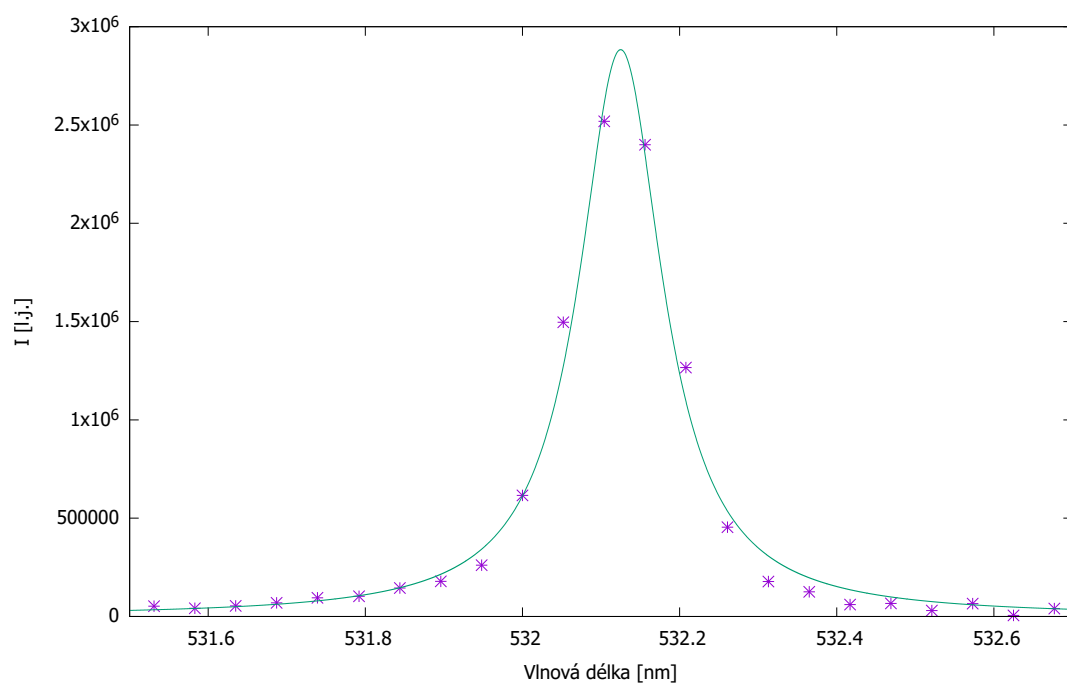
Tabulka 2.3: FWHM lorentzovského rozdělení při fitování okolí píku pro každou mřížku. Levý, resp. pravý pík dubletu kalibrační rtuťové výbojky měřeného mřížkou 1 200 g/mm je označen L, resp. P.



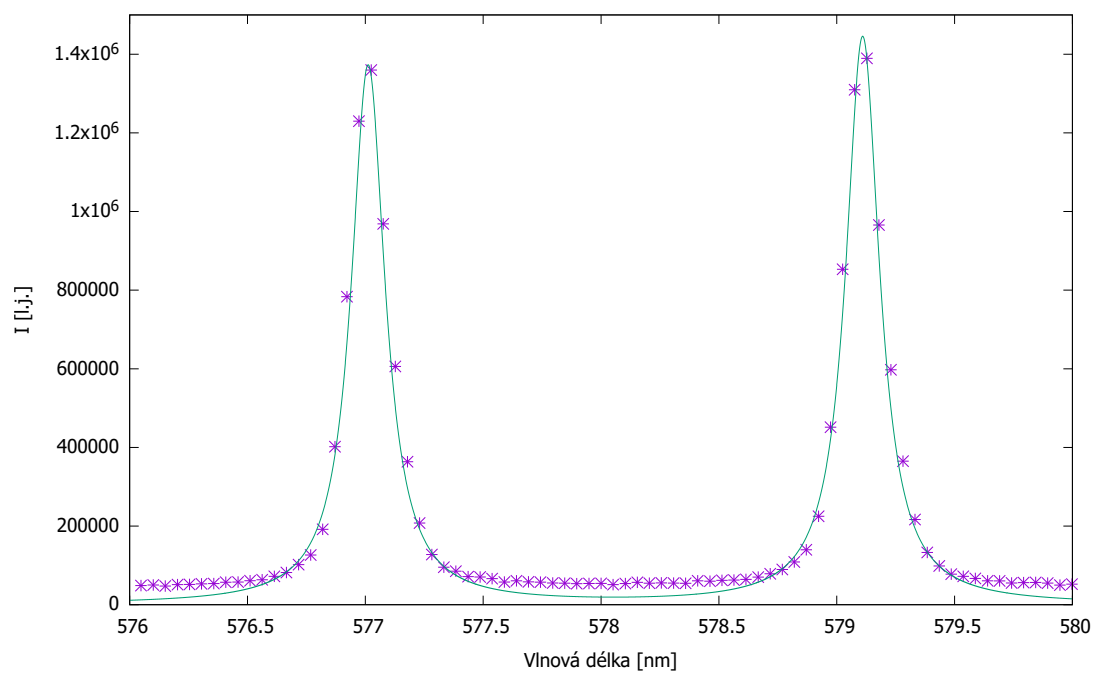
Obrázek 2.7: Graf píku pro mřížku 50 g/mm, proloženo lorentzovským rozdělením



Obrázek 2.8: Graf píku pro mřížku 150 g/mm, proloženo lorentzovským rozdělením



Obrázek 2.9: Graf píku pro mřížku 1 200 g/mm, proloženo lorentzovským rozdělením



Obrázek 2.10: Graf dubletu kalibrační rtuťové výbojky pro mřížku 1 200 g/mm, proloženo součtem dvou lorentzovských rozdělení

2.3 Experimentální část - porovnání s CCD

V této sekci budeme primárně okometricky porovnávat citlivost a šum CCD a emICCD kamery (budeme řešit jejich vhodnost pro měření slabých signálů).

Jako CCD kameru jsme použili kameru Andor DV420A-OE, která byla napojena na spektroskop Oriol MS127i 1/8 m. Tato CCD má 1024×255 pixelů o velikosti $26 \mu\text{m} \times 26 \mu\text{m}$ a lze se o ní dozvědět více např. v [1].

Jako luminiscenční vzorek jsme použili Schott RG665 [13], jehož složení lze nalézt v [14]. U emICCD byla použita mřížka 50 g/mm, zatímco u CCD byla použita mřížka 400 g/mm. U obou byla otevřena šterbina na $200 \mu\text{m}$ a nastavena expoziční doba (gate width) na 40 ms.

U emICCD jsme při zvýšeném zesílení přidávali neutrální filtry tak, aby hodnota intenzity nejvyššího píku byla okolo 50 000 a nepřetekla⁷. Proto jsme při vykreslení grafů zpětně započítali optickou hustotou filtru. CCD kamera narozdíl od emICCD kamery postrádá možnost nastavit zesílení.

Úplně stejně jako u emICCD jsme i u CCD svítily na vzorek a detekovali jeho luminiscenční spektrum.

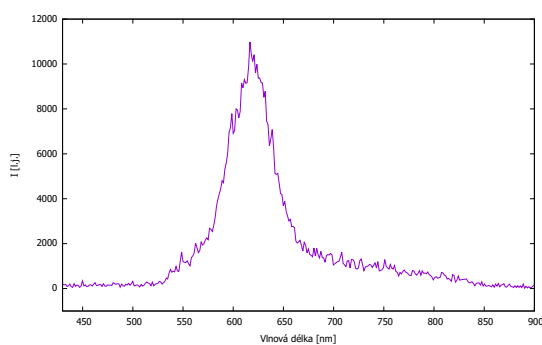
Při některých měřeních jsme použili neutrální tlumicí filtr OD 2,5 a u jiných jsme pro porovnání změnil rychlost vyčítání elektronů z CCD z původních 100 kHz na 33 kHz (jde o Readout rate, viz kap. 1.2.2; tímto snížením ze 100 kHz na 33 kHz se stihne naakumulovat víc elektronů a plyne z toho větší naměřená intenzita a nižší šum, viz [1]).

Na dalších stranách následují grafy, které byly naměřeny za stejných podmínek, primárně pro okometrické porovnání.

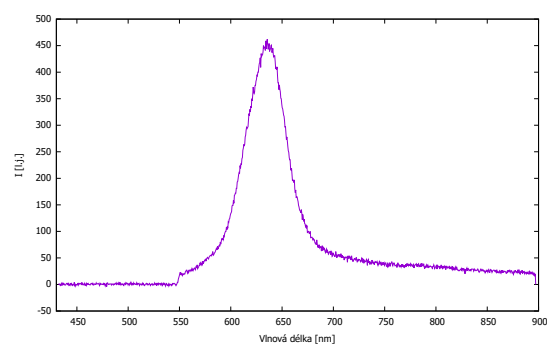
Z porovnání grafů 2.11a a 2.11b nám plyne, že pro expozici 40 ms a hodnotu zesílení 1 má emICCD kamera vyšší šum než CCD kamera. Naopak pro vysoké zesílení (a dodaný filtr) je šum u emICCD srovnatelný se šumem CCD kamery (viz grafy 2.12a až 2.13b). Pro všechny grafy platí, že naměřený signál je u emICCD kamery řádově silnější než u CCD kamery.

Závěrem tedy je, že u časově nerozlišených měření jsou obě kamery srovnatelné. Pokud se nejedná o velmi slabý signál, je šum CCD kamery nižší než u emICCD. Na druhou stranu si však u velmi slabého signálu (realizován dodáním neutrálního filtru OD 2,5) obě kamery vedou velmi podobně, co se šumu týče.

⁷Znovu připomínáme, že maximální hodnota je 65 535.

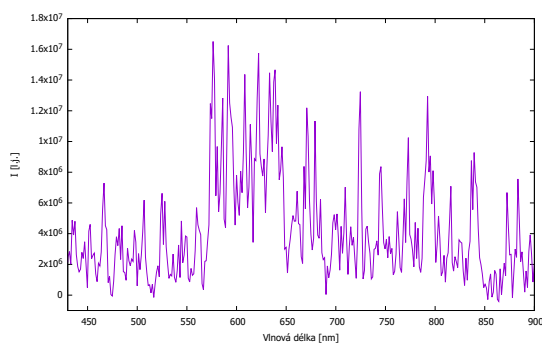


(a) emICCD při zesílení 1

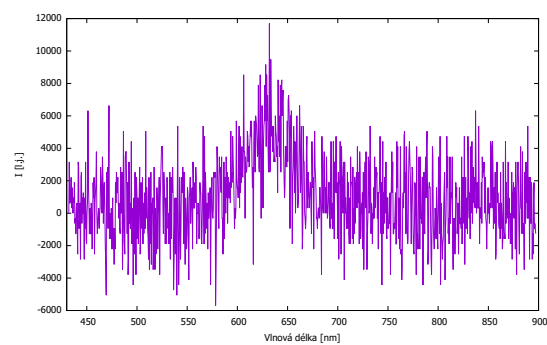


(b) CCD při Readout rate 100 kHz

Obrázek 2.11: Spektrum měřeno pro expozici 40 ms a bez filtru

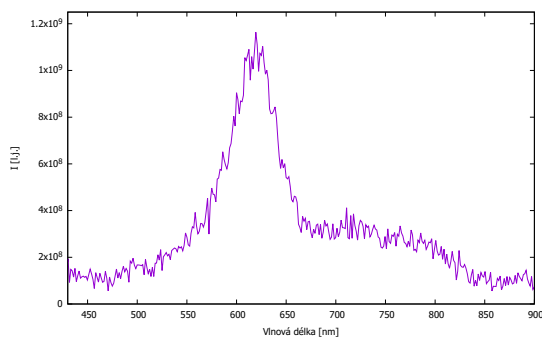


(a) emICCD při zesílení 10 000

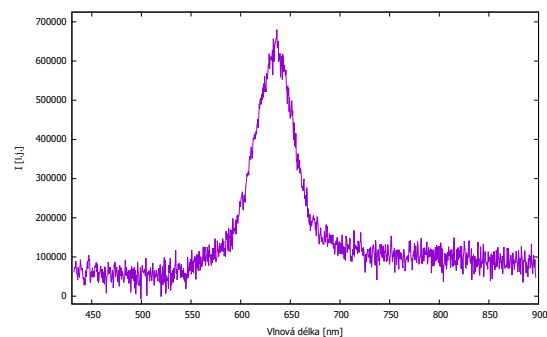


(b) CCD při Readout rate 33 kHz

Obrázek 2.12: Spektrum měřeno pro expozici 40 ms a s filtrem OD 2,5



(a) emICCD při zesílení 10 000



(b) CCD při Readout rate 33 kHz

Obrázek 2.13: Spektrum měřeno pro expozici 100×40 ms a s filtrem OD 2,5

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo pro emICCD kameru PI-MAX4: 512 EM s připojeným spektrografem IsoPlane 320 proměřit chování a vlastnosti při detekci slabých signálů společně s určením spektrálního i časového rozlišení. Kvůli nefunkčnosti laseru nebylo časové rozlišení kamery proměřeno.

V kapitole 1 byly stručně vysvětleny principy detekce ICCD, EMCCD a emICCD kamer. Dále v ní popisujeme to nejdůležitější pro spektrograf IsoPlane 320, emICCD kameru PI-MAX4: 512 EM a software LightField.

Kapitolou 2 začíná experimentální část této bakalářské práce, v jejímž úvodu je popsáno za jakých podmínek probíhala všechna měření a také co všechno jsme při měření a zpracování používali.

Experimentální část byla rozdělena do tří částí:

Kapitola 2.1 se věnuje výtěžnosti funkce zesílení pro zkoumanou kameru. Pro poměr hodnot píku ku šumu byla zjištěna rostoucí mocninná závislost Ax^n na hodnotě zesílení. Vyšly nám hodnoty koeficientů $A = 4,7(11)$ a $n = 0,152(31)$ pro expozici 20 ms a pro expozici 100×20 ms hodnoty $A = 4,51(65)$ a $n = 0,261(18)$. Docházíme tedy k závěru, že je výhodné pro slabé optické signály nastavovat vysoké hodnoty zesílení.

Kapitola 2.2 se zabývá spektrálním rozlišením. Plyne z ní, že spolu se spektrografem IsoPlane 320 dosahuje zkoumaná kamera při šířce štěrbiny $25 \mu\text{m}$ a s mřížkou $1\,200 \text{ g/mm}$ spektrálního rozlišení až $0,130(6) \text{ nm}$ (určeno pomocí FWHM).

Kapitola 2.3 je věnována primárně subjektivnímu porovnání citlivosti a šumu emICCD a CCD kamery. V ní jsme došli k závěru, že při nízké hodnotě zesílení emICCD kamery disponuje CCD kamera nižším šumem. Avšak při detekci slabých signálů (a tedy i vysokém zesílení emICCD kamery) jsou obě kamery srovnatelné.

Seznam použité literatury

- [1] DĚDIČ, V. *Charakterizace CCD kamery a vybraná měření*. Bakalářská práce, MFF UK, 2007.
- [2] ČERNOCH, A., HADERKA, O. *Detekce světla na úrovni jednotlivých fotonů*. 1. vydání. Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3113-0. Dostupné online z: http://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Cernoch,Haderka-Detekce_svetla.pdf
- [3] PRINCETON INSTRUMENTS. *emICCD: The Ultimate in Scientific ICCD Technology*. [online, citováno 18.7.2020]
https://www.princetoninstruments.com/wp-content/uploads/2020/04/TechNote_emICCD.pdf
- [4] VYVLEČKA, M. *Charakterizace spektrografu s CCD kamerou*. Bakalářská práce, MFF UK, 2015.
- [5] PRINCETON INSTRUMENTS. *IsoPlane 160, IsoPlane 320*. [online, citováno 19.7.2020]
<https://www.princetoninstruments.com/wp-content/uploads/2020/04/IsoPlane-Datasheet.pdf>
- [6] PRINCETON INSTRUMENTS. *Better Imaging with a Schmidt-Czerny-Turner Spectrograph*. [online, citováno 24.7.2020]
https://www.princetoninstruments.com/wp-content/uploads/2020/04/TechNote_BetterImagingSchmidtCzernyTurnerSpec.pdf
- [7] PRINCETON INSTRUMENTS. *PI-MAX4: 512 EM*. [online, citováno 20.7.2020]
https://www.princetoninstruments.com/wp-content/uploads/2020/04/PIMAX4_512EM_datasheet.pdf
- [8] E2V TECHNOLOGIES. *CCD97-00 Back Illuminated 2-Phase IMO Series Electron Multiplying CCD Sensor*. [online, citováno 20.7.2020]
https://www.pixcellent.com/ccd97-00_bi_2p_imo.pdf
- [9] PRINCETON INSTRUMENTS. *The Ultimate in Precision & Intelligence*. [online, citováno 20.7.2020]
https://www.princetoninstruments.com/wp-content/uploads/2020/04/PIMAX4_brochure.pdf
- [10] PRINCETON INSTRUMENTS. *LightField User's Manual*. [online, citováno 20.7.2020]
<https://www.princetoninstruments.com/wp-content/uploads/2020/04/LightField-Users-Manual-Issue-4.5-4411-0125.pdf>
- [11] EK SMA OPTICS. *DPSS-532-NL*. [online, citováno 22.7.2020]
https://eksmaoptics.com/out/media/532_NL.pdf
- [12] SCHOTT. *OG570*. [online, citováno 22.7.2020]
https://shop.schott.com/advanced_optics/Products/

Optical-Filter-Glass/Matt-Filter-Plates/Longpass/OG570/c/
matt-plate/glass-OG570

- [13] SCHOTT. *RG665*. [online, citováno 22.7.2020]
[https://shop.schott.com/advanced_optics/Products/
Optical-Filter-Glass/Matt-Filter-Plates/Longpass/RG665/c/
matt-plate/glass-RG665](https://shop.schott.com/advanced_optics/Products/Optical-Filter-Glass/Matt-Filter-Plates/Longpass/RG665/c/matt-plate/glass-RG665)
- [14] YANAGAWA T., NAKANO H., ISHIDA Y., KUBODERA K. *Host glass dependence of photodarkening in colored filter glasses*. Optics Communications vol. 100, str. 118-123, 1993.
Dostupné online z: https://eksmaoptics.com/out/media/532_NL.pdf
- [15] ENGLICH, J. *Úvod do praktické fyziky I: Zpracování výsledků fyzikálních měření*. 1. vydání. Matfyzpress, 2006. ISBN 80-86732-93-2.

Seznam obrázků

1.1	Schéma zesilovače v Princeton Instruments ICCD kameře	3
1.2	Demonstrace linearity emICCD kamery	4
1.3	Kvantová účinnost externího zesilovače	6
1.4	Rozhraní Experiment s popisky	8
2.1	Spektrum pro expozici 100×20 ms	11
2.2	Závislost šumu na zesílení pro expozici 100×20 ms	12
2.3	Závislost amplitudy píku na zesílení pro expozici 100×20 ms	12
2.4	Závislost poměru signál/šum na zesílení pro expozici 20 ms	13
2.5	Závislost poměru signál/šum na zesílení pro expozici 100×20 ms .	13
2.6	Závislost poměru signál/šum na zesílení pro expozici 100×20 ms v logaritmické škále	14
2.7	Graf píku pro mřížku 50 g/mm	17
2.8	Graf píku pro mřížku 150 g/mm	17
2.9	Graf píku pro mřížku 1 200 g/mm	18
2.10	Graf dubletu pro mřížku 1 200 g/mm	18
2.11	Spektrum měřeno pro expozici 40 ms a bez filtru	20
2.12	Spektrum měřeno pro expozici 40 ms a s filtrem OD 2,5	20
2.13	Spektrum měřeno pro expozici 100×40 ms a s filtrem OD 2,5	20

Seznam tabulek

1.1	Parametry mřížek, které spektrograf používá	5
2.1	Koeficienty funkce Ax^n	10
2.2	Koeficienty lorentzovského rozdělení	16
2.3	FWHM lorentzovského rozdělení	16

Seznam použitých zkratek

CCD	Charge-Coupled Device
ICCD	Intensified CCD
EMCCD	Electron-Multiplying CCD
emICCD	Electron-Multiplying Intensified CCD
MCP	Microchannel plate
gain	zesílení
Readout rate	horizontální čtecí rychlost
gate width	doba osvětlení kamery
gate delay	doba, kdy se nic neměří
FWHM	Full Width at Half Maximum