

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. David Pospíchal



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## SYSTÉM PRO MĚŘENÍ LOKÁLNÍCH IR SPEKTER

LOCAL IR SPECTRA MEASUREMENT SYSTEM

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Pospíchal

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Škarvada, Ph.D.

BRNO 2021



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. David Pospíchal

**ID:** 195621

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## System pro měření lokálních IR spekter

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je návrh a realizace systému pro měření spekter v infračervené oblasti, lokálně vyzařovaných z elektricky excitovaných plošných vzorků (např. solární články). V rámci práce prostudujte problematiku a navrhnete celkové uspořádání systému, specifikujete jednotlivé komponenty, realizujete potřebné příslušenství (optická část, driver, software...), systém sestavte, experimentálně ověřte jeho funkčnost a zhodnoťte dosažené výsledky.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 25.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel Škarvada, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fojcik, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem systému pro měření infračervených spekter z lokálních oblastí vzorků. V rámci teoretické části je popsáno elektromagnetické vlnění a související jevy. Dále je pojednáno o polovodičovém přechodu a solárních článcích. Následně je uveden základní popis řádkových spektrometrů. V praktické části je pak navrženo vhodné uspořádání celého systému, návrh kolimátoru, a především jádro celé práce, tedy řídicí software a zpracování signálu.

## Klíčová slova

Světlo, elektromagnetické vlnění, řádkové spektrometry, odraz a lom světla, optika, python

## Abstract

The diploma thesis deals with the design of a system for measuring infrared spectra from local areas of samples. The theoretical part describes the electromagnetic waves and related phenomena. Furthermore, the semiconductor junction and solar cells are discussed. The following is a basic description of line spectrometers. In the practical part, a suitable arrangement of the whole system, collimator design, and especially the core of the whole work, ie control software and signal processing, are proposed.

## Keywords

Light, electromagnetic waves, line spectrometers, reflection and refraction of light, optics, python

## **Bibliografická citace**

POSPÍCHAL, David. *Systém pro měření lokálních IR spekter* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134650>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Pavel Škarvada.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** Bc. David Pospíchal

**VUT ID studenta:** 195621

**Typ práce:** Diplomová práce

**Akademický rok:** 2020/21

**Téma závěrečné práce:** Systém pro měření lokálních IR spekter

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Škarvadovi, Ph.D. z Ústavu fyziky FEKT VUT za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a ochotu konzultovat všechny mé poznatky. Dále bych rád poděkoval rodině za finanční a psychickou podporu.

V Brně dne:

-----  
podpis autora

# Obsah

ÚVOD.....	12
<b>1. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>13</b>
1.1 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY .....	13
1.1.1 Fyzikální popis .....	13
1.1.2 Luminiscence.....	16
1.1.3 Polarizace světla .....	17
1.1.4 Odraz a lom světla .....	18
1.1.5 Vnější fotoelektrický jev .....	19
1.1.6 Vnitřní fotoelektrický jev .....	19
1.2 POLOVODIČE .....	20
1.2.1 Polovodičové přechody .....	20
1.2.2 PN přechod.....	21
1.2.3 Solární články.....	22
1.3 SVĚTLEM INDUKOVANÝ PROUD.....	23
1.4 ŘÁDKOVÉ SPEKTROMETRY .....	23
1.4.1 Popis spektrometru .....	23
1.4.2 Disperzní prvky.....	25
1.4.3 Kalibrace .....	27
<b>2. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>28</b>
2.1 BLOKOVÉ SCHÉMA .....	28
2.2 NÁVRH KOLIMAČNÍ ČÁSTI .....	29
2.3 SESTAVENÍ OPTICKÉHO SYSTÉMU.....	32
2.4 MĚŘÍCÍ STANOVIŠTĚ .....	33
2.5 VÝVOJ SOFTWARE .....	34
2.5.1 Import modulů .....	35
2.5.2 Snímání infračervených spekter .....	38
2.5.3 Excitace vzorku.....	40
2.5.4 Posuvné zařízení.....	41
2.5.5 Grafické uživatelské rozhraní .....	48
2.6 ZKOUMANÝ VZOREK .....	51
<b>3. DOPORUČENÍ .....</b>	<b>56</b>
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>57</b>

5. LITERATURA ..... 58

## Seznam symbolů a zkratek

<b>E</b>	[N.C <sup>-1</sup> ]	vektor intenzity elektrického pole
<b>B</b>	[T]	vektor magnetického pole
<i>f</i>	[Hz]	frekvence
<i>c</i>	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost šíření světla
$\lambda$	[m]	vlnová délka
<i>h</i>	[J.s]	Planckova konstanta
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$\omega$	[s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost
<i>I</i>	[w/m <sup>2</sup> ]	intenzita záření
<i>T</i>	[K]	teplota záření
<i>k</i>	[J.K <sup>-1</sup> ]	Boltzmannova konstanta
$\varphi$	[°]	úhel dopadu
<i>b</i>	[m]	šířka podstavy
$\Delta\lambda$	[m]	rozdíl vlnových délek
<i>d</i>	[m]	vzdálenost mezi vrypy
$\theta_i$	[°]	úhel dopadu
$\theta_m$	[°]	úhel odrazu
<i>m</i>		pořadí difrakčního řádu
<i>n</i>	[-]	index lomu
Si		křemík
Ag		stříbro
Au		zlato
Cu		měď
NaCl		chlorid sodný
KCl		chlorid draselný
NaI		Jodid sodný
CCD		chargé-coupled device
RGB		red green blue
InGaAS		indium galium arsenide
A/D		analog/digital
API		application programming interface
GUI		grafické uživatelské rozhraní
LBIC		Ligh beam induced current

# Seznam obrázků

OBR. 1.1: ELEKTROMAGNETICKÁ VLNA .....	13
OBR. 1.2: SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN.....	14
OBR. 1.3: RELATIVNÍ CITLIVOST OKA K ELEKTROMAGNETICKÝM VLNÁM RŮZNÝCH VLNOVÝCH DÉLEK .....	14
OBR. 1.4: PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON .....	15
OBR. 1.5: SPEKTRUM ELEKTROLUMINISCENCE KŘEMÍKOVÉHO PŘECHODU .....	16
OBR. 1.6: ELEKTROLUMINISCENČNÍ OBRAZ MONOKRYSTALICKÉHO SOLÁRNÍHO ČLÁNKU OBSAHUJÍCÍ DEFEKTY .....	17
OBR. 1.7: POLARIZACE SVĚTLA.....	17
OBR. 1.8: ODRAZ VLNY OD ROZHRAŇÍ .....	18
OBR. 1.9: VNITŘNÍ FOTOELEKTRICKÝ JEV .....	20
OBR. 1.10: ČASOVÁ VÝVOJ NEJVYŠŠÍ DOSAŽENÉ ÚČINNOSTI SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ RŮZNÝCH MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ .....	22
OBR. 1.11: MATERIÁLY DETEKTORŮ A JEJICH SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST .....	24
OBR. 1.12: USPOŘÁDÁNÍ SPEKTROMETRU.....	24
OBR. 1.13: ROZKLAD SVĚTLA OPTICKÝM HRANOLEM .....	26
OBR. 1.14: ROZKLAD SVĚTLA NA DIFRAKČNÍ MŘÍŽCE .....	27
OBR. 2.1: BLOKOVÉ SCHÉMA MĚŘÍČÍHO SYSTÉMU.....	28
OBR. 2.2: SFÉRIKÁ ABERACE A PAPRSKY SVĚTLA DOPADAJÍCÍ NA ZAKŘIVENOU A ROVINNOU ČÁST PLANKONVEXNÍ ČOČKY ....	29
OBR. 2.3: GRAF PROPUSTNOSTI NEPOVLAKOVÉ ČOČKY N-BK7 .....	30
OBR. 2.4: USPOŘÁDÁNÍ PLANKONVEXNÍCH ČOČEK V TUBUSU S PŘIPEVNĚNÍM OPTICKÉHO VLÁKNA.....	30
OBR. 2.5: GRAF ÚTLUMU POUŽITÉHO OPTICKÉHO VLÁKNA BFL48-400 .....	32
OBR. 2.6: ROZEBRANÝ KOLIMÁTOR.....	33
OBR. 2.7: SESTAVENÝ KOLIMÁTOR.....	33
OBR. 2.8: ZAOSTŘENÍ OPTICKÉHO SYSTÉMU .....	33
OBR. 2.9: MĚŘÍČÍ PRACOVNÍŠTĚ UMÍSTĚNÉ UVNITŘ KOMORY .....	34
OBR. 2.10: STRUKTURA MODULU PYTHON-SEABREEZE .....	37
OBR. 2.11: ÚČINNOST MŘÍŽKY SPEKTROSKOPU NIRQUEST 512 .....	38
OBR. 2.12: SPEKTROMETR NIRQUEST 512 .....	39
OBR. 2.13: ZÁVISLOST INTENZITY NA VLNOVÉ DÉLCE ZKOUMANÉHO VZORKU .....	40
OBR. 2.14: GRAFICKÉ UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ .....	51
OBR. 2.15: MONOKRYSTALICKÝ KŘEMÍKOVÝ SOLÁRNÍ ČLÁNEK (VLEVO), ŘEZ SOLÁRNÍHO ČLÁNKU V BLÍZKOSTI KONTAKTU (VPRAVO) .....	52
OBR. 2.16: TRASOVÁNÍ NA ZPŮSOB HADA PO FOTOVOLTAICKÉM ČLÁNKU .....	53
OBR. 2.17: MÍSTO BEZ VYZAŘOVÁNÍ.....	53
OBR. 2.18: MÍSTO NAD VZORKEM.....	53
OBR. 2.19: ZPRACOVANÉ VÝSLEDKY DO 2D MAPY .....	54

OBR. 2.20: NORMOVANÁ INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ V ROZSAHU VLNOVÝCH DÉLEK 1100 – 1200 NM .....	55
OBR. 2.21: DOMINANTĚ VYZAŘOVANÉ VLNOVÉ DÉLKY .....	55

## Seznam tabulek

TAB. 1: PŘÍKAZOVÁ SADA PRO KOMUNIKACI S POSUVNÝM ZAŘÍZENÍM .....	42
--	----

## Seznam kódů

KÓD 1.1: IMPORTOVANÉ MODULY NA ZAČÁTKU KÓDU .....	35
KÓD 1.2: SPEKTROMETR NIRQUEST 512 .....	40
KÓD 1.3: OVLÁDÁNÍ LABORATORNÍHO ZDROJE .....	41
KÓD 1.4: NASTAVENÍ PARAMETRŮ A PORTU PRO SÉRIOVOU KOMUNIKACI .....	42
KÓD 1.5: VLOŽENÍ PŘÍKAZU PRO SÉRIOVOU KOMUNIKACI.....	42
KÓD 1.6: FUNKCE MAIN.....	44
KÓD 1.7: DEFINOVÁNÍ FUNKCE INIT.....	44
KÓD 1.8: VYTVOŘENÍ SLOŽKY PRO UKLÁDÁNÍ DAT .....	44
KÓD 1.9: NASTAVENÍ PROSTORU V GRAFICKÉM UŽIVATELSKÉM ROZHRANÍ .....	45
KÓD 1.10: POMOCNÁ FUNKCE NA OTÁČENÍ X MOTORU .....	46
KÓD 1.11: SKENOVÁNÍ PROSTORU.....	46
KÓD 1.12: NASTAVENÍ INTEGRAČNÍHO ČASU .....	47
KÓD 1.13: UKLÁDÁNÍ DO FORMÁTU .PNG A .CSV .....	48
KÓD 1.14: VYTVOŘENÍ OKNA.....	48
KÓD 1.15: POPIS PŘED TLAČÍTKY .....	49
KÓD 1.16: VYTVOŘENÍ TEXTOVÉHO POLE PRO PROMĚNNÉ PŘÍKAZY.....	50
KÓD 1.17: DEFINICE TLAČÍTKA .....	50

# ÚVOD

Spektrometr je druh vědeckého přístroje, který umožňuje měřit elektromagnetické záření ve viditelné oblasti, ale i mimo ni, například v infračervené části spektra. Pomocí spektrometru lze zkoumat vlastnosti vzorků a určovat také jejich prvkové složení. Většinou se tak může dít na bázi měření spektra odraženého či prošlého světla, případně jeho absorpci ve vzorku nebo na základě měření spektra světla vznikajícího ve vzorku po vnější excitaci. Spektrometry se ale využívají i pro měření spektrálních závislostí optických veličin materiálů.

Tato práce se zabývá návrhnutím/oživením systému pro měření infračervených spekter vyzařovaných z lokálních oblastí elektricky excitovaných fotonických součástek. Hlavním cílem je zprovoznit starší uživatelsky sestavený dvouosý posuv a zhotovit automatizované měření v programovacím jazyku Python, včetně obsluhy infračerveného spektrometru a excitačního zdroje. Očekává se, že naměřená spektra budou sloužit k odhalování defektů zkoumaných vzorků, především solárních článků.

V první části diplomové práce jsou vysvětleny fyzikální principy zkoumané oblasti. Je uveden popis elektromagnetické vlny, luminiscence, polarizace, odrazu a lomu světla. Dále bude rozebrán vnitřní a vnější fotoelektrický jev. Dále jsou zmíněny polovodiče a *pn* přechod, a především ve vztahu ke zkoumaným vzorkům, bude věnována podkapitola i solárním článkům. V závěru teoretické části je popsána historie a princip řádkových spektrometrů a jejich jednotlivé prvky. Ve stručnosti je pojednáno také o kalibraci, která je žádoucí pro správné a věrohodné měření.

V praktické části se nachází návrh uspořádání systému s jednotlivými zařízeními, která jsou nezbytná pro celkovou funkci systému. Aby bylo možné efektivně skenovat jednotlivé části vzorku, je z dostupných komponentů sestaven kolimátor, který nám umožní efektivně snímat spektrum z jednoho bodu zkoumaného vzorku s ohledem na případnou změnu spektrometru a rozsahu měřených vlnových délek. Nejzásadnější částí práce je vývoj řídicího softwaru. Software byl vytvořen v Pythonu s využitím vývojového prostředí PyCharm. V jednotlivých částech je uveden popis importovaných knihoven, které byly nezbytné pro získání a zpracování naměřených hodnot. Celý vytvořený kód, spolu s naměřenými výsledky, je obsažen na příloženém CD. Nejdůležitější části vytvořeného kódu jsou zobrazeny a okomentovány v podkapitolách vývoje softwaru. Tyto části zahrnují plánování trajektorie automatizovaného měření a zhotovení grafického uživatelského rozhraní pro jednoduché ovládání. V poslední části jsou uvedeny experimentální výsledky k prokázání funkčnosti a vlastností zprovozněného systému jako celku.

# 1. TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Elektromagnetické vlny

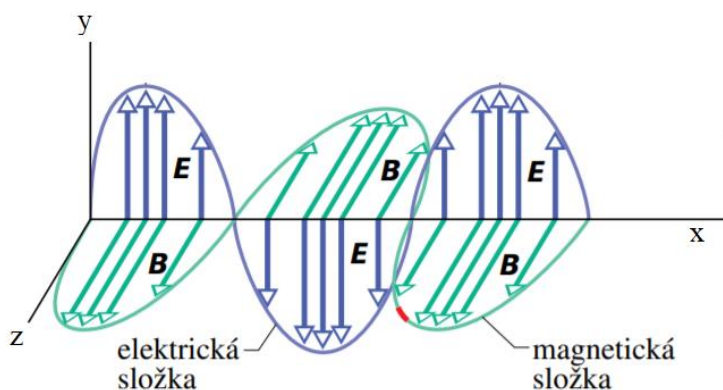
### 1.1.1 Fyzikální popis

Světlo je transverzální elektromagnetická vlna. Elektromagnetické vlnění se šíří ve tvaru dvou navzájem kolmých příčných vln – elektrického a magnetického pole  $\mathbf{E}$  respektive  $\mathbf{B}$  viz. Obr.1.1. Tučným písmem jsou v souladu se západní literaturou uváděny vektorové veličiny. V rámci této práce má význam vlnění v oblasti viditelného a blízkého infračerveného spektra.

Historicky spadá objev elektromagnetických vln do druhé poloviny 19. století. Heinrich Hertz pomocí experimentů a podkladů z Maxwellova díla zjistil, že rádiové vlny se šíří v prostoru stejnou rychlostí jako viditelné světlo. Velikost rychlosti světla ve vakuu je 299 792 458 m/s. Frekvence je zde nejdůležitější veličinou, která charakterizuje vlnění. Mezi frekvencí a vlnovou délkou platí základní vztah (1.1),

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

kde  $f$  je frekvence a  $c$  je rychlost šíření světla v daném prostředí [1].

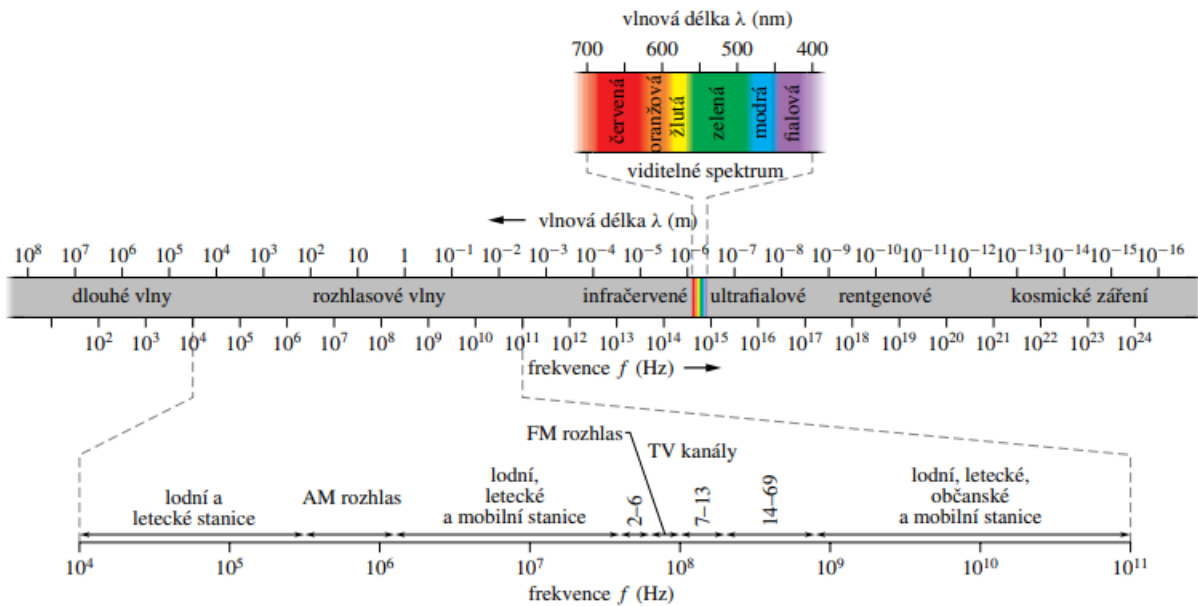


Obr. 1.1: Elektromagnetická vlna

Vektor intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  i magnetické indukce  $\mathbf{B}$  jsou navzájem kolmé a pro transverzální vlnu, kterou světlo je, jsou také kolmé na směr šíření vlny, jedná se tedy o příčnou elektromagnetickou vlnu.

Protože hlavním lidským smyslem je zrak, máme snahu při popisu využívat především vlnovou délku světla. Nicméně elektromagnetické vlnění je lépe charakterizováno frekvencí, která se na rozdíl od vlnové délky nemění v závislosti na prostředí, kterým se vlna šíří. Rozsah vlnových délek světla spadajícího do viditelného spektra se udává v rozmezí 400–700 nm, respektive frekvencím v rozsahu 430-750 THz

jak lze vidět na Obr. 1.2. V této práci se budeme zabývat i světlem v blízké infračervené oblasti spektra až do vlnových délek řádově 1700 nm.



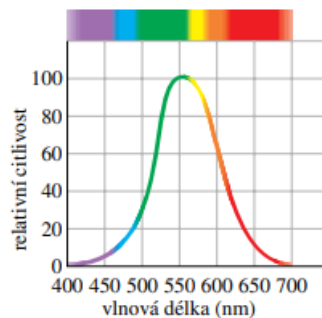
Obr. 1.2: Spektrum elektromagnetických vln

Elektromagnetické vlny, spadající v rámci vlnové délky pod viditelnou částí spektra (blíže k ultrafialové oblasti), jsou více energetické oproti vlnám spadající do infračervené oblasti. Energie  $E$  jednotlivých fotonů je dána frekvencí  $f$  vlnění a Planckovou konstantou  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s jako

$$E = h \cdot f \quad (1.2)$$

Rozsah vlnové délky nemá v principu žádnou spodní ani horní hranici, ale o světle se bavíme pro vlny mezi terahertzovým vlněním a rentgenovým zářením.

Na Obr. 1.3 lze vidět relativní citlivost oka ke světlu různých vlnových délek. Střed viditelné oblasti je zhruba u 555 nm, kterou vnímáme jako barvu žlutozelenou. Ani hranice viditelné oblasti nejsou dobře definovány, protože křivka citlivosti oka se asymptoticky blíží nule na dlouhovlnné i krátkovlnné straně [1].

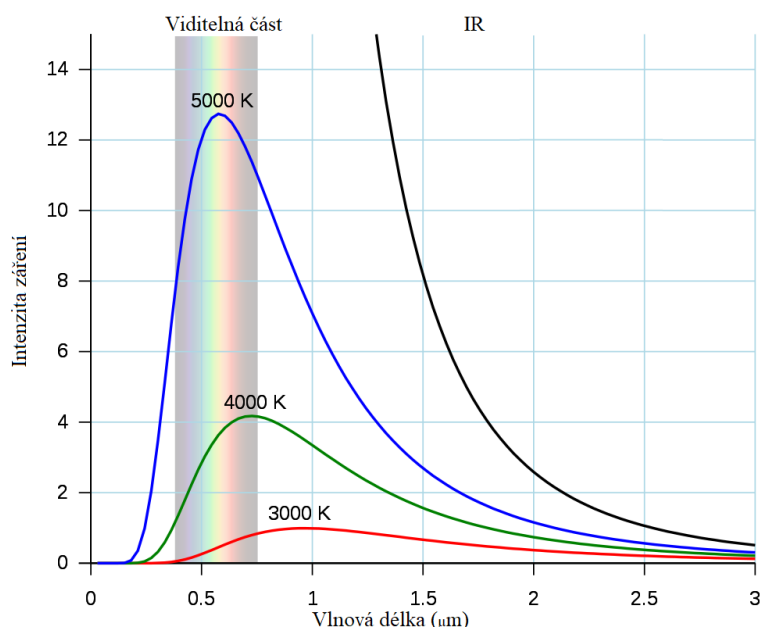


Obr. 1.3: Relativní citlivost oka k elektromagnetickým vlnám různých vlnových délek

Elektromagnetické vlnění si představíme na jednoduchém příkladu s žárovkou. Příčinou záření vlákna žárovky je děj, při němž atomy vlákna žárovky získávají vlivem tepelného pohybu vyšší energii, a tu pak vyzařují v podobě energie elektromagnetického vlnění. Takto vzniklé záření je označováno jako tepelné záření, vlastní děj se nazývá inkandescence. Tepelné záření je vyzařováno všemi zahřátými tělesy, přičemž vyzařované vlnové délky a intenzita vyzařování tepelného záření jsou závislé na teplotě tělesa dle Planckova vyzařovacího zákona (1.3),

$$dI = \frac{h}{\pi^2 c^2} \frac{\omega^3}{e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1} d\omega \quad (1.3)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost,  $I$  je intenzita záření,  $T$  je teplota záření,  $h$  je redukovaná Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $k$  je Boltzmannova konstanta [2].



Obr. 1.4: Planckův vyzařovací zákon

Z Obr.1.4 je patrné, že při rostoucí teplotě tělesa jsou více emitovány kratší vlnové délky. Současně s teplotou tělesa roste také celková intenzita vyzařovaného záření, konkrétně se čtvrtou mocninou teploty dle Stefanova Boltzmanova zákona. Ten je možné z Planckova zákona v principu získat integrací. Pro tělesa zahřátá na řádově tisíce kelvinů spadá určitá nezanedbatelná část vyzařovaných vlnových délek do viditelné části spektra. Při teplotě 870 K se těleso jeví jako červené, při zvyšování teploty na 1600 K lze vidět barvu bílou. Bílá barva je způsobena tím, že v záření jsou zastoupeny všechny vlnové délky viditelné části ve správném poměru. Jakmile bude teplota dále zvětšována, bude se barva tělesa jevit jak modrobílá, to je způsobeno právě porušením poměru vlnových délek [6].

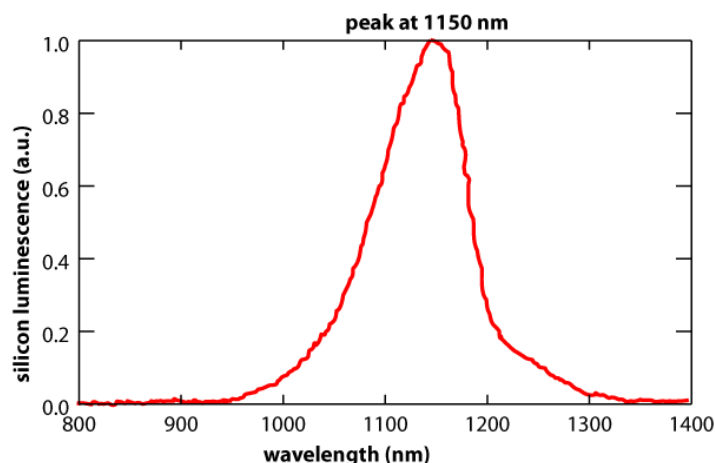
## 1.1.2 Luminiscence

Luminiscence je vyzařování fotonů pevnými nebo kapalnými látkami. Podstatou je přechod elektronů z vyšších energetických hladin na nižší hladiny. Při takovém přechodu elektron může odevzdat svoji energii vyzářením kvanta viditelného záření-fotonu.

Luminiscence se dělí podle toho, jakým způsobem materiál excitujeme (fotoluminiscence, elektroluminiscence, katodoluminiscence, aj.). Například pro fotoluminiscenci, tedy opticky excitovaná luminiscence, může vyzařování určitou dobu doznívat, tedy trvá i po skončení budícího účinku. Rozlišujeme fosforescenci a fluorescenci. Látky, u kterých se tento jev projevuje, se nazývají luminofory. Jsou to převážně pevné látky patřící mezi polovodiče nebo izolanty. Nejpoužívanějšími luminofory jsou sulfid zinečnatý a kademnatý, v nichž jsou příměsi atomy Ag, Au, Cu atd. a alkalické halogenidy (NaCl, KCl, NaJ) s příměsí atomů Ag, Ca aj. Tyto příměsi vytvářejí luminiscenční centra, kde dochází k emisi luminiscenčního záření [3].

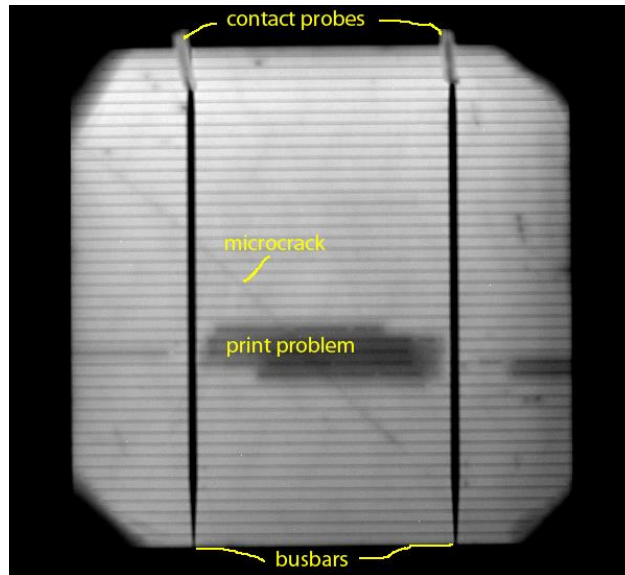
Z hlediska této práce je důležitá především elektroluminiscence. Ta může v rámci polovodičů nastávat v propustném směru (injekční elektroluminiscence), ale také lokalizovaně v závěrném směru v rámci lavinového či tunelového průrazu. Spektra vyzařovaná v rámci jednotlivých procesů se pak liší a může být účelné tato spektra pro účely charakterizace případných defektů měřit, což je nepřímý cíl této práce.

V propustném směru je u elektroluminiscence ještě nutné rozlišovat mezi přímým a nepřímým polovodičem, kdy nejrozšířenější materiál solárních článků je křemík. Ten je nepřímým polovodičem a pro vyzáření fotonu musí být splněn i zákon zachování hybnosti, a proto není považován za efektivní materiál pro vyzařování. Nicméně pro účely nedestruktivní diagnostiky je jeho vyzařování zkoumáno v infračervené oblasti, kde se vzhledem k šířce zakázaného pásu nachází jeho emisní špička na 1150 nm viz. Obr. 1.5 [26].



Obr. 1.5: Spektrum elektroluminiscence křemíkového přechodu

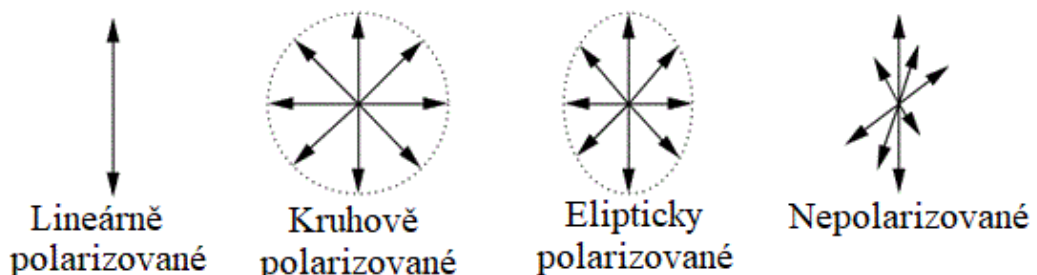
Pro diagnostiku se využívají infračervené kamery, které umí při elektrické excitaci vzorku solárního článku odhalit různé defekty, ty jsou zobrazeny na Obr. 1.6 [26]. Bylo by ovšem užitečné znát v dané oblasti také vyzařované spektrum, které může nést informaci o nehomogenitách vzorku. Systém realizovaný v rámci této práce tohoto bude schopen.



Obr. 1.6: Elektroluminiscenční obraz monokrystalického solárního článku obsahující defekty

### 1.1.3 Polarizace světla

V roce 1808 Étienne–Louis Malus pozoroval světlo zapadajícího Slunce, které se odráželo v oknech paláce a zjistil, že světlo má stejné vlastnosti jako by procházelo vápencovým krystalem. Malus následně zavedl pojem polarizace. Roku 1821 na základě interference polarizovaných paprsků prohlásil Fresnel světlo za vlnění příčné [7].



Obr. 1.7: Polarizace světla

Jednotlivé šipky naznačují směr, ve kterém kmitá vektor elektrické intenzity v čase a prostoru viz. Obr. 1.7. Jestliže složky elektromagnetického vlnění v základních osách mají stálý směr a velikost, je toto vlnění označeno jako polarizované vlnění. V obvyklých

zdrojích světla, např. žárovka, plamen nebo Slunce kmitá vektor elektrické intenzity neuspořádaně.

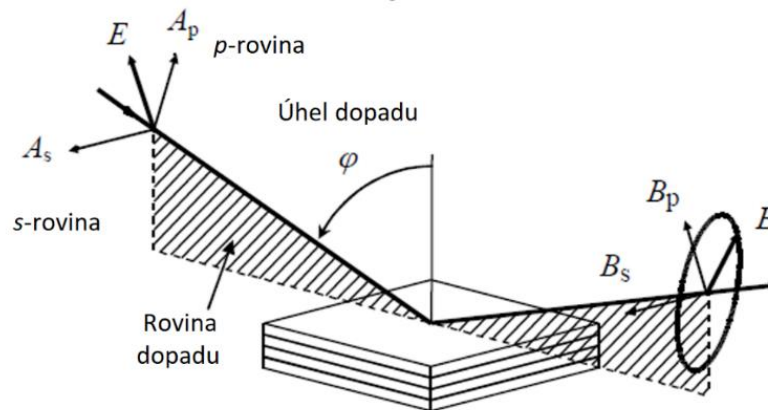
Oko nerozeznává polarizované světlo od přirozeného. Aby bylo možné rozlišit polarizované světlo nebo abychom zjistili orientaci roviny v níž leží polarizovaná světelná vlna, musíme mít další zařízení – analyzátor (polarizační filtr). Analyzátor propouští polarizované světlo jen s určitou orientací kmitové roviny [7]. Přestože v rámci některých nedestruktivních charakterizačních technikách má polarizace význam, problematiky této práce se dotýká spíše okrajově a nebude tedy blíže popsána.

### 1.1.4 Odraz a lom světla

Při odrazu světla dopadá světelný paprsek na rozhraní dvou optických prostředí pod úhlem dopadu  $\varphi$ , který paprsek svírá s kolmicí dopadu vztyčenou v místě dopadu na rozhraní optických prostředí. Dopadající paprsek a kolmice dopadu tvoří rovinu dopadu. Odražený paprsek svírá s kolmicí dopadu úhel odrazu shodný s úhlem dopadu viz. Obr.1.8. Frekvence ani polarizace nemá vliv na úhel odrazu. Může se ovšem změnit odražená intenzita či polarizace, jak je popsáno Fresnelovými vzorci pro jednotlivé složky polarizace S a P [4].

$$R_S = \left( \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 = \left[ \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right)^2}}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right)^2}} \right]^2 \quad (1.4)$$

$$R_P = \left( \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \right)^2 = \left[ \frac{n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right)^2} - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right)^2} + n_2 \cos \theta_1} \right]^2 \quad (1.5)$$



Obr. 1.8: Odraz vlny od rozhraní

Indexem lomu je vyjádřen poměr rychlosti světla ve vakuu, který je značen  $c_0$ , k rychlosti světla v prostředí  $c$ . Je značen malým písmenem  $n$  a je definován vztahem:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (1.6)$$

Ačkoli je index lomu považován za konstantu, mění se pro jednotlivé vlnové délky. Index lomu je dán materiálovými konstantami (permitivita a permeabilita) a pro ztrátové materiály je obecně komplexní. Přírozeně se pak nejedná o konstantu v pravém slova smyslu, protože je závislá na frekvenci.

Snellův zákon neboli zákon o lomu světla, popisuje šíření vlnění, které přechází přes rozhraní z jednoho prostředí do jiného s rozdílným indexem lomu (např. voda-vzduch). Připomeňme, že nastávají dva druhy lomů. Lom ke kolmici nastane v případě, že se paprsek šíří z opticky řidšího prostředí do prostředí hustšího. Lom od kolmice nastává v obráceném případě [5]. Obdobně jako pro odraz existují Fresnelovy vzorce také pro průchod.

### 1.1.5 Vnější fotoelektrický jev

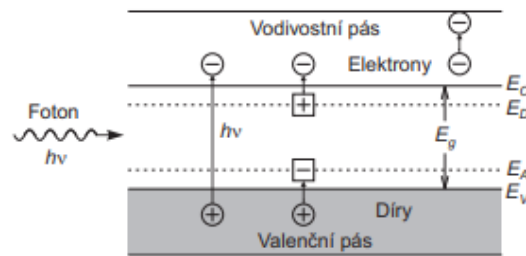
Za objasnění fotoelektrického jevu získal Einstein Nobelovu cenu v roce 1921. Z jeho popisu je zřejmé, že fotony dopadající na kovový materiál, mohou předat svoji energii elektronům. Pokud je předávaná energie větší než výstupní práce elektronu z kovu, mohou elektrony opustit materiál a rozdíl energie jim zůstává ve formě kinetické energie. Nejnižší výstupní práce elektronu z kovu je asi 2 eV, což odpovídá ve vzduchu vlnové délce řádově 620 nm, proto je možné tyto detektory používat pouze pro viditelnou a ultrafialovou oblast. V případě polovodičů jsou elektrony uvolňovány ze zaplněného valenčního pásu a tyto polovodičové detektory jsou schopné pracovat i v infračervené oblasti. Vnější fotoelektrický jev se používá např. ve fotonkách, fotonásobičích a v mikrovlnných detektorech [8].

### 1.1.6 Vnitřní fotoelektrický jev

Dopadající záření, které nemá dostatečnou energii na uvolnění elektronů z povrchu polovodiče, může způsobovat vnitřní elektronové přechody, při kterých se fotoexcitací uvolňují elektrony, které zůstávají uvnitř látky. Tyto přechody se projevují zvýšením vodivosti – vzniká tzv. fotovodivost. Elektronové přechody lze rozdělit do tří skupin.

- vlastní – dojde k excitaci elektronů z valenčního pásu do vodivostního.
- příměsové – excitace elektronů z valenčního pásu na akceptorovou hladinu nebo excitace z donorové hladiny do vodivostního pásu.

- o založené na interakci s volnými nosiči – excitace elektronů mezi hladinami ve vodivostním pásu.



Obr. 1.9: Vnitřní fotoelektrický jev

Detektory, které využívají vnitřní mezipásové přechody, mohou pracovat daleko do infračervené oblasti. U vlnových délek, které jsou větší než  $2 \mu\text{m}$ , je potřeba detektory chladit, aby se zabránilo termální ionizaci příměsí. Nevýhodou příměsových detektorů je velký temný proud při pokojové teplotě a nízká absorpce v příměsové oblasti. Proto je dobré, aby detektor pracoval při velmi nízkých teplotách ( $4\text{--}30 \text{ K}$ ). Ionizované hladiny mají také velký účinný průřez pro opětovné zachycení nosičů. Zvyšováním koncentrace těchto hladin klesá doba života nosičů, a tím i citlivost detektoru [8].

## 1.2 Polovodiče

Polovodiče lze rozdělit na vlastní a nevlastní. Polovodičem vlastním rozumíme polovodič, který má při teplotě  $0 \text{ K}$  prázdný vodivostní pás čili vodivost je u nich způsobena pouze elektrony a děrami vzniklých na základě ionizace. Nevlastní polovodiče mají ve své struktuře zabudované tzv. poruchy, jedná se o atomy cizích prvků. V přírodě se tyto poruchy vyskytují přirozeně. Účelně jsou zaváděny do umělých krystalů. I velmi malý podíl příměsí zvyšuje vodivost [23].

### 1.2.1 Polovodičové přechody

Ve struktuře polovodičových součástek lze najít několik rozhraní mezi jednotlivými materiály. Z hlediska činnosti a vlastností jsou nejvýznamnější polovodičové přechody. Jedná se o rozhraní mezi různě dotovanými polovodiči, různými druhy polovodičů nebo polovodičem a jiným materiálem.

Homogenními přechody je myšlen přechod mezi materiály, které mají stejnou krystalickou strukturu a odlišnou dotaci příměsí. Do těchto přechodů patří přechod typu  $pn$ ,  $np$ ,  $n^+n$ ,  $p^+p$ ,  $pi$ ,  $ni$  a kombinace  $pin$ .

Heterogenní přechody se vyskytují při přechodu mezi dvěma nestejnorodými materiály s různou krystalovou strukturou (např. GaAs, GaP atd.). Dále sem patří přechody kov-polovodič a kov-izolant-polovodič [23].

## 1.2.2 PN přechod

Jako  $pn$  přechod se označuje místo dotyku 2 polovodičů, jeden s vodivostí typu  $p$  a druhý s vodivostí typu  $n$ . Ty lze rozdělit na souměrné, kde jsou koncentrace příměsí na obou stranách stejné a nesouměrné tam, kde na jedné straně jsou koncentrace příměsí rozdílné. Přechod  $pn$  realizuje diodu, takže propouští elektrický proud pouze jedním směrem.

Přechod  $pn$  je v rovnovážném stavu tehdy, když je nastolena rovnováha mezi driftovými a difúzními silami. Na kontaktu mezi oběma typy polovodiče se vytvoří vyprázdněná tzv. depletiční oblast. Po vytvoření přechodu totiž začnou elektrony ze strany  $n$  difundovat ke straně  $p$ , přičemž za sebou zanechávají oblast kladného prostorového náboje a naopak díry ze strany  $p$  difundují ke straně  $n$ , přičemž za sebou zanechávají oblast záporného prostorového náboje. Driftové síly působící vlivem vytvoření prostorového náboje působí proti difúznímu pohybu. Jakmile se tyto síly vyrovnají je přechod  $pn$  v rovnovážném stavu.

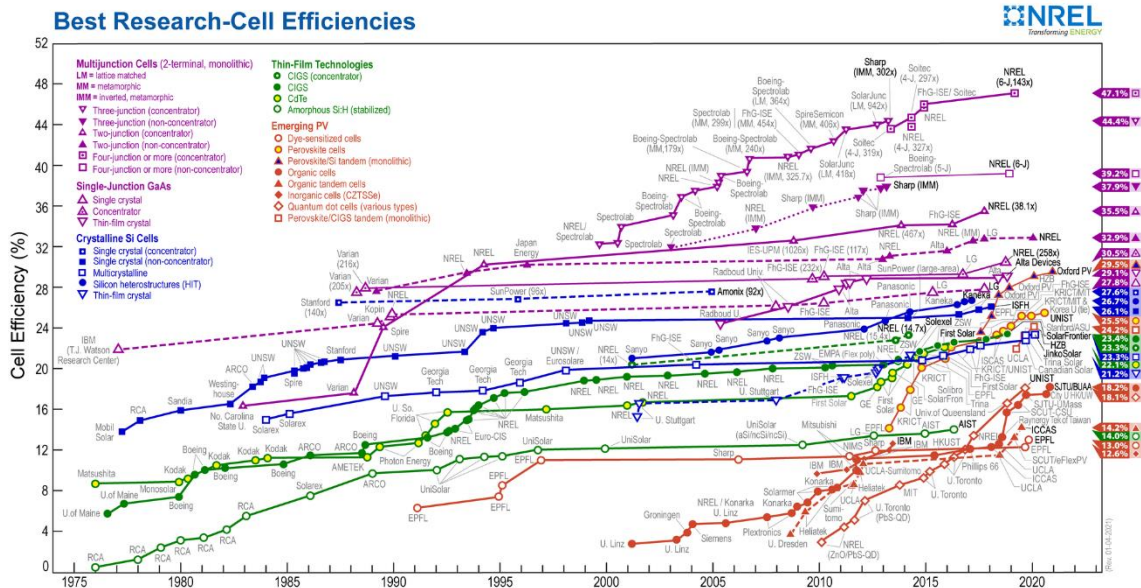
Vyprázdněná oblast se vytváří na přechodu  $pn$ , kde spolu rekombinují nosiče náboje. Tato oblast je více rozšířena do méně dotovaného polovodiče. Jakmile je přiloženo napětí v závěrném směru, tato oblast se zvětšuje. Naopak při přiložení napětí v propustném směru, je tato oblast zmenšována. Bariérová kapacita je vytvořena oblastmi prostorového náboje v depletiční vrstvě. Projevuje se více při závěrném směru. Depletiční oblast z pohledu bariérové kapacity si můžeme představit jako dielektrikum deskového kondenzátoru. Difúzní kapacita je tvořena akumulací náboje v důsledku průchodu proudu. Tato kapacita se více projevuje v propustném směru.  $pn$  přechod je v propustném směru, pokud na  $p$  oblast přiložíme kladné napětí a na  $n$  oblast záporné napětí. V případě závěrného směru je to obráceně. Pokud je připojeno propustné napětí, je hlavní složkou proudu difúzní proud, pásy jsou k sobě přiblíženy a tím umožní průchod většímu počtu majoritních nosičů. U závěrně pólovaného  $pn$  přechodu naopak převládá driftová složka proudu, která není závislá na přiloženém napětí, protože se pásy od sebe navzájem vzdalují a majoritní nosiče tedy nemohou procházet.

Průrazy přechodu  $pn$  lze rozdělit na tunelový, lavinový a tepelný. Tunelový jev nastává, pokud je přechod  $pn$  dostatečně tenký, tedy co nejtenčí depletiční oblast, na jedné straně je dostatek elektronů k tunelování a na druhé straně je dostatek volných stavů. Tunelový jev nastane do určitého maximálního přiloženého napětí (Si 6,7 V a Ge 4,2 V). Lavinový průraz je možné pozorovat u přechodů, které mají depletiční oblast mnohem větší než je střední volná dráha elektronu. Při přiložení dostatečně velkého napětí, předáme elektronům velkou kinetickou energii, která způsobí nárazovou ionizaci. Lavinový jev nastává snadněji s rostoucí teplotou a s rostoucím napětím. Minimální hodnota napětí, které je nutné přivést na elektrody pro spuštění lavinového efektu je 4,5V pro Si a 2,8V pro Ge. Hodnota může být ale ovlivněna také morfologií (texturací povrchu článku) přechodu. Tepelný průraz je destruktivní a je způsoben kladnou zpětnou vazbou

proudu a tepla vzniklého průchodem proudu [23]. Všechny tyto průrazy mohou být doprovázeny světelnou emisí. Toho se využívá při optické inspekci v závěrném směru. Spektrum emise pak umožňuje lépe určit podstatu případného defektu či nehomogenity.

### 1.2.3 Solární články

Solární články lze rozdělit do několika generací na základě různých technologií. Mezi nejrozšířenější články patří články na bázi křemíku. Mohou být monokrystalické, polykrystalické nebo amorfní. Monokrystalické křemíkové nekoncentrované články mohou dosahovat dle dostupných informací účinnost až 26 %. Největší účinnost byla zaznamenána u více přechodového článku InGaP/GaAs/InGaAs a to více než 47 %. Časová osa výzkumu účinnosti solárních článků je zobrazena na Obr. 1.10 [27]. Jedná se o laboratorní hodnoty, tudíž lze očekávat nižší účinnost u komerčních výrobců. Vícevrstvé solární články s několika přechody jsou schopné dosáhnout větší účinnosti.



Obr. 1.10: Časová vývoj nejvyšší dosažené účinnosti solárních článků různých materiálů a technologií

Každý z jednotlivých článků je citlivý na jiné pásmo vlnových délek, které je dáno šířkou zakázaného pásu. Konstruovány jsou tak, že na vrchní straně je článek, který má největší šířku zakázaného pásu a je citlivý na krátké vlnové délky. Tento článek není schopen absorbovat fotony, které mají nižší energii než je jeho šířka zakázaného pásu, a tím pádem záření o větších vlnových délkách článkem projdou. Záření, které prošlo vrchním článkem, je dále zpracováno články v nižších vrstvách. Vzhledem k vysoké ceně monokrystalických tandemových článků jsou využívány sluneční koncentrátoři, díky kterým je možné zvýšit intenzitu dopadajícího záření na článek. Koncentrátoři s antireflexní vrstvou a povrchovou texturou, která zvyšuje absorpci a případným zadním reflektorem, jsou společným optickým přístupem k optimalizaci solárních článků. V téhle

části najde uplatnění laserová technologie, pomocí které jsme schopni dotovat polovodič, odprašovat nebo i řezat. Přední metalizace článku zmenšuje efektivní plochu, která je možná použít k přeměně světla. Zapuštěným kontaktem jsme schopni snížit plochu a nezhoršit přitom sériový odpor, ale tato technologie je náročná z finanční stránky [22].

### 1.3 Světlem indukovaný proud

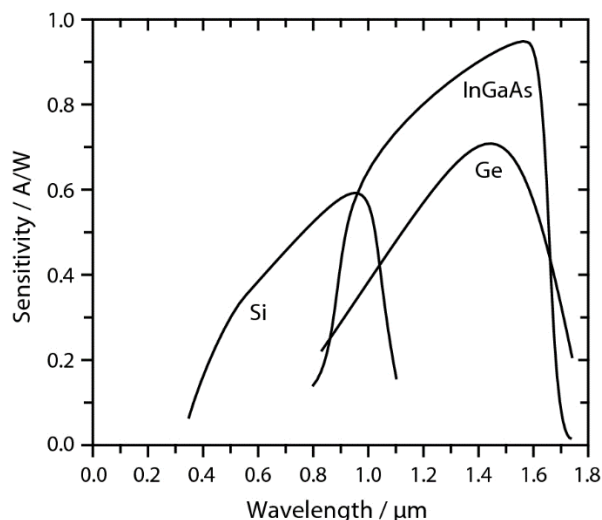
Kromě diagnostiky solárních článků s využitím elektroluminiscence, se využívá také laserem indukovaný proud LBIC. Na rozdíl od elektroluminiscence je LBIC blíže podmínkám, ve kterých články pracují a do výsledné odezvy je tak zahrnuta také účinnost zachycení světla. Technika funguje na principu snímání proudové odezvy součástek na skenující světelný paprsek. Světelná kvanta záření dopadající na zkoumané vzorky mohou být absorbovány a následně generovat volné nosiče [22]. Tato metoda se používá ke studiu aktivních oblastí v polovodičích, ve kterých se často vyskytují různé vady, které ovlivňují jejich funkci. Na zkoumaný vzorek je fokusován excitační paprsek a s použitím transimpedančního zesilovače se měří jeho odezva. Je možné využít různé vlnové délky excitačního svazku a také různé intenzity. Jakmile je měření ukončeno, je možné sestavit proudovou mapu, pomocí které jsme schopni porovnat jednotlivé části měřeného vzorku. Pomocí této mapy lze následně odhalit defekty a nehomogenity povrchu. Rozlišení systému závisí na zvoleném kroku mezi jednotlivými body, velikosti generujícího zdroje a průměru sondy. Čím menší je krok, tím větší bude prostorové rozlišení, v tomto případě je nevýhodná dlouhá doba snímání [24] [25].

### 1.4 Řádkové spektrometry

#### 1.4.1 Popis spektrometru

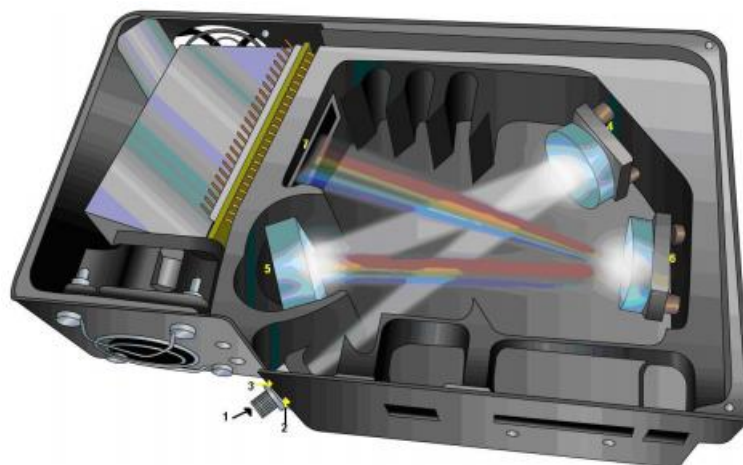
Základním prvkem řádkových spektrometrů je snímač CCD (charged-coupled device), který roku 1969 vyvinuli George Smith a Williard Boyle. Původně nebyl určen pro spektrometry ani digitální fotoaparáty, ale byl zamýšlen jako paměť. V roce 1975 byl vyroben první fotoaparát který používal CCD čip [9].

Z hlediska frekvenčního rozsahu spektrometru je důležitým parametrem především materiál detektoru. Ve spektrometrech se nejčastěji používají polovodičové materiály typu Si a InGaAs. Maximální vlnová délka pro tyto polovodiče je dána šířkou zakázaného pásu, tedy pro křemík je maximální vlnová délka v řádu 1100 nm. Pro aplikace v infračervené oblasti je potřeba použít jiný materiál viz. Obr. 1.11 [28].



Obr. 1.11: Materiály detektorů a jejich spektrální citlivost

Technologie CCD umožňuje konstrukci detektorů s malou velikostí pixelů (~5 μm), protože odstraňuje požadavek přímých odečtových obvodů z jednotlivých pixelů. Na druhou stranu velikost pixelu má přímou souvislost s šumem. CCD je ideální pro malé spektrometry, protože jej lze navrhnout poměrně levně. CCD má dvě nevýhody. Struktura brány umístěná na přední straně CCD může způsobit rozptyl dopadajícího světla, což znamená že nebude absorbováno. Druhá nevýhoda je, že CCD vyžaduje relativně velký substrát P-Si, aby byla usnadněna výroba s nízkými náklady, ale zároveň omezuje účinnost detektoru při nižších vlnových délkách. Dokážou tedy naakumulovat dostatek světla i z poměrně slabých světelných zdrojů [10][11].



Obr. 1.12: Uspořádání spektrometru

CCD detektory se oproti jiným světelným detektorům vyznačují linearitou, tedy lineární závislostí mezi zářivým tokem a výstupní hodnotou převodníku. A/D převodník určuje maximální velikost optické intenzity dopadajícího světla, aniž by docházelo

k saturaci. Při překročení saturačního signálu je převodník přesycen a dává na výstupu stále konstantní počet impulzů bez ohledu na intenzitu [11].

Nevýhodou CCD technologie je, že elektrony vznikají v pixelech nejen v důsledku dopadajícího světla, ale i náhodně v závislosti na okolní teplotě, velikosti pixelu, architektuře čipu a výrobní technologii. Tento tepelně generovaný náboj bývá označen jako temný proud nebo teplený šum (generuje signál, i když je čip ve tmě). Temný proud bývá obvykle vyjádřen v elektronech za sekundu na pixel při definované teplotě. Pozitivum na temném proudu je, že za daných podmínek bývá stejný nebo velmi podobný. Pokud se provede expozice ještě jednou s uzavřenou závěrkou, dostaneme obraz, který bude obsahovat pouze signál s generovaným temným proudem, takový snímek je označován jako temný snímek. Odečtením snímků lze vyrušit obraz generovaný temným proudem [11].

Fotonový šum je výsledkem inherentní statistické změny v rychlosti příchodu fotonů dopadajících na CCD. Fotoelektrony generované v polovodičovém zařízení tvoří signál, jehož velikost náhodně kolísá s dopadem fotonu v každém měřicím místě (pixelu) na CCD. Interval mezi příchody fotonů se řídí Poissonovou statistikou, a proto je šum fotonu ekvivalentní druhé odmocnině signálu. Obecně se termín hluk výstřelu aplikuje na jakoukoli složku šumu, která odráží podobnou statistickou odchylku nebo nejistotu při měření počtu fotonů shromážděných během daného časového intervalu [13].

Čtecí šum je kombinací systémových šumových složek, které vznikají při převodu nosných nábojů CCD na napěťový signál pro kvantifikaci a následné zpracování analogově/digitální konverze. Hlavní příspěvek ke čtení šumu obvykle pochází z předzesilovače na čipu a tento šum je přidáván ke každému jednotlivému pixelu. Některé typy šumu ve výstupním zesilovači CCD jsou frekvenčně závislé. Požadovaná rychlost čtení nebo snímková frekvence částečně určuje specifikaci čtecího šumu a její praktický účinek na celkový signál od hluku. Vysoce výkonné kamerové systémy využívají vylepšení designu, která snižují význam čtecího šumu [13].

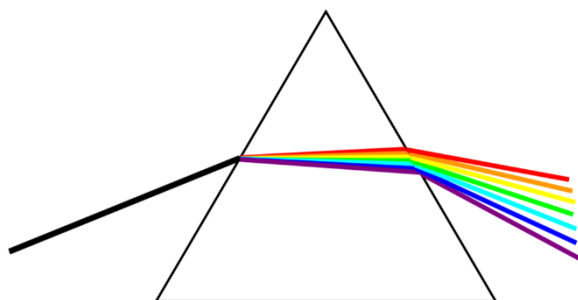
## **1.4.2 Disperzní prvky**

K pozorování elektromagnetického záření je nutné, aby bylo analyzované záření nějakým způsobem rozloženo dle obsažených vlnových délek. K tomuto účelu slouží disperzní prvky, které elektromagnetické záření rozloží na jednotlivé složky, respektive různé složky rozptyluje do různých směrů. Rozlišovací schopnost spektrometru pak určuje, jak od sebe rozlišit co nejbližší vlnové délky. V rámci malých řádkových CCD spektrometrů se používají difrakční mřížky, u větších zařízení je možné využít hranol.

### **1.4.2.1 Optický hranol**

Optický hranol byl používán jako disperzní prvek v prvních spektrometrech a využívá závislosti indexu lomu na vlnové délce. Znázornění tohoto jevu je zobrazeno na Obr.

1.13. Chromatická disperze probíhá na prvním rozhraní a zesiluje se na druhém. Úhel lomu je závislý na vlnové délce světla a tím se barvy lámou různě.



Obr. 1.13: Rozklad světla optickým hranolem

Rozlišovací schopnost  $RP$  (Resolving Power) optického hranolu je dána vztahem

$$RP = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = b \frac{dn}{d\lambda} \quad (1.6)$$

Kde  $b$  je šířka podstavy hranolu,  $dn/d\lambda$  je disperze materiálu a  $\Delta\lambda$  rozdíl vlnových délek. Ze vztahu je patrné že, rozlišovací schopnost je závislá na změně indexu lomu použitého materiálu a šířce hranolu [14].

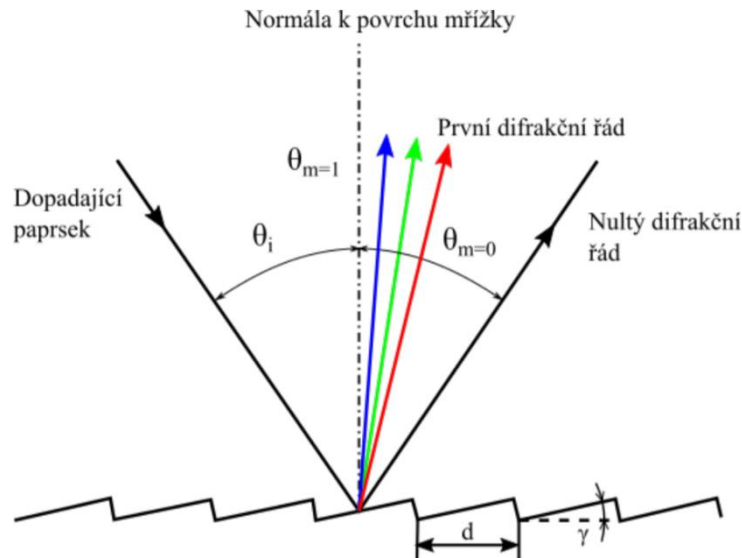
#### 1.4.2.2 Difrakční mřížka

Difrakční mřížka je optický prvek, který rozptýlí polychromatické světlo na jednotlivé vlnové délky. Polychromatické světlo dopadající na mřížku je rozptýleno, takže každá vlnová délka se od mřížky odráží v mírně odlišném úhlu. Disperze vzniká rozdělením vlnoplochy a interferenci dopadajícího záření z periodické struktury mřížky.

Rozptýlené světlo je poté zobrazeno spektrografem a požadovaný rozsah vlnových délek je směřován do detekčního systému. Mřížky se skládají ze stejně rozmístěných rovnoběžných štěrbin, vytvořených na reflexním povlaku a uložených na podkladu. Tvar štěrbin umožňuje potlačit nežádoucí řády difrakce, protože většinou požadujeme, aby maximum energie bylo směřováno pouze do jedno difrakčního řádu [15]. Rozptyl mřížky je popsán rovnicí

$$m\lambda = d(\sin\theta_i + \sin\theta_m) \quad (1.7)$$

kde  $m$  je pořadí difrakčního řádu,  $\lambda$  je difrakční vlnová délka,  $d$  je vzdálenost mezi vrypů,  $\theta_i$  je úhel dopadu měřený od normály a  $\theta_m$  je úhel odrazu. Rozptyl a účinnost mřížky závisí na vzdálenosti mezi sousedními štěrbinami a úhlem vrypů [15].



Obr. 1.14: rozklad světla na difrakční mřížce

### 1.4.3 Kalibrace

Přesnost kalibrace spektrometru má zásadní význam pro mnoho technik optické charakterizace, jako je Ramanova spektroskopie a interferometrie. U malých spektrálních rozsahů, kde je k dispozici pouze malý počet kalibračních čar, se však kalibrace stává nepřesnou. Z principu rozlišujeme kalibraci frekvenční a absolutní. V rámci frekvenční kalibrace využíváme zdroj záření se známými emisními špičkami. Kalibrovaným spektrometrem se měří pozice pixelových indexů kalibračních čar. Oblasti širokých vlnových délek bez vrcholů vedou k omezené přesnosti kalibrace. Konvenční metoda může ovšem být méně spolehlivá zejména pro malé spektrometry, které vykazují nelineární disperzi světla.

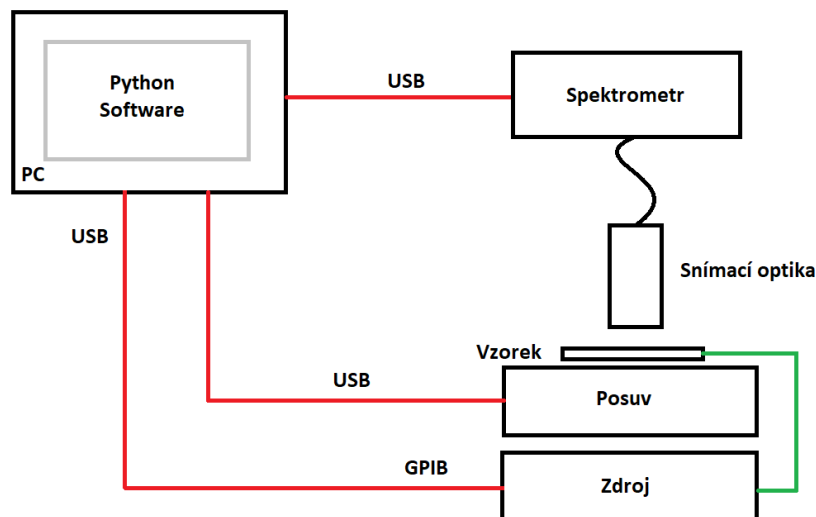
Kromě frekvenční kalibrace spektrometrů může být pro některé účely důležitá také absolutní kalibrace. V rámci spektrometrů použitých v této práci nebude kladen důraz na absolutní hodnotu veličiny, proto se omezíme pouze na kvantitativní porovnání v rámci konkrétních vlnových délek. Pokud by bylo nezbytné alespoň částečně zpřesnit výsledky v rámci celého spektra, jsou k dispozici grafy přenosové funkce vlákna a spektrální citlivosti spektrometru (včetně difrakční mřížky), které umožní provést korekci měřeného spektra a jeho přepočítání na vstup kolimátoru.

## 2. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část práce se zabývá návrhem měřicího systému pro měření lokálně vyzařovaných infračervených spekter. Součástí experimentální části je i návrh kolimační části, která je důležitá pro optimální citlivost systému a spolu s posuvem stanovuje i rozlišovací schopnost systému v příčném směru. Cílem této části je především programování v moderním programovacím jazyce Python, komunikace s dvouosým posuvem vzorku, zdrojem na sběrnici GPIB a spektrometrem připojeným skrze USB. Následuje řešení problematiky plánování trajektorie posuvného systému a zobrazení měřených dat.

### 2.1 Blokové schéma

Blokové schéma měřicího systému lze vidět na Obr.2.1.

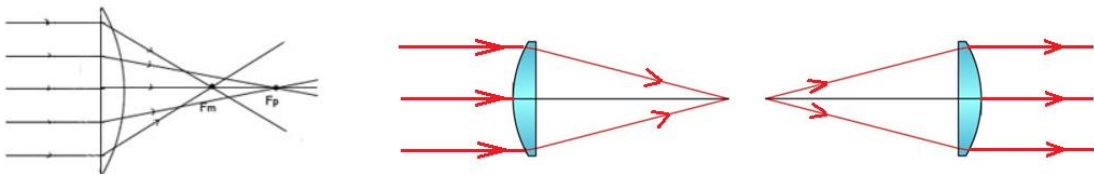


Obr. 2.1: Blokové schéma měřicího systému

Celý systém je řízen z programu běžícího na standardním PC. Ten posílá příkazy dvouosému posuvnému zařízení k provedení naplánované trajektorie skrze sériové rozhraní. Zkoumaný vzorek v elektrodovému systému je elektricky excitován zdrojem připojeným skrze sběrnici GPIB. Vlastní vzorek, respektive elektrodový systém, je umístěn na dvouosém posuvném zařízení, skenujeme tedy vzorkem. Spektrometr, který slouží k sejmutí spektra emitovaného vzorkem, je taktéž ovládán pomocí softwaru. Respektive skrze SDK spektrometru s využitím funkcí popsanych v manuálu spektrometru. Světlo emitované vzorkem je ke spektrometru vedeno s využitím multimodového optického vlákna s průměrem jádra 400  $\mu\text{m}$ . Optické vlákno je na druhé straně připojeno ke snímací optice, která je realizuje kolimátor.

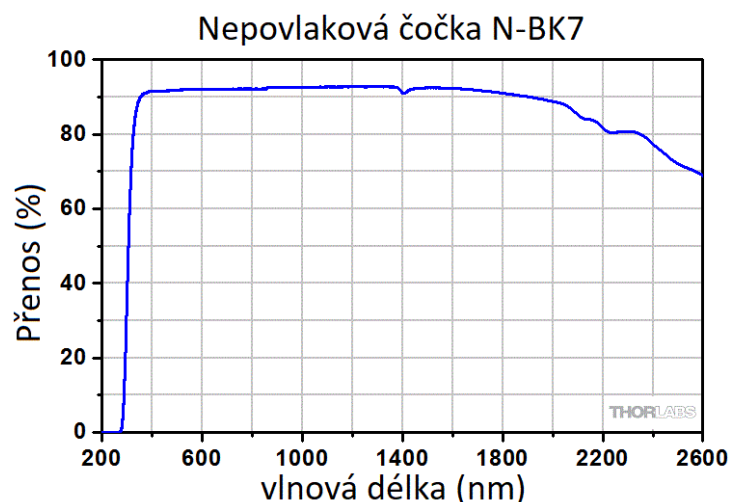
## 2.2 Návrh kolimační části

Kolimátorem se rozumí jednoduché optické zařízení, které je schopné z rozbíhavého svazku vytvořit rovnoběžný svazek. Při návrhu kolimátoru bylo v prvním kroku nutné zvolit reálné parametry optiky a její celkové uspořádání. Z hlediska optických parametrů nebyly kladeny žádné vysoké požadavky, takže vyhoví základní plano-convex (ploskovypuklá) čočka s kratším ohniskem Obr.2.2. Plano-konvexní čočky mohou zaostřit kolimovaný paprsek nebo kolimovat světlo z bodového zdroje. Aby se minimalizovala sférická aberace, měl by kolimovaný zdroj světla při zaostřování dopadat na zakřivený povrch čočky a bodový zdroj světla by měl při kolimaci dopadat na rovinný povrch. Je nutné podotknout, že vhodnějším řešením pro širokospektrální aplikace by byla volba achromatického doubletu, který by poskytoval kvalitnější ohnisko a v určitém rozsahu také významně menší ztráty odrazem. Kromě širokého rozsahu vlnových délek se ještě přidává ekonomický požadavek. Použité čočky byly přímo dostupné v laboratoři.



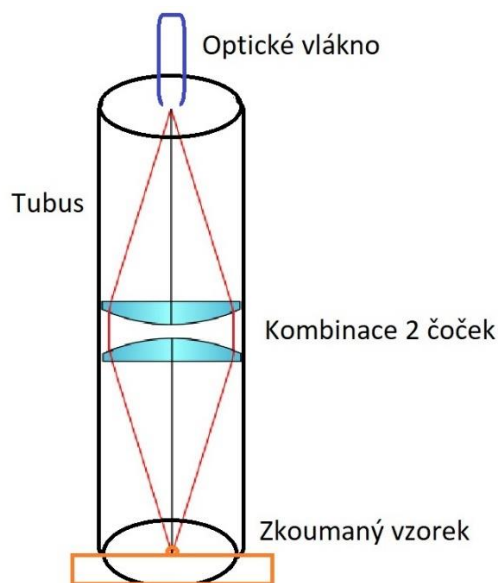
Obr. 2.2: Sférická aberace a paprsky světla dopadající na zakřivenou a rovinnou část plankonvexní čočky

Čočky se obecně vyrábějí s antireflexními povlaky, které umí snížit reflexi v určitém rozsahu vlnových délek. V našem případě hodláme využít nejen celý rozsah spektrometru tj. 900-1700 nm (zde by vyhovělo povlakování čočky-typ C pro rozsah 1050-1700 nm), ale i ponechat případnou možnost pro připojení spektrometru ve viditelné oblasti bez nutnosti upravit optiku. Proto byla vybrána čočka nepovlaková, která má relativně široké a vyrovnané pásmo propustnosti od 300 nm až do 2000 nm viz. Obr.2.3.



Obr. 2.3: Graf propustnosti nepovlakové čočky N-BK7

Aby bylo možné efektivně snímat světlo bodového zdroje na vzorku, je potřeba použít první spojnu čočku s co možná nejkratším ohniskem a největším průměrem. V našem případě byla zvolena palcová čočka s ohniskovou vzdáleností  $f = 25,4$  mm z optického skla N-BK7, konkrétně typ LA1951 od firmy Thorlabs. Čočka je umístěna do tubusu s průměrem 25,4 mm a zajištěna ve správné pozici dvěma vymezovacími kroužky [16].



Obr. 2.4: Uspořádání plankonvexních čoček v tubusu s připevněním optického vlákna

Stejným způsobem bude do tubusu umístěna i druhá spojná čočka, která bude fokusovat užitečný signál do jádra optického vlákna. Čočky budou tedy umístěny v tubusu, do kterého bude přivedeno z jedné strany optické vlákno (jádro v ohnisku jedné čočky) a z druhé strany bude snímat světlo z požadované struktury. Uspořádání optiky je

zobrazeno na Obr.2.4. Systém tedy bude zobrazovat v režimu bod-bod, přičemž parazitní paprsky mimo ohnisko nebudou přeneseny do optického vlákna. Pro jednoduchost montáže bylo zvoleno optické vlákno s relativně velkým průměrem, které bude tolerantní k případným nepřesnostem sestavení. Celý tubus je pak umístěn na posuvném jezdcí, který je možné posouvat po kolejnici a tímto způsobem v případě potřeby zaostřit.

Jak již bylo řečeno u snímací čočky, je důležitá především co nejkratší ohnisková vzdálenost, což zaručí zachycení maxima emitovaného světla. Nicméně u čočky, která slouží k navázání světla do optického vlákna, musí být ohnisková vzdálenost zvolena tak, aby nedocházelo ke ztrátám, pokud by úhel konvergence svazku byl větší, než úhel akceptace vlákna (dáno numerickou aperturou vlákna). Pomocí jednoduchého výpočtu jsem zjistil, že úhel akceptace zvoleného optického vlákna BFL48-400 je  $28,7^\circ$ .

#### **Optické vlákno BFL48-400**

Numerická apertura       $NA = 0,48$  mm

$$\alpha = \arcsin(NA) = \arcsin(0,48) = 28,7^\circ$$

Vzhledem k použitému tubusu i druhá čočka musí být palcová. K dispozici bylo několik přijatelných ohnisek v řadě okolo 25 – 40 mm po 5 mm. Pro naše účely vyhoví i to nejkratší, tedy opět typ LA1951.

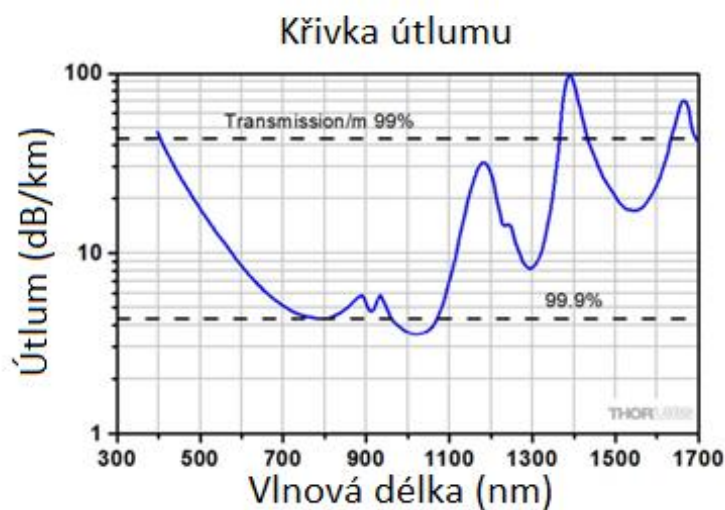
#### **Parametry nepovlakové plankonvexní čočky N-BK7**

Průměr čočky               $d = 25,4$  mm

Ohnisková vzdálenost       $f = 25,3$  mm

$$\alpha = \arctg\left(\frac{d/2}{f}\right) = \arctg\left(\frac{12,7}{25,3}\right) = 26,7^\circ$$

Jelikož je vypočítaný úhel fokusovaného svazku menší než úhel akceptace vlákna, očekává se, že optické vlákno spolu s plankonvexní čočkou bude fungovat s minimálními ztrátami. Na nich se bude podílet přenosová funkce vlákna. Závislost útlumu vlákna na vlnové délce je zobrazena na Obr. 2.5.



Obr. 2.5: Graf útlumu použitého optického vlákna BFL48-400

Při volbě tubusu jsme vycházeli z parametrů čočky. Jelikož byla vybrána čočka o průměru 25,4 mm, byl zvolen tubus o průměru 30 mm. Tubus je od firmy ThorLabs a má označení SM1L30. Délka tubusu je 77 mm. V optické soustavě se nachází 2 tubusy válcového tvaru, a ty jsou spojeny clonou, která má závity po obou stranách. Čočky jsou uchyceny pomocí vymezovacích kroužků. Adaptér pro uchycení optického vlákna byl zvolen se závitem o tloušťce 2 mm a průměrem pro vlákno 3 mm. Nedá se očekávat, že by se clona uplatnila při vlastním měření, kde bude pro zkrácení integrační doby nutné clonu maximálně otevřít. Plánována je především pro účely fokusace, kdy bude místo spektrometru použit zdroj světla, které bude následně fokusováno na vzorek. K omezení zářivého toku koncentrovaného do ohniska slouží právě clona.

### 2.3 Sestavení optického systému

Optický systém byl sestaven ze 2 plankonvexních čoček umístěných v tubusu, kde byla ještě umístěna clona k případnému rozšíření nebo naopak zúžení svazku. Na Obr. 2.6 lze vidět rozebraný kolimační systém, kde vlevo se nachází clonka, uprostřed v tubusu plankonvexní čočka a vedle taktéž plankonvexní čočka v tubusu, kde na druhé straně je vývod pro optické vlákno. Seskupení těchto 3 částí je pomocí šroubovacího závitu.



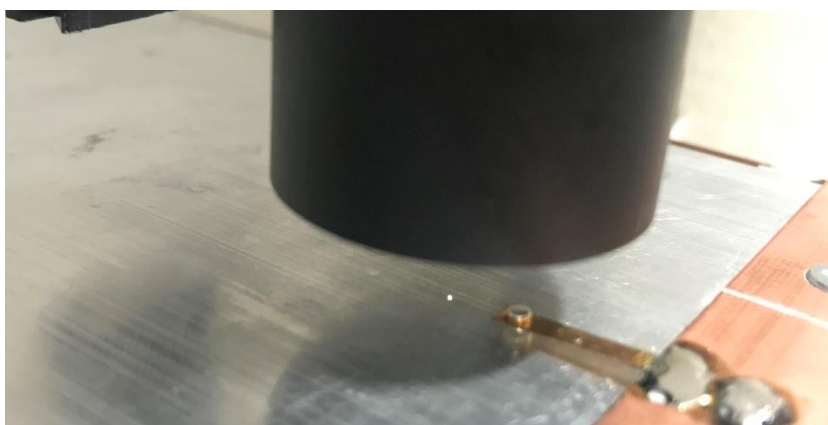
Obr. 2.6: Rozebraný kolimátor



Obr. 2.7: Sestavený kolimátor

K ověření funkčnosti byl použit světelný zdroj AvaLight-HAL-S, který vyzařuje v rozsahu vlnových délek 360-2500 nm.

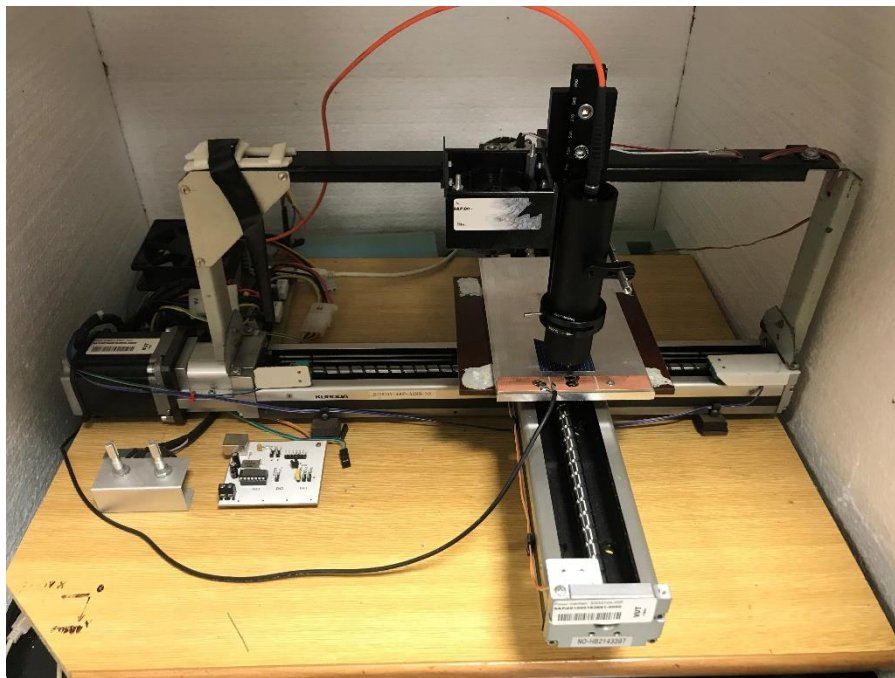
Do světelného zdroje bylo přivedeno námi používané optické vlákno M40I02. Druhá část byla vložena do mnou sestaveného kolimátoru. Pomocí clonky, vhodným umístěním čoček a vzdálenosti optické části od zkoumaného vzorku, jsem byl schopen fokusovat systém do roviny vzorku. Ukázkou fokusace lze vidět na Obr. 2.8. Tento přístup umožňuje jednak, hrubou fokusací optiky, ale nabízí taky možnost budoucího rozšíření pro měření odezvy vzorků na lokální optické buzení LBIC/LBIV.



Obr. 2.8: Zaostření optického systému

## 2.4 Měřicí stanoviště

Na Obr. 2.9 lze vidět pracovní komoru s dvouosovým posuvným zařízením. Komora je uzavíratelná, aby v komoře byly během měření neměnné podmínky. Změna okolního osvětlení či jiné vlivy by totiž mohly ovlivnit výsledky měření.



Obr. 2.9: Měřící pracoviště umístěné uvnitř komory

Po stranách je komora izolovaná pomocí polystyrenu a předpokládá se, že bude časem doplněna o teplotní regulaci atmosféry, případně teplotní stabilizaci vzorku. Na levé straně lze vidět potenciometry, pomocí kterých můžeme manuálně pohybovat se zařízením, je-li tato funkce povolena v softwaru. Na hliníkovou destičku je pomocí černého dvoužilového vodiče přivedeno excitační napětí. Do optického systému je z vrchní části přivedeno optické vlákno. Kabeláž je vyvedena otvorem umístěným v zadní části komory. Spektrometr a zdroj jsou umístěny mimo pracovní komoru. Spektrometr má vlastní zdroj chlazení a není pro jeho umístění v komoře žádný zjevný důvod. Laboratorní zdroj je umístěn mimo komoru, aby bylo možné sledovat nastavené hodnoty, respektive kontrolovat proud vzorkem.

## 2.5 Vývoj software

Řídicí software je vytvořen v programovacím jazyku Python 3.9. Python je interpretovaný objektově orientovaný jazyk na vysoké úrovni s dynamickou sémantikou. Jeho vysoká úroveň integrovaných datových struktur v kombinaci s dynamickým zadáváním a dynamickým vázáním, je velmi atraktivní pro rychlý vývoj aplikací, pro použití skriptovacího jazyku nebo pouze pro propojení už existujících komponentů. Python podporuje moduly a balíčky, což podporuje modularitu programu a opětovné použití kódu. Knihovny bývají dostupné jak ve zdrojové, tak v binární formě pro všechny platformy a lze je volně distribuovat. Byl použit software PyCharm od firmy JetBrains. PyCharm je kompletní sada nástrojů pro produktivitu v programu Python. Je vybaven

inteligentním editorem kódu, který rozumí specifikaci Python. Hlavní výhodou je automatické formátování kódu, doplňování kódu, redaktorování, auto-import atd.

## 2.5.1 Import modulů

Kód pythonu v jednom modulu, získává přístup ke kódu v jiném modulu procesem jeho importu. Tyto moduly obsahují libovolný kód, tudíž nejsou omezeny na pouhé definování řady funkcí. Tzv. inicializace modulu načte a spustí veškeré příkazy, které používaný modul obsahuje. Při inicializaci vznikne objekt, který reprezentuje funkci uvnitř modulu a je možné nastavit globální proměnné modulu do určitého stavu.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pyvisa as visa
import seabreeze
import os
import time
import serial
from tkinter import *
global wavelengths, intensities
from datetime import datetime
from seabreeze.spectrometers import Spectrometer
from Spektroskop.Spektroskop import device
```

Kód 1.1: Importované moduly na začátku kódu

Když budeme chtít do programu importovat modul, který už byl zinicizován, tak nedojde k opětovnému spuštění, ale použije se objekt modulu vytvoření pro inicializaci. V Pythonu bývá zvykem, že se veškeré importované moduly umisťují na začátek skriptu viz. kód 1.1. Všechny tyto moduly byly instalovány pomocí příkazového řádku a příslušným instalačním kódem.

NumPy je základní balíček pro vědecké výpočty v Pythonu. Jedná se o knihovnu Pythonu, která poskytuje objekt vícerozměrného pole, různé odvozené objekty jako např. maskovaná pole a matice. Obsahuje také Fourierovy transformace, lineární algebru, statistické operace, simulace a mnoho dalších. V jádru knihovny se nachází objekt ndarray. Pole NumPy mají při vytváření pevnou velikost, na rozdíl od seznamů Pythonu, ty mohou dynamicky růst. Změnou velikosti ndarray se vytvoří nové pole a původní bude odstraněno. Všechny prvky musí mít stejný datový typ, tudíž budou mít i stejnou velikost v paměti [17]. NumPy usnadňuje pokročilé matematické funkce a jiné operace s velkým množstvím dat. NumPy se používá hlavně proto, že je velmi rychlý k následujícím vlastnostem.

- Vektorizovaný kód je stručnější a čitelnější.

- Méně řádků kódu obecně znamená méně chyb.
- Kód se více podobá standardní matematické notaci.
- Vektorizace vede více k „Pythonovskému“ kódu. Bez vektorizace by byl kód přesycen neefektivními a obtížně čitelnými for smyčkami.

V našem případě pracuje NumPy s obrovským množstvím dat, které získáváme pomocí spektrometru a jsme dále schopni s nimi pracovat. Instalační kód je „pip install numpy“.

Matplotlib je multiplatformní knihovna pro vizualizaci dat a grafické vykreslování pro Python a jeho numerickou příponu NumPy. Skript matplotlibu je strukturován tak, aby bylo ve většině případů k vygenerování grafu vizuálních dat zapotřebí jen několik řádků kódu. Skriptovací vrstva matplotlib překrývá dvě API (Application Programming Interfaces).

- Pyplot je hierarchie objektů kódu Pythonu zakončená matplotlib.pyplot
- OO (Object-Oriented) je kolekce objektů, které lze sestavit s větší flexibilitou než pyplot.

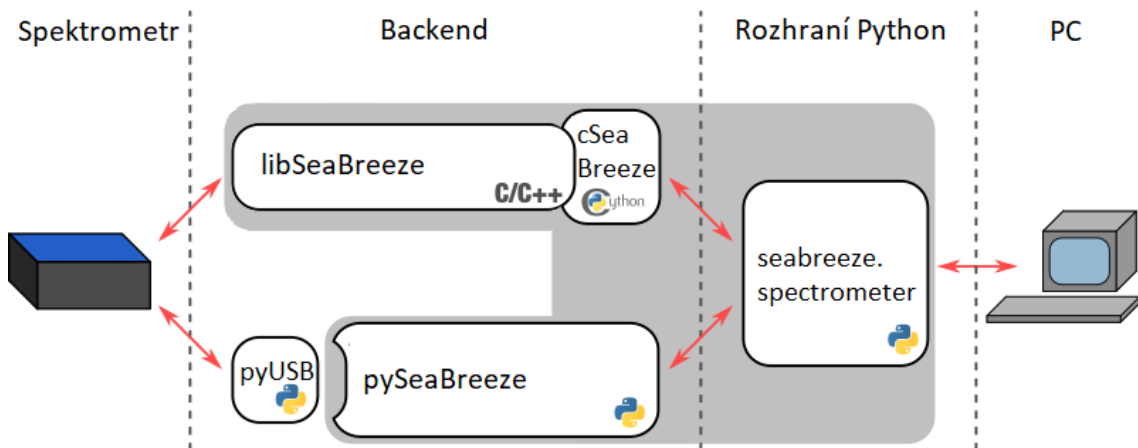
Pyplot API má stavové rozhraní podobné programu MATLAB. Matplotlib byl původně napsán jako alternativa open source pro MATLAB. OO API je přizpůsobitelnější a výkonnější než pyplot, ale jeho použití je náročnější. Matplotlib nabízí už hotové uživatelské rozhraní se strukturou nabídky. Uživatelské rozhraní můžeme použít k přizpůsobení, posouvání, zvětšování a různému přepínání jednotlivých prvků na zobrazovaném grafu [18]. NumPy je nezbytnou součástí matplotlibu, jelikož používá všechna číselná data a vícerozměrná pole. Instalační příkaz je „pip install matplotlib“.

PyVISA je další balíček Pythonu, pomocí kterého jsme schopni ovládat všechny druhy měřících zařízení nezávisle na rozhraní (např. GPIB, RS232, USB, Ethernet). Specifikace VISA má explicitní vazby na Visual Basic. Python lze použít k volání jednotlivých funkcí ze sdílené knihovny VISA (.dll, .so, .dylib), což umožňuje přímé využití standardních implementací. Python se využívá k přímému přístupu k většině sběrníkových systémů používaných přístrojů [19]. PyVISA je tedy obálka Pythonu pro sdílené knihovny VISA, ale může sloužit i jako rozhraní pro další implementaci. Instalační příkaz je „pip install PyVISA“.

Python-seabreeze je modul, který nám umožňuje propojit spektrometr od firmy Ocean Optics s Pythonem. Python-seabreeze používá dvě backendová rozhraní, podle kterých jsme schopni komunikovat s našim spektrometrem.

- Cseabreeze backend je podprogram knihovny Seabreeze a je výchozím rozhraním používané python-Seabreeze.
- Pyseabreeze backend používá ke komunikaci se spektrometrem pyUSB a implementuje celou komunikační vrstvu pro spektrometry Ocean Optics. Rozšíření Pyseabreeze je snazší na rozšíření oproti Cseabreeze.

Struktura modulu python-seabreeze lze vidět na Obr. 2.10. [20]. Příkaz k instalaci je „pip3 install seabreeze“,



Obr. 2.10: Struktura modulu python-seabreeze

OS modul poskytuje funkce pro interakci s operačním systémem. Tento modul poskytuje přenosný způsob použití funkcí závislých na operačním systému. Pomocí modulu jsme schopni vytvářet a odstraňovat adresáře, načítat obsah složky, změnit a identifikovat aktuální adresář atd. Příkaz pro instalaci je „pip install os“.

Time modul poskytuje různé funkce, které souvisejí s časem. Většina funkcí definovaných v tomto modulu volá funkce knihovny platformy C se stejným názvem. Důležité k pochopení tohoto modulu jsou následující terminologie. Tzv. Epocha je místo, kde začíná čas a je závislá na platformě. Lze zjistit pomocí příkazu `time.gmtime(0)`. Sekundy od epochy se týká celkového počtu uplynulých sekund od epochy. UTC je koordinovaný světový čas a DST je letní čas. Lze nainstalovat pomocí příkazu „pip install time“

Serial modul zapouzdřuje přístup k sériovému portu. Poskytuje backendy pro všechny operační systémy. Modul automaticky vybere vhodný backend podle toho, jaký používáme operační systém [21]. Mezi základní funkce toho modulu patří:

- Stejné rozhraní založené na třídě všech podporovaných platformách

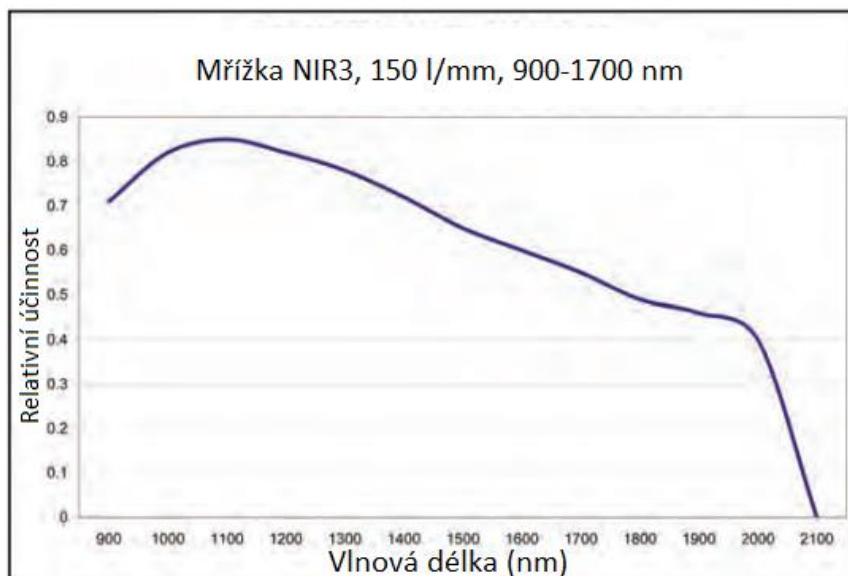
- Přístup k nastavení portu prostřednictvím Python
- Práce s nebo bez časového limitu příjmu.
- Port je nastaven pro binární přenos.

Sériový modul je používán pro komunikaci s posuvným zařízením, instalační příkaz je „pip install pyserial“.

Tkinter modul je standardní GUI (grafické uživatelské rozhraní) pro Python. Python má spoustu softwarových struktur na tvorbu GUI, ale Tkinter jako jediný je zabudován do standardní knihovny Pythonu. Jedná se o lehký aplikační rámec ve srovnání s ostatním rámci, ale chybí mu grafické úpravy, tudíž se jeho vzhled jeví jako poněkud zastaralý. Pro náš projekt je ale více než dostatečný. Příkaz pro instalaci je „pip install tk“.

## 2.5.2 Snímání infračervených spekter

Pro měření infračervených spekter byl použit spektrometr od firmy Ocean Optics model NIRQUEST512. Spektrometr obsahuje mřížku, která má mřížkovou konstantu 150 řádku na mm a odpovídající spektrální rozsah je 800 nm. Křivku účinnosti mřížky lze vidět na Obr. 2.11.



Obr. 2.11: Účinnost mřížky spektroskopu NIRQUEST 512

Tento spektrometr disponuje hlubokým termoelektrickým chlazením, to má za důsledek nižší temný proud a vylepšený odstup signálu od šumu. Umožňuje rychlý přenos dat pomocí USB kabelu. Je možné také programovat digitální vstupy a výstupy. Materiál detektoru je InGaAs, který společně s difrakční mřížkou definuje rozsah spektrometru.

- Integrační čas 1 ms – 120 s
- Optické rozlišení 3,13 nm
- Rozsah vlnové délky 900nm – 1,7  $\mu$ m
- Vstupní štěrbinu 25  $\mu$ m



Obr. 2.12: Spektrometr NIRQUEST 512

Světlo posbírané optikou je vedeno patchcordem M40I02 – vlákno BFL48-400 do spektrometru. Spektrometr je připojen pomocí USB konektoru do počítače, kde je ovládán pomocí vytvořeného kódu v programovacím jazyku Python. V rámci prvních pokusů jsem využil kód 1.2.

```

device = []
print("Čekám na připojení")

while not device:
    print(".")
    device = list_devices()
    time.sleep(1)
try:
    spec = Spectrometer(device[0])
    spec.integration_time_micros(3000000)
    wavelengths, intensities = spec.spectrum()
except Exception as e:
    print(e)
    print("Při ukončování došlo k chybě!")
    exit()
fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(wavelengths, intensities)

```

```

ax.set(xlabel='wavelengths (nm)', ylabel='intensities ',
       title='Závislost intenzity na vlnové délce')
ax.grid()
fig.savefig("Spektrum")
plt.show()

```

Kód 1.2: Spektrometr NIRQUEST 512

Jakmile je spuštěn program, *device = []* se snaží připojit k našemu spektroskopu, funkce `print` nám signalizuje, že proces započal. Pokud se nelze připojit, je zde podmínka `while not`, která má za úkol připojování opakovat až do té doby, dokud se tak nestane. `Spec = Spectrometer(device[0])` vytvoří instanci spektrometru a dále se nastavuje integrační čas v  $\mu\text{s}$ , v tomto případě je nastaven na 3 s. `Wavelengths, intensities = spec.spectrum()` slouží k získání naměřených dat ze spektrometru. Při nastavení `ax.plot` nám první hodnota udává hodnotu osy x a druhá osy y. `Ax.set` funkce nastavuje popisy osy a title mění název grafu. `Ax.grid()` nastavuje mřížku a `fig.savefig` nám uloží obrázek pod daným názvem. V posledním kroku je pouze zobrazení grafu. Pohled na výsledek výše zmíněného kódu, lze vidět na Obr. 2.13.



Obr. 2.13: Závislost intenzity na vlnové délce zkoumaného vzorku

### 2.5.3 Excitace vzorku

Aby bylo možné cíleně zkoumat elektroluminiscenci vzorků umístěných v elektrodovém systému, bylo nutné do systému integrovat také laboratorní zdroj Agilent E3674A, který disponuje dvěma stejnosměrnými výstupy. Propojení s počítačem bylo

dosaženo pomocí USB/GPIB převodníku typu 82357B od firmy Keysight technologies. V prvním kroku bylo nutné nainstalovat Keysight IO Libraries 17\_0\_19013 dostupné ze stránek výrobce. Dále byly nainstalovány drivery NIVISA541full dostupné ze stránek NI-VISA. V daném uspořádání je možné inicializovat zdroj následujícím kódem:

```
rm = visa.ResourceManager()
res = rm.list_resources()
print("Find following resources: ")
print(res)
print("Opening " + res[-1])

inst = rm.open_resource(res[-1])

inst.query("*IDN?")

inst.write("INST P6V")
inst.write("VOLT 2.0")
inst.write("CURR 1.0")
inst.write("OUTP OFF")
inst.write("OUTP ON")
```

Kód 1.3: Ovládání laboratorního zdroje

V První části se zařízení připojí přes USB k počítači. Při odesílání příkazu do laboratorního zdroje se na displeji zobrazí ikona Rmt a Adrs. Všechny vstupy z panelu jsou neaktivní, dokud nestiskneme tlačítko na zdroji „store/local“. Jednotlivé příkazy jako *INST P6V* nastaví +6 V na výstupu, *VOLT 2.0* nastaví výstupní napětí na 2 V a *CURR 1.0* nastaví výstupní proud na 1 A. Je potřeba používat desetinou tečku, aby příkaz byl přijat zdrojem. Zapnutí výstupu se provede pomocí příkazu *OUTP ON* a stejně tak i vypnutí příkazem *OUTP OFF*.

## 2.5.4 Posuvné zařízení

Posuvné zařízení se skládá z křížově uspořádané dvojice lineárních vedení KURODA SG3310A-400P-A5NN-NN. Ty jsou uváděny do pohybu dvojicí krokových motorů SX23-1020. Krokové motory jsou řízeny uživatelsky vytvořeným kontrolérem na bázi mikrokontroléru Microchip AVR. Kontrolér komunikuje skrze sériovou linku přenesenou na USB. Na straně PC se tedy pro komunikaci používá virtuální sériový port. Při připojení USB portu bylo důležité stáhnout potřebně drivery FTDI VCP, abychom mohli po základní inicializaci portu komunikovat.

```

ser = serial.Serial()
ser.baudrate = 9600
ser.port = 'COM7'
ser.timeout = 1
if ser.isOpen() == True:
    ser.close()

```

Kód 1.4: Nastavení parametrů a portu pro sériovou komunikaci

V našem případě byl driver mapována na COM7. Přenosová rychlost byla nastavena na 9600 Bit/s. Formát rámce 8 datových bitů, 1 stop bit a žádná parita viz. Kontrolér je také vybaven dvěma potenciometry, kterými je možné manuálně polohovat v ose X a Y, pokud byl tedy zadán příkaz pro manuální posuv. Přenosový protokol je textový a využívá množství příkazů shrnutých v tab. 1. Každý příkaz je ukončen znaky CR, LF, tedy Carriage return (0x0d) a Line feed (0x0a).

```

ser.open()
line2 = 'Příkaz' + chr(13) + chr(10)
ser.write(line2.encode('utf8'))
ser.close()

```

Kód 1.5: Vložení příkazu pro sériovou komunikaci

Každý příkaz je potvrzován, nicméně kontrolér může sám zasílat zprávu, například při dosažení limitní pozice. Systém má jednoduchý synchronizační systém. V případě, že se točí s jakýmkoli motorem, je výstup TRG nastaven na log 1. Po dokončení je nastaven na log 0. Před provedením příkazu je kontrolován vstupní synchronizační signál COMDIS. Dokud je držen v log. 0 není zahájeno provedení příkazu. Je nutné dodat, že systém nepočítá s automatickým zrychlením a v plánovaném režimu krok/snímek/krok to není patrně na závadu. Systém také podporuje hardwarový handshake, který zajistí, že motory budou zastaveny pouze na minimální dobu během měření a následně se automaticky provede další krok. Tato funkce ovšem nebyla využita. Naopak funkce vnitřního čítače driveru, který odpočítává kroky a umožňuje tak návrat do výchozí pozice s využitím příkazů *set\_defpos* a *goto\_defpos* byla použita.

Tab. 1: Příkazová sada pro komunikaci s posuvným zařízením

Příkaz	Popis příkazu
com_speed 9600	Změna přenosové rychlosti na 9600 Bd/s
com_speed 19200	Změna přenosové rychlosti na 19200 Bd/s
A_dir f	Nastaví směr otáčení motoru A na dopředný
A_dir r	Nastaví směr otáčení motoru A na zpětný
A_dir ?	Vrátí aktuální nastavení směru otáčení motoru A

B_dir f	Nastaví směr otáčení motoru B na dopředný
B_dir r	Nastaví směr otáčení motoru B na zpětný
B_dir ?	Vrátí aktuální nastavení směru otáčení motoru B
A_step	Provede jeden krok na motoru A nastaveným směrem
B_step	Provede jeden krok na motoru B nastaveným směrem
A_steps_delay XXX	Nastaví dobu jednoho kroku motoru A na hodnotu XXX, kde XXX je celé číslo rozsahu 8-39603. Doba je 0,1ms*XXX.
A_steps_delay ?	Vrací dobu jednoho kroku motoru A ve formátu A_steps_delay XXX
B_steps_delay XXX	Nastaví dobu jednoho kroku motoru B na hodnotu XXX, kde XXX je celé číslo rozsahu 8-39603. Doba je 0,1ms*XXX.
B_steps_delay ?	Vrací dobu jednoho kroku motoru B ve formátu B_steps_delay XXX
A_steps XXX	Provede daný počet kroků motoru A na nastavenou stranu. Kde XXX je celé číslo z rozsahu 1-65535.
B_steps XXX	Provede daný počet kroků motoru B na nastavenou stranu. Kde XXX je celé číslo z rozsahu 1-65535.
A_set_defpos	Nastaví aktuální pozici motoru A jako defaultní.
B_set_defpos	Nastaví aktuální pozici motoru B jako defaultní.
A_goto_defpos	Přesune motor A do defaultní pozice
B_goto_defpos	Přesune motor B do defaultní pozice
user_pos	Zahájí režim nastavení pozice s využitím potenciometrů.
user_pos_disable	Ukončí nastavení pozice s využitím potenciometrů.
A_repeat XX	Násobné opakování kroků na motoru A. Po přijetí tohoto příkazu je další přijatý příkaz steps proveden XX krát.
B_repeat XX	Násobné opakování kroků na motoru B. Po přijetí tohoto příkazu je další přijatý příkaz steps proveden XX krát.
park_motors	Nastaví motory AB do takové pozice, aby po následném zapnutí napájení nedošlo k jejich pootočení.
trig_strobe	Aniž by se pohlo s motory, provede na synchronizačním trimovacím výstupu impuls .
save_config	Uloží nastavení do EEPROM. Ukládá AB delay, Ab quench, ab dir, user pos state, trig en.
load_config	Načte nastavení z EEPROM. Načte AB delay, Ab quench, ab dir, user pos state, trig en.
trig_dis	Zakáže výstupní signál triggeru
trig_en	Povolí výstupní signál triggeru. Pokud je povolen trigger, neumožňuje.

Při zahájení skenování se zavolá funkce `if __name__ == „__main__“`. Tím se zavolá `scanner = Scanner()`, čímž se vytvoří instance třídy `Scanner`. Dále je volána funkce `scanner.setspace()`, čímž je vytvořen prostor pro skenování.

```
if __name__ == "__main__":
    scanner = Scanner()
    scanner.setSpace(3, 3)
    scanner.setSpeed(3)
    scanner.scanSpace()
```

Kód 1.6: Funkce main

`Scanner.setSpeed()` nastavuje, kolik po každém kroku bude čekat vteřin, než se vykoná další příkaz. Tato funkce je zde proto, aby bylo zajištěno dostatečné množství času na sejmutí spektra a na posunutí. V poslední řadě je zavolán `scanner.scanSpace()`, který spustí samotné skenování zvoleného prostoru.

Ve třídě `Scanner` dochází ke skenování samotného prostoru. Obsahuje funkci `init`, což je konstruktor dané třídy. Obsahuje nastavení prostoru, nastavení pozice, ve které se právě pohybuje, prodlevu mezi jednotlivými kroky a `self.dir` na ovládání směru, který je překlápěn podle potřeby.

```
class Scanner():

    def __init__(self, pre=None, post=None):
        self.space = {"x": 0, "y": 0}
        self.position = [0, 0]
        self.traverseSpeed = 1.0
        self.dir = "f"
```

Kód 1.7: Definování funkce init

Vytvoření složky, do které jsou ukládána všechna naměřená data, je zobrazeno v kódu 1.8. Název složky je zadán z textového pole v grafickém uživatelském rozhraní. Pomocí funkce `if not os.path.exists` sledujeme zdali už složka s tímto názvem existuje. Pokud neexistuje, bude vytvořena. Jakmile složka existuje, vypíše se nám „složka již existuje“ a data v ní budou přepsány.

```
self.nazev = os.path.join(os.getcwd(), Nazev_sloz.get())
if not os.path.exists(self.nazev):
    os.makedirs(self.nazev, exist_ok=True)
else:
    print("Složka již existuje")
```

Kód 1.8: Vytvoření složky pro ukládání dat

Pomocí *setSpace* je nastaven počet bodů, které chceme skenovat. Nastavení skenovacího prostoru je pomocí celočíselných hodnot v grafickém uživatelském rozhraní. Celočíselné hodnoty jsou zadávány do textového pole, které je ošetřeno funkcí *int*, kdyby náhodou došlo k překliknutí nebo zadání nepodporované hodnoty. Do konzole je pomocí funkce *print* vypsaná informační hláška, která nám dá informaci o tom, jestli byl nastaven správně námi požadovaný prostor. Hodnoty X a Y jsou zapsány do vnitřní proměnné, jelikož se s nimi pracuje i v dalších příkazech. Funkce *setSpace* je zobrazena v kódu 1.9.

```
def setSpace(self, x, y):
    if Kroky_bod_x.get():
        try:
            x = int(Kroky_bod_x.get())
        except Exception as e:
            print(e)
    if Kroky_bod_y.get():
        try:
            y = int(Kroky_bod_y.get())
        except Exception as e:
            print(e)
    print("Nastavení prostoru o rozmeru: {%d,%d}" % (x, y))
    self.space["x"] = x
    self.space["y"] = y
```

Kód 1.9: Nastavení prostoru v grafickém uživatelském rozhraní

Pro jednotlivé posouvání na ose X a Y slouží funkce *moveX* a *moveY*, kde zadáváme celočíselné hodnoty do GUI, a tím se při jejich volání opakují jednotlivé kroky. Je nutné, aby na začátku funkce byla otevřena sériová linka a po skončení kroku zase ukončena. Pomocná funkce na otáčení motoru na ose X je zobrazeno v kódu 1.10. Princip funkce je takový, že když je motor nastaven na dopředný a chceme jej nastavit na zpětný, tak bude vyslán příkaz, který provede otočení motoru na zpětný a naopak.

```
def flipDir(self):
    if self.dir == "r":
        self.dir = "f"
        ser.open()
        line2 = 'A_dir f' + chr(13) + chr(10)
        ser.write(line2.encode('utf8'))
        ser.close()
    elif self.dir == "f":
        self.dir = "r"
        ser.open()
        line2 = 'A_dir r' + chr(13) + chr(10)
```

```
ser.write(line2.encode('utf8'))
ser.close()
```

#### Kód 1.10: Pomocná funkce na otáčení X motoru

Pomocí funkce *scanSpace* skenujeme prostor. Volitelným parametrem jsme zadali výchozí body, od kterých bude začínat skenování prostoru. Skenování prostoru začíná v bodech  $X=0$  a  $Y=0$ .  $Dirr = 1$  plní funkci správného zapisování ukládaných obrázků. Trasování je primárně nastaveno na způsobu hada, ale je umožněno také skenování z jedné strany. V každém bodě, ve kterém se nacházíme, se nejdřív zavolá funkce na sejmutí spektra a jsou ji přiřazeny pozice  $X$  a  $Y$ , aby došlo k správnému uložení číselných hodnot do grafu. Voláním příkazu *moveX* se posouváme v ose  $X$ . Inkrementujeme *self.x*, že byl vykonán posuv.  $X < 0$  je zde proto, aby se odečítání neprovádělo do nekonečna, ale končilo 0. Jakmile jsou provedeny všechny body v ose  $X$ , tak vyskočí ze smyčky a provede příkaz pro osu  $Y$ . V tomto případě je zde funkce *move* před sejmutím spektra, aby byl nejdřív vykonán krok a až poté sejmuté spektrum. Dále se pokračuje opět posouváním v ose  $X$  s otočeným motorem, a tak až do konce skenování celého prostoru. Na konci skenování prostoru je zavolána funkce *goto.Defpos*, která nám vrátí motory na výchozí pozici měření.

```
def scanSpace(self, start_x=0, start_y=0):
    self.x = start_x
    self.y = start_y
    dirr = 1
    for y in range(start_y, self.space["y"]):
        for x in range(start_x, self.space["x"]):
            self.getSpectrum(self.x, self.y)
            self.moveX()
            self.x = self.x + dirr
            if self.x < 0:
                self.x = 0
            time.sleep(self.traverseSpeed)
        if self.x == self.space["x"]:
            self.x = self.x - 1
            self.moveY()
            self.getSpectrum(self.x, self.y)
            self.y = self.y + 1
            self.flipDir()
            dirr = dirr * -1
            time.sleep(self.traverseSpeed)
    self.gotoDefpos()
```

#### Kód 1.11: Skenování prostoru

*GetSpectrum* nám snímá spektra, zároveň ukládá obrázky do formátu .png a .csv. V první části kódu je nastavení integračního času v textovém poli, které se nachází v GUI. Když se něco nachází v textovém poli, tak pomocí *int* funkce převádíme na celé číslo a následně vynásobíme \*1000000, abychom zadávali čas v sekundách. Pokud se v textovém souboru nic nenachází, tak bude nastavena výchozí hodnota 1 s. Náhled na kód je zobrazen v kódu 1.12. Funkce *spec.spectrum* je hlavní funkce knihovny seabreeze, která získá spektrum a vrátí 2 vektory (vlnová délka a intenzita). Každý vektor je o velikosti 2048 prvků typu float.

```
def getSpectrum(self,x ,y):
    try:
        spec = Spectrometer(device[0])
        if Int_time.get():
            try:
                spec.integration_time_micros(int(Int_time.get()*1000000)
            except Exception as e:
                print(e)
        else:
            spec.integration_time_micros(1000000)

        wavelengths, intensities = spec.spectrum()
```

Kód 1.12: Nastavení integračního času

V další části se využívá knihovna matplotlib, kde vytvoříme objekt grafu. Přiřazujeme hodnoty na osu X a Y tím, že první v závorce je osa X a druhá je osa Y. Popisky vodorovné osy jsou pomocí *xlabel* a svislé osy pomocí *ylabel*. Název grafu je nastaven příkazem *title*, kde je v našem případě napsaná závislost intenzity na vlnové délce a za tím se nacházejí aktuální pozice motoru v bodech X a Y. Tahle část je důležitá zejména při vyhodnocování výsledků, aby bylo možné se v naměřených datech dobře orientovat. Za pomoci NumPY jsme schopni získat 2D pole z vlnové délky a intenzity.

```
except Exception as e:
    print(e)
    print("An error occured, exiting!")
    exit()
fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(wavelengths, intensities)
ax.set(xlabel='wavelengths (nm)', ylabel='intensities ',
       title= 'Závislost intenzity na vlnové délce [' + str(x) + ', ' + str(y)+' ]')
ax.grid()
arr2Dstacked = np.column_stack((wavelengths, intensities))
arr2D = np.array(arr2Dstacked, dtype='f')
filename = 'spektrum_{{}}, {{}}.csv'.format(x, y)
filename = os.path.join(self.nazev, filename)
```

```

np.savetxt(filename, arr2D, delimiter=';', fmt='%f', header='vlnová délka ;
intenzita')
header = "Datum;Počet bodů x;Počet bodů y;Velikost kroku x;Velikost
kroku y"
values = str(datetime.now().strftime("%d/%m/%Y %H:%M:%S")) + ";" +
str(self.space["x"])+ ";" + str(self.space["y"])+ ";" +str(Kroky_bod_x.get()) +
";" +str(Kroky_bod_y.get())
with open(filename, 'r+') as f:
    content = f.read()
    f.seek(0, 0)
    f.write(header.rstrip("\r\n") + '\n')
    f.write(values.rstrip("\r\n") + '\n' + content)

plt.savefig(os.path.join(self.nazev, 'spektrum_{}, {}.png'.format(x, y)))

plt.close()

```

Kód 1.13: Ukládání do formátu .png a .csv

Pro uložení získaných hodnot do formátu .csv jsme zadali název *spektrum* a dále hodnoty aktuálních pozic v ose X a Y. Ukládání je v pořadí (filename, 2Dpole, oddělovač, formát dat a hlavička pro získané hodnoty. Dále je zde zvlášť nastavení hlavičky pro doplňující informace, jako je např. počet bodů v ose X a Y a velikosti kroků na ose X a Y. Hlavička je zde z důvodu zpětného zpracování dat. *F.seek* nám určí hodnoty zapisování získaných hodnot na začátek souboru. Aby nedošlo k přepisování hodnot, využívá se zde příkazu + *content*. *Plt.close* plní funkci automatického zavírání okna, kdyby tam tato funkce nebyla, museli bychom pokaždé ukončit získaný graf a až poté by pokračovalo měření. Jelikož se jedná o automatizované měření, tak se stačí dívat na grafy až ve složce.

## 2.5.5 Grafické uživatelské rozhraní

Základním prvkem grafického uživatelského rozhraní Tkinter je okno. Windows jsou tzv. kontejnery, ve kterých jsou všechny ostatní prvky grafického uživatelského rozhraní. Tyto další prvky jako např. textové pole, štítky, tlačítka se označují jako widgety. Widgety jsou obsaženy uvnitř oken. Prvním krokem je import tkinteru. Pomocí příkazu *window = tk.Tk()* bylo vytvořeno okno, kterému jsme přiřadili proměnnou *window*.

```

window = Tk()
window.title("Automatizované měření IR spekter")
window.geometry('580x250')
window.mainloop()

```

Kód 1.14: Vytvoření okna

`Window.title(, "")` určí název vyskakovacího okna. Pokud nepřidáme žádný název, bude automaticky přiřazen Tk. `Window.geometry` nastaví námi požadované parametry okna. `Window.mainloop()` řekne Pythonu, aby spustil smyčku událostí Tkinter. Tato metoda naslouchá událostem, jako je kliknutí na tlačítko nebo stisknutí kláves. Blokuje veškerý kód, který přijde po spuštění, dokud se okno nezavře.

```
osax = Label(window, text="Osa X", bg='green', fg='white', heigh=1, width=7, )
osax.grid(column=2, row=0)
Osay = Label(window, text="Osa Y", bg='green', fg='white', heigh=1, width=7, )
Osay.grid(column=3, row=0)
vych_poz = Label(window, text="Výchozí pozice")
vych_poz.grid(column=1, row=1)
jdi_vych = Label(window, text="Jdi výchozí pozice")
jdi_vych.grid(column=1, row=2)
poc_krok = Label(window, text="Počet kroků na bod")
poc_krok.grid(column=1, row=3)
proved_body = Label(window, text="Proved' počet bodů")
proved_body.grid(column=1, row=4)
Ruc_ovl = Label(window, text="Ruční ovládání")
Ruc_ovl.grid(column=1, row=5)
Sejmi = Label(window, text="Spektrum")
Sejmi.grid(column=5, row=7)
Nast_zdr = Label(window, text="Nastavení zdroje")
Nast_zdr.grid(column=6, row=0)
Napeti = Label(window, text="Napětí")
Napeti.grid(column=5, row=1)
Proud = Label(window, text="Proud")
Proud.grid(column=5, row=2)
Out = Label(window, text="Výstup")
Out.grid(column=5, row=4)
Prostor = Label(window, text="Nastavení prostoru")
Prostor.grid(column=1, row=6)
Int_cas = Label(window, text="Integrační čas")
Int_cas.grid(column=1, row=7)
Naz_sloz = Label(window, text="Název složky")
Naz_sloz.grid(column=1, row=8)
```

#### Kód 1.15: Popis před tlačítky

Label neboli jinak i štítek, je určen k zobrazení textu nebo i obrázku. Může obsahovat text pouze jednoho druhu. Do položky text byl přidán požadovaný popis a pomocí správce grid, jsme jej umístili do požadovaného prostoru v okně. `Column` představuje sloupce a `row` řádek. Barva pozadí se mění pomocí příkazu `bg='green'` a `Fg='white'` nastaví barvu písma na bílou barvu. Pomocí `heigh` a `width` lze nastavit šířku a výšku widgetu.

```

Kroky_bod_x = Entry(window, width=9)
Kroky_bod_x.grid(column=2, row=3)
Kroky_bod_y = Entry(window, width=9)
Kroky_bod_y.grid(column=3, row=3)
Napeti_zdroj = Entry(window, width=9)
Napeti_zdroj.grid(column=6, row=1)
Int_time = Entry(window, width=9)
Int_time.grid(column=2, row=7)

Proud_zdroj = Entry(window, width=9)
Proud_zdroj.grid(column=6, row=2)
Body_x = Entry(window, width=9)
Body_x.grid(column=2, row=6)
Body_y = Entry(window, width=9)
Body_y.grid(column=3, row=6)
Nazev_sloz = Entry(window, width=9)
Nazev_sloz.grid(column=2, row=8)

```

Kód 1.16: Vytvoření textového pole pro proměnné příkazy

*Widget entry* se používá k přijetí jednořádkových řetězců od uživatele. Textové pole bylo vytvořeno za účelem přehledného a rychlého ovládání krokového motoru a pro nastavení názvu složky, do které budou automaticky ukládána naměřená data. Obdobně jak bylo vytvořeno popisové pole, tak bylo vytvořeno i textové pole pro proměnné hodnoty.

Pro vytvoření tlačítka k vykonání požadovaného příkazu byla použita funkce *Button*. Tlačítko má spoustu možností, které mu lze přiřadit. Můžeme měnit barvy, šířku ohraničení, zobrazení obrázku, popisek tlačítek atd. V kódu 1.17: lze vidět ukázkou nastavení jednoho tlačítka. *Def* označuje začátek záhlaví funkce. Otevře se sériová komunikace a následně je předán příkaz k vykonání. *UTF8* je kódování znaků s proměnnou šířkou používané pro elektronickou komunikaci. V informačním panelu je pomocí funkce *print* vypsaná reakce na vyslaný příkaz. V kódu 1.17 se nastaví výchozí pozice pro osu x a bude vypsan příkaz „Nastavena výchozí pozice pro motor X“. *Command* nám určí jakou funkci *def* nám tlačítko zavolá.

```

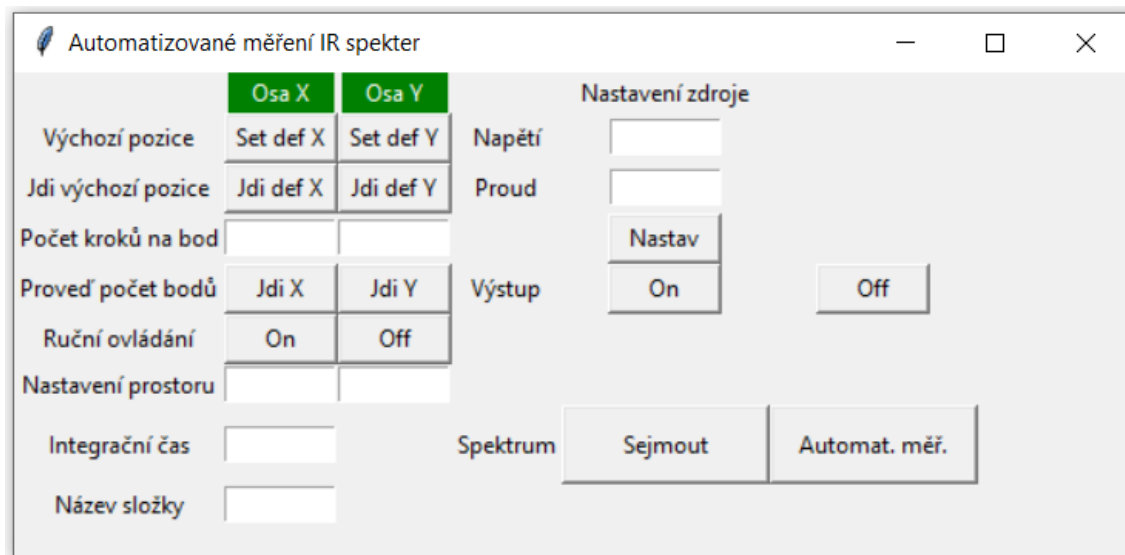
def clicked1():
    ser.open()
    line2 = 'A_set_defpos' + chr(13) + chr(10)
    ser.write(line2.encode('utf8'))
    print('Nastavena výchozí pozice pro motor X')
    ser.close()

Set_def_x = Button(window, heigh=1, width=7, text="Set def X",
command=clicked1)
Set_def_x.grid(column=2, row=1)

```

Kód 1.17: Definice tlačítka

Náhled na vytvořené grafické uživatelské rozhraní lze vidět na Obr. 2.14. Je rozděleno na 2 části, kde v první části je ovládání posuvného zařízení zvlášť pro osu X a osu Y. Jsou zde vypsané pouze nejdůležitější funkce, potřebné k ovládání posuvu. Textová pole, do kterých se zadávají hodnoty, jsou vytvořeny tak, že lze zadat pouze celé číselné hodnoty. Jakmile bude zadán nepodporovaný formát, budou nastaveny výchozí pozice.



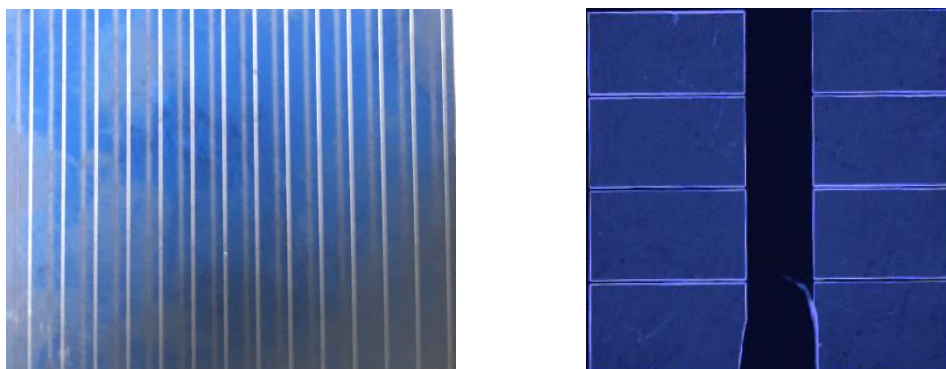
Obr. 2.14: Grafické uživatelské rozhraní

Nastavením prostoru je myšleno, jak velké pole se bude měřit. Integrační čas se zadává v jednotkách sekund. Do názvu složky je zadán název měření, pokud se nezadá žádná složka, budou se data automaticky ukládat do pracovního umístění. V tomhle případě dojde k přepisování dat, tudíž je nutné před každým měřením zadat název cílové složky. V druhé části se nastavují parametry laboratorního zdroje. Po zadání napětí a proudu se klikne na políčko „Nastav“, ale výstup je stále neaktivní, dokud se neklikne na tlačítko „On“. Jakmile chceme vypnout výstup klikne se na tlačítko „Off“.

Tlačítko Sejmout nám vyše příkaz do spektrometru a vykreslí se nám graf závislosti intenzity na vlnové délce. Při automatizovaném měření je nutné zadat výchozí pozici, nastavení prostoru např. matice 5x5, integrační čas spektrometru v sekundách, název složky a požadované parametry napájecího zdroje.

## 2.6 Zkoumaný vzorek

Pro ověření funkčnosti celého systému byl použit monokrystalický křemíkový solární článok s uměle vytvořenými defekty. Ty jsou realizovány laserovými zářezy mezi horní metalizací. Dále byly použity řezy solárních článků v okolí hlavního kontaktu. Vzorky jsou vkládány do vytvořeného elektrodového systému, který je tvořený spodní hliníkovou elektrodou a horním přítlačným kontaktem. Pohled na zkoumané vzorky lze vidět na Obr. 2.15.



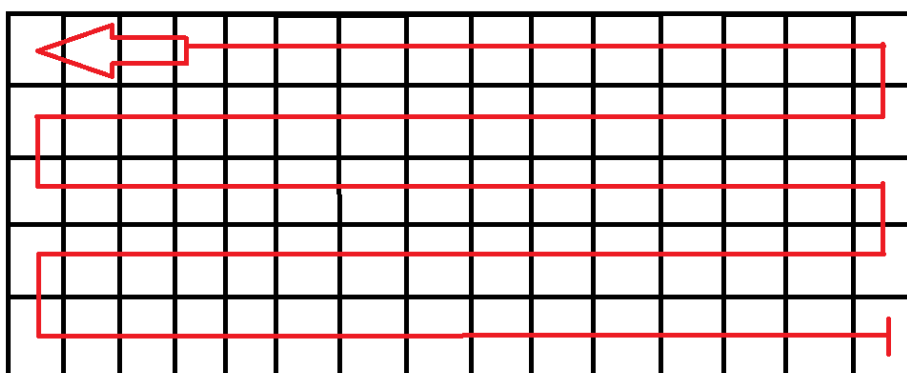
Obr. 2.15: Monokrystalický křemíkový solární článek (vlevo), řez solárního článku v blízkosti kontaktu (vpravo)

Je možné vzorek elektricky excitovat v propustném nebo závěrném směru. Zatímco v propustném spektru je očekáváno celoplošné vyzařování na vlnových délkách okolo 1150 nm, jehož intenzita se může měnit spolu s nehomogenitami vzorku, v závěrném směru očekáváme pouze lokální vyzařování z defektních oblastí, kde je za vyzařování zodpovědný lavinový či Zenerův průraz a další defekty.

Parametry pro měření:

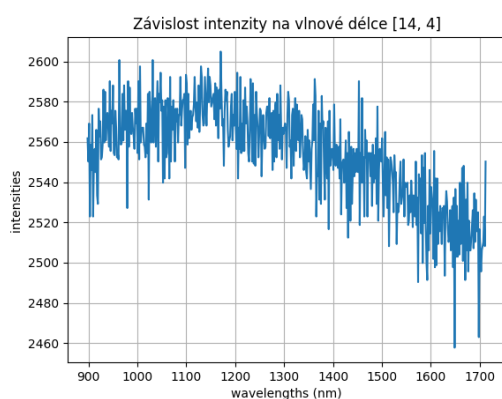
- Napětí: 1.2 V
- Proud: 0.6 mA
- Počet bodů v ose X: 15
- Počet bodů v ose Y: 5
- Velikost kroku X: 25
- Velikost kroku Y: 10
- Integrační čas: 2 s

Pomocí potenciometrů pro manuální pohyb jsme nastavili výchozí pozici pro automatické měření. Vytvořená matice byla o rozměrech 15x5, aby byl vidět přechod mezi napájenými kontakty. Použitá trasa skenu zkoumaného článku je zobrazena na Obr. 2.16.

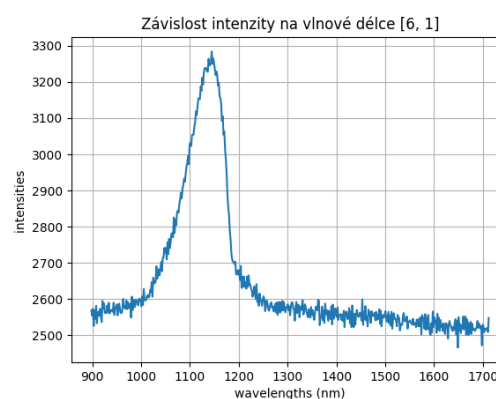


Obr. 2.16: Trasování na způsob hada po fotovoltaickém článku

Sejmutí spektra v místě, kde solární článek nic nevyzařoval, je zobrazeno na Obr. 2.17. Jedná se především jen o šum spektrometru při daném nastavení expozice. Na Obr. 2.18. je uložené spektrum z propustné oblasti, kde vzorek vyzařoval.

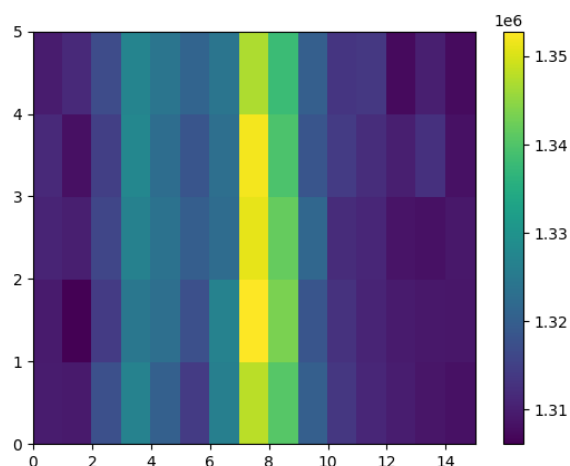


Obr. 2.17: Místo bez vyzařování



Obr. 2.18: Místo nad vzorkem

V námi vytvořené složce jsme získali během tohoto měření 75 naměřených spekter. Soubory jsou jednak uloženy ve formě .png a mohou být převedeny dle potřeby do jiných formátů. Větší potenciál pak poskytují soubory s příponou .csv, které obsahují jednotlivá spektra pro případný postprocessing. Samozřejmě je žádoucí poskytnout uživateli již během měření alespoň náhled, aby bylo zřejmé, zda je ze vzorku nějaké záření emitováno. Proto je navržena prostá suma přes všechny vlnové délky jako vykreslovanou hodnotou daného bodu. Pokud se v daném spektru bude nacházet zdroj záření, bude celková hodnota vyšší než ostatní a na přehledovém obrázku bude toto zřejmé.



Obr. 2.19: Zpracované výsledky do 2D mapy

Pro rychlé zobrazení naměřených a vyhodnocených dat, byla vytvořena barevně kódovaná matice viz. Obr. 2.19. Na ose X je počet měřených bodů v ose X a na ose Y jednotlivé body osy Y. Rozměry zkoumané oblasti na článku byly 6x2 mm. Vzhledem k tomu, že se jedná o první získaná experimentální data, byla vykreslena bez měřítka patřičného popisu os.

Z obrázku plyne, že jsme začali skenovat na ploše, kde solární článek vyzařoval méně. Během skenování každého řádku jsme se dostali do oblasti, kde bylo vyzařování nejsilnější. Postupem dále po ose x intenzita klesala. Obrázek byl použit pouze jako důkaz správného zaostření a potvrzení rozlišovací schopnosti systému (1 bod odpovídá asi velikost 0,5 mm, přičemž snímané ohnisko je více než 5x menší).

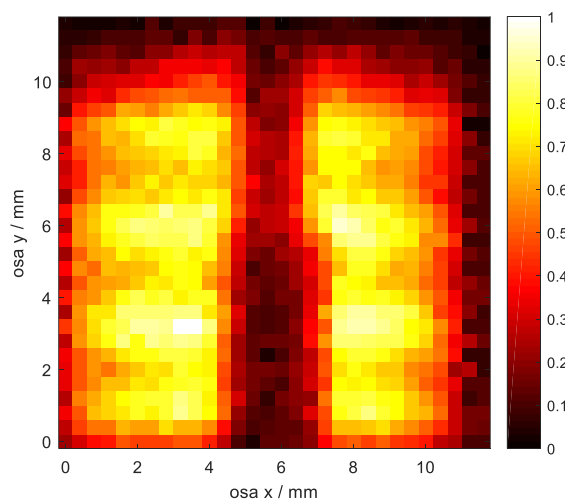
Dalším zkoumaným vzorkem byl řez solárního článku kolem hlavního kontaktu, takže všechny kontakty byly na rozdíl od přechodícího případu propojeny. Solární článek byl zkoumán v propustném směru.

Parametry měření:

- Napětí: 1.3 V
- Proud: 0.75 mA
- Počet bodů v ose X: 30
- Počet bodů v ose Y: 30
- Velikost kroku X: 15
- Velikost kroku Y: 15
- Integrovaný čas : 2 s

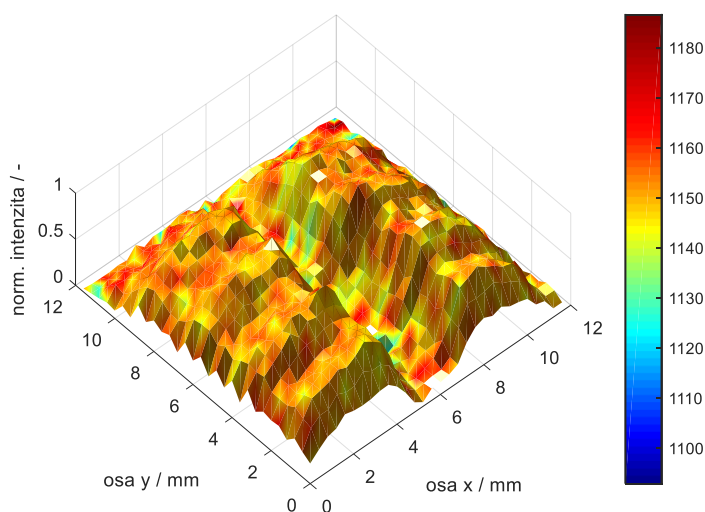
V této části měření byl patrný rozdíl v celkovém čase skenování. Zatímco u prvního vzorku se celková doba měření pohybovala okolo 3 minut, tak u druhého vzorku to bylo asi 40 minut. Doba je dána především nastavenou dobou integrace a počtem bodů,

nicméně určitý čas spotřebuje i komunikace a reakce posuvu na příkazy a ustálení po mechanickém pohybu motoru. Výsledkem tohoto měření je 900 spekter. Z nich byla opět pro vytvoření náhledového obrázku spočtena prostá suma v rozsahu vlnových délek 1100-1200 nm. V tomto případě však byl od každého spektra nejdříve odečten temný snímek pro minimalizaci šumu ve spektru. Vykreslením takto získaných dat získáme náhledový obrázek zobrazený na Obr. 2.20.



Obr. 2.20: Normovaná intenzita vyzařování v rozsahu vlnových délek 1100 – 1200 nm

Z Obr. 2.20 je patrné, že solární článek vyzařoval po celém jeho povrchu. Uprostřed článku se nacházel kontakt, tudíž zde nedocházelo k emisi ze vzorku. Bližší interpretace dat není cílem této práce. Na Obr. 2.21 lze vidět jiný způsob vykreslení. V tomto případě jsou hodnoty normované intenzity vyzařování vykreslené na ose z a barva na povrchu odpovídá dominantně vyzařované vlnové délce.



Obr. 2.21: Dominantně vyzařované vlnové délky

### 3. DOPORUČENÍ

Z praktických zkušeností získaných během ověření funkčnosti systému vyplynulo několik požadavků, které by mohly být řešeny v rámci dalšího rozšíření systému. Bohužel vzhledem k opatřením spojeným s pandemií bylo nutné omezit práci v laboratoři během semestru, a proto nemohly být některé z poznatků řešeny ještě v rámci této práce.

Pracoviště by bylo určitě vhodné rozšířit o samostatnou regulaci teploty uvnitř komory a lepší teplotní stabilizaci vzorku. Dále by bylo vhodné realizovat transimpedanční zesilovač a integrovat do systému laserový zdroj, což by umožnilo využít pracoviště pro měření LBIC. Dále by tento laser při omezení výkonu mohl být použit pro účely ostření a rychlejšího manuálního nastavení mezí měřeními. K řešení uvedeného by bylo zapotřebí upravit optickou cestu a realizovat přepínač zdroj/zesilovač. Ke spínání laseru a omezení jeho výkonu by bylo patrně možné využít druhý kanál současného laboratorního zdroje.

V rámci software by bylo vhodné doplnit také živý náhled měření, který by obzvláště při časově náročnějších měřeních ukazoval celkový postup.

## 4. ZÁVĚR

V diplomové práci se zabývám sestavením a realizací systému pro měření infračervených spekter, vyzařovaných lokálně ze zkoumaných vzorků, při jejich elektrické excitaci.

Teoretická část práce popisuje světelnou vlnu a související jevy. Dále jsem přiblížil problematiku polovodičů a následně jsem se soustředil na řádkové spektrometry.

V rámci experimentální práce na zprovoznění systému byl realizován nejdříve software, využívající zapůjčený spektrometr Red Tide USB650, a to z důvodu omezení spojených s pandemií koronaviru COVID-19. Po částečném rozvolnění opatření byl již využíván spektrometr NIRQuest 512.

V praktické části jsem se věnoval návrhu a sestavení jednoduchého kolimátoru. Jádrem práce pak bylo vytvoření kontrolního softwaru komunikujícího se spektrometrem, řídicího dvousý posuv a ovládajícího laboratorní zdroj. U všech jmenovaných zařízení byla k dispozici dokumentace, na základě které bylo možné komunikaci realizovat. K vlastnímu zprovoznění systému bylo potřeba provést i několik prací, které jsem do práce samostatně neuváděl, jako například výroba elektrody vzorku či realizace chybějící kabeláže.

Kontrolní software byl vytvořen v Pythonu. Celý postup vytvoření softwaru jsem sepsal a rozdělil do pěti částí. V první části bylo nutné vytvořit program pro navázání komunikace a sejmутí spektra. Dále pomocí sběrnice GPIB jsem ovládal nastavení laboratorního zdroje. Laboratorní zdroj napájel elektrodový systém, ve kterém byl umístěn vzorek solárního článku. Pomocí sériové komunikace jsem navázal spojení s posuvným zařízením. Pro jednoduché ovládání bylo vytvořeno grafické uživatelské rozhraní, které obsahuje funkce nezbytné pro bezproblémové nastavení měření. Software také řeší export naměřených dat do textových souborů .csv a jako náhledy spekter .png.

Funkčnost systému byla ověřena několika provedenými experimenty s využitím vzorků monokrystalického solárního článku, u kterých byla zkoumána emise v propustném směru. Experimenty potvrdily funkčnost zařízení jako celku.

## 5. LITERATURA

- [1] HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALLKER. Fyzika: Elektromagnetické vlny - Optika - Relativita. 4. Brno: PROMETHEUS, VUTIUM, 1997.
- [2] VŠETIČKA, Martin a Jaroslav REICHL. Encyklopedie Fyziky: Elektromagnetické záření látek [online]. 2006 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/537-elektromagneticke-zareni-latek>
- [3] KRÁLOVÁ, Magda. Techmania Science Center: Luminiscence [online]. [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/kvanta/luminiscence>
- [4] REICHL, Jaroslav. Encyklopedie Fyziky: Odraz světla [online]. [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/437-odraz-svetla>
- [5] REICHL, Jaroslav. Encyklopedie Fyziky: Zákon lomu [online]. 2006 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/438-lom-refrakce-svetla>
- [6] VŠETÍČEK, Miroslav a Jaroslav REICHL. Encyklopedie Fyziky: záření absolutně černého tělesa [online]. 2006 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/538-zareni-absolutne-cerneho-telesa>
- [7] Polarizace světla [online]. Techmania Science Center, o.p.s [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/polarizace-svetla>
- [8] BELAS, E. a P. MORAVEC. Fotonové detektory záření [online]. 10.6.2017 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/semicond/media/files/courses/detekce6.pdf>
- [9] KADLEC, Ota. Historie digitální fotografie: CCD [online]. [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2004/xkadlec2.htm>
- [10] B&W TEK. AZO Materials: An Introduction to a Spectrometer - The Detector [online]. 2.12.2016, , 1 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13366>
- [11] Moravské přístroje: Kamery pro astronomii [online]. 21.9.2011 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.gxccd.com/art?id=303&lang=405>
- [12] CAGAŠ, Pavel, Roman CAGAŠ a Jiří KOFRÁNEK. CCD KAMERY PRO SNÍMÁNÍ EXTRÉMNĚ SLABÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ [online]. [cit. 2020-12-13]. Dostupné z:

- [http://www.creativeconnections.cz/medsoft/2012/Medsoft\\_Caga%C5%A1\\_Pavel.pdf](http://www.creativeconnections.cz/medsoft/2012/Medsoft_Caga%C5%A1_Pavel.pdf)
- [13] FELLERS, Thomas a Michael DAVIDSON. HAMAMATSU: CCD Noise Sources and Signal-to-Noise Ratio [online]. [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsnr.html>
- [14] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. Optika a atomová fyzika. Optika: fyzikální kompendium pro vysoké školy. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [15] Oxford Instruments Andor: Diffraction gratting [online]. [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/diffraction-gratings>
- [16] THORLABS: N-BK7 Plano-Convex Lenses (Uncoated) [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=112](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=112)
- [17] NumPy [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://numpy.org/>
- [18] Matplotlib [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://matplotlib.org/>
- [19] PyVisa [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://pyvisa.readthedocs.io/en/latest/>
- [20] Python-seabreeze [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://python-seabreeze.readthedocs.io/en/latest/#>
- [21] Pyserial [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- [22] ŠKARVADA, Pavel. LOKÁLNÍ OPTICKÉ A ELEKTRICKÉ CHARAKTERISTIKY OPTOELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. RNDr. PAVEL TOMÁNEK, CSc.
- [23] Brzobohatý J., Musil V., Bajer, A., Boušek .J. : Elektronické součástky [online]. Skripta VUT Brno, 2002
- [24] BREITENSTEIN, O., BAUER, J., KITTLER, M., ARGUIROV, T., SEIFERT, W., EBIC and luminescence studies of defects in solar cells, Scanning, 2008, roč. 30, č. 4, s. 331- 338, ISSN: 0161-0457
- [25] SMI TH, S., DHERE, R., GESSERT, T., STRADINS, P., WANG, T., RAMANATHAN, K., NOUFI, R., MASCARENHAS, A., Submicron optoelectronic properties of solar cell materials. Thin Film Compound Semiconductor Photovoltaics, Material Research Society, 2005, roč.865, s. 27-31, ISSN: 978-1-558-99818-6.

- [26] FUYUKI, T., Yamazaki T., Takahashi Y. a Uraoka Y. *Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence: Applied Physics Letters* [online]. 2005, , 86 [cit. 2021-5-23].  
Dostupné z:  
<https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/characterisation/electroluminescence>
- [27] NREL: Photovoltaic research. : *Best Research Cell Efficiency chart* [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [28] Eichler H.J., Eichler J., Lux O. (2018) Photodetectors. In: Lasers. Springer Series in Optical Sciences, vol 220. Springer, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-99895-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99895-4_21)

## **Seznam příloh přiložených na CD**

- Příloha 1 – Elektronická verze diplomové práce
- Příloha 2 – Naměřená data vzorku č.1 a č.2 .csv
- Příloha 3 – Naměřená data vzorku č.1 a č.2 .jpg
- Příloha 4 – Zpracovaná data pro jednotlivé vzorky .gif a .jpg
- Příloha 5 – Kód vytvořený v Pythonu