

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Silvestr Marčík



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

DETEKCE DEFEKTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ POMOCÍ SYSTÉMU VYUŽÍVAJÍCÍHO ELEKTROLUMINISCENCI

SYSTEM FOR ELECTROLUMINESCENCE DEFECT DETECTION OF SOLAR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Silvestr Marčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Silvestr Marčík

ID: 146053

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Detekce defektů solárních článků pomocí systému využívajícího elektroluminiscenci

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte systém pro detekci defektů solárních článků a modulů využívající elektroluminiscenci pomocí webové kamery nebo jiné nízkonákladové fotografické kamery. Spektrální citlivost použité kamery ověřte pomocí spektrometru. Realizujte a ověřte funkčnost navrženého systému na vzorcích fotovoltaických panelů nebo na jiných zdrojích IR záření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

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 zaměřuje zejména na problematiku fotovoltaických článků z hlediska jejich vad (defektů). Úvodní část se zabývá historií fotovoltaiky, její zavádění do praxe a v neposlední řadě vysvětlení samotného fotoelektrického jevu. Dále jsou zde popsány samotné fotovoltaické články. Je zde vysvětlen jejich princip, výhody i nevýhody a vytváření fotovoltaických systémů. Podstatnou částí práce je výroba fotovoltaických článků, při které se do článků zavádí vady v podobě materiálových defektů. Následně jsou popsány defekty procesní vznikající nevhodnou manipulací s již vyrobeným článkem. Poslední téma teoretické části se věnuje detekci defektů pomocí luminiscenčních metod. Je zde zmíněna i neluminiscenční metoda LBIC. V praktické části diplomové práce nalezneme rozbor stávajícího řešení a následný návrh řešení pomocí nízkonákladové kamery. Je zde popsán postup úpravy kamery, ověření její spektrální citlivosti pomocí spektrometru a měření citlivost CMOS snímače. Závěr je věnován ověření funkčnosti navrhovaného řešení na různých zdrojích infračerveného záření a samotných fotovoltaických panelech.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaický článek; solární článek; fotovoltaický panel; křemík; elektroluminiscence; luminiscence; defekt; CCD kamera; fotovoltaika; fotoelektrický jev

ABSTRACT

The master thesis focuses primarily on issues of photovoltaic cells in terms of their defects. The introductory part deals with the history of photovoltaics, their introduction into practice and finally an explanation of the photoelectric effect itself. The thesis also describes photovoltaic cells themselves. It explains their principle, advantages, disadvantages and the creation of photovoltaic systems. A substantial part of the work is focused on the topic of detection of defects using luminescent methods. Subsequently, it describes procedural defects arising from the improper handling of already manufactured products. The final part deals with the main topic of the work, which is a detection using luminescence methods and it also mentions the non-luminescence method LBIC. The practical part of the master thesis contains the analysis of the current solution and of the subsequent proposal of solution using a low cost camera. It describes how to modify the camera, verify its spectral sensitivity using a spectrometer and measure the sensitivity of the CMOS sensor. The conclusion is focused on verifying the functionality of the proposed solution on different sources of infrared radiation and photovoltaic panels themselves.

KEYWORDS

Photovoltaic cell; solar cell; photovoltaic panel; silicon; elektroluminescence; luminescence; defect; CCD camera; photovoltaics; photovoltaic effect

MARČÍK, S. *Detekce defektů solárních článků pomocí systému využívajícího elektroluminiscenci*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 54 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Detekce defektů solárních článků pomocí systému využívajícího elektroluminiscenci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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 doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	7
Úvod	9
1 Úvod do fotovoltaiky	10
1.1 Historie fotovoltaiky	10
1.2 Uvedení fotovoltaiky do praxe	14
2 Fotovoltaické články	15
2.1 Princip fotovoltaického článku	15
2.2 Výhody a nevýhody FV článků	16
2.3 Fotovoltaické systémy	17
2.3.1 Primitivní FV systém	17
2.3.2 Autonomní FV systém	17
2.3.3 Fotovoltaický systém spojený se sítí.....	18
2.4 Výroba a typy fotovoltaických článků	19
2.4.1 Výroba křemíku	20
2.4.2 Monokrystalický fotovoltaický článek	20
2.4.3 Polykrystalický fotovoltaický článek.....	21
2.4.4 Tenkovrstvý amorfní fotovoltaický	22
3 Defekty fotovoltaických článků	23
3.1 Materiálové defekty (Grow Defects)	23
3.2 Procesní defekty (Processing Induced Defects)	24
3.3 Metody detekce defektů fotovoltaických článků	25
3.3.1 LBIC (Light Beam Induced Current).....	25
3.4 Luminiscenční metody detekce defektů fotovoltaických článků	26
3.4.1 Elektroluminiscence.....	27
3.4.2 Luminiscence mikroplazmy	28
3.4.3 Fotoluminiscence	29
4 Praktická část	30
4.1 Detekce defektů stávající CCD kamerou	30
4.2 Výběr nízkonákladové komerční kamery	32
4.3 Úprava kamery na plnospektrální snímání	34
4.4 Měření jednotlivých součástí pomocí spektrometru	38
4.5 Měření citlivosti CMOS čipu kamery	40
4.6 Detekce defektů upravenou nízkonákladovou kamerou	43

5	Závěr	45
	Literatura	47
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	49
	Seznam obrázků	50
	Seznam tabulek.....	52
	Seznam příloh	53
A	Výpis programu matlab	54
A.1	Funkce grayImage	54
A.2	Pomocná funkce	54

ÚVOD

Tempem, jakým se vyvinul svět za posledních padesát let, se nevyvíjel za celou historii lidstva. Hlavně v oblasti techniky můžeme pozorovat obrovské posuny. To s sebou přináší mnoho ulehčení, ale i problémů. Jeden ze zásadních problémů je devastování životního prostředí vytvářením velkého množství oxidu uhličitého z uhelných elektráren, těžbou ropy z dehtových písků apod. To vše se děje za účelem získání energie, avšak na úkor naší planety. Naštěstí vývoj obnovitelných zdrojů energie zaznamenal obrovské kroky kupředu. V roce 2015 zaznamenala fotovoltaika celosvětově instalovaných 228 GW, což umožní nejmenší roční produkci 275 terawatthodin elektrické energie.

Vývojem prochází celá řada článků na bázi organických polymerních vrstev nebo na bázi GaAs, avšak stále nejvýhodnějšími v poměru cena ku kvalitě jsou články křemíkové. Běžně používané solární panely složené právě z těchto křemíkových článků dnes dosahují účinnosti okolo 20 %. Technologické postupy výroby samotného křemíku a následného článku snížili svou energetickou náročnost natolik, že výroba elektrické energie po dobu životnosti solárního panelu se vyplatí.

Účinnost, a tedy i efektivnost křemíkových článků může být ovlivněna již při samotné výrobě křemíku či následném procesu výroby článků. Rozlišujeme tak defekty vzniklé vadou materiálu (materiálové) a defekty vzniklé chybou procesu výroby (procesní). Práce se zabývá jak samotnými vadami článků, tak jejich detekcí za pomoci elektroluminiscence

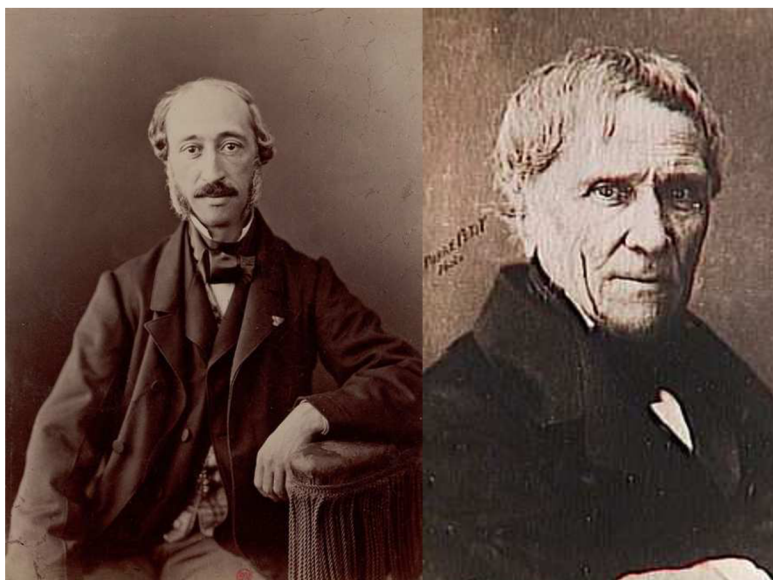
Praktická část diplomové práce je věnována detekování defektů fotovoltaických článků stávající CCD kamerou od firmy Moravské přístroje a návrhem nového nízkonákladového řešení pomocí outdoorové kamery. Úprava kamery na plnospektrální snímání je popsána jednoduchým obrázkovým návodem. Následně je systém proměřen pomocí spektrometru a jedna část měření se věnuje spektrální citlivosti samotného CMOS čipu kamery. Funkčnost celého systému je ověřena na vzorcích fotovoltaických panelů a dalších různých zdrojích infračerveného záření.

1 ÚVOD DO FOTOVOLTAIKY

Fotovoltaika je složenina dvou slov. Řeckého φώς (phos) neboli světlo a volt jako jednotka elektrického napětí. Především z důvodu využívání slunečního záření jako primárního zdroje energie se fotovoltaika považuje za trvale udržitelnou technologii.

1.1 Historie fotovoltaiky

Za prvopočátky fotovoltaiky můžeme brát objev fotoelektrického a později fotovoltického jevu. Trvalo to však celé století, než se tyto dva jevy upotřebily v praxi. V pondělí 29. července roku 1839 teprve dvacetiletý Alexandre Edmond Becquerel prezentoval na francouzské Akademii věd poznatek, že proud mezi kovovými elektrodami ponořenými v roztoku se mění v závislosti na intenzitě osvětlení. Hned poté vydal článek *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* s názvem *Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires*, kde bylo vše zmíněno. Nízký věk a skutečnost, že dosud pracoval v laboratoři svého otce vedou k domněnkám, že za objevitele tohoto jevu se považuje právě jeho otec Antoine César Becquerel. [2]



Obr. 1.1: Zleva Alexandre Edmond Becquerel a otec Antoine César Becquerel. [3]

Roku 1887 byl objeven další jev závislý mezi elektřinou a světlem. Heinrich Rudolf Hertz ho popsal tak, že „elektrický výboj ve vzduchu (plynu) vznikne snadněji mezi elektrodami, na které dopadá ultrafialové záření“. V práci Ueber den Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung bylo toto pozorování publikováno, ale popsání jevy se nepodařilo vysvětlit na základě vlnové teorie světla. [2]

Teoretický popis fyzikálního principu fotoelektrického jevu popsal Albert Einstein v roce 1905 tak, že aplikoval kvantovou teorii na elektromagnetické pole. Kvantovou teorii publikoval na přelomu století Max Karl Ernst Ludwig Planck. Einsteinův popis říká, že energie uvolněného elektronu závisí pouze na frekvenci záření neboli energii fotonů a počet elektronů závisí na intenzitě záření neboli počtu fotonů. Objevením zákonitosti fotoelektrického jevu dostal Einstein roku 1921 Nobelovu cenu za fyziku. [2]

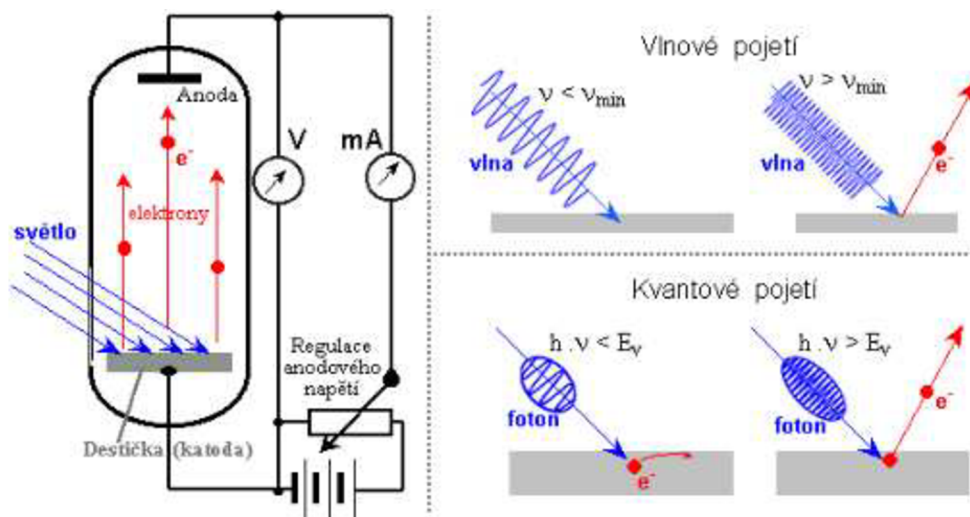
Z pohledu tehdejší fyziky nevysvětlitelné chování elektromagnetického vlnění při dopadu na kov poprvé popsal Heinrich Hertz v roce 1887. Albert Einstein dodal kvantové vysvětlení s využitím poznatků rodící se kvantové teorie. [2]

Hypotéza Maxe Plancka říká, že záření pohlcované a vydávané jednotlivými atomy zahřátého tělesa nemůže mít libovolnou energii. Vždy je totiž pohlcováno a vydáváno po takzvaných malých „kouscích“ energie neboli kvantech. Takové kvantum světla můžeme nazvat foton. Světelnou vlnu o určité frekvenci můžeme popsat následující rovnicí [2]

$$E = h \cdot f, \quad (1.1)$$

kde E je energie fotonu [J], h Planckova konstanta [J · s] a f frekvence záření [s⁻¹].

Ozářením čistého kovového povrchu svazkem světla uvolňujeme z povrchu elektrony. Tyto elektrony mohou vytvářet v obvodu elektrický proud a takovému jevu pak říkáme fotoefekt neboli fotoelektrický jev. [6]



Obr. 1.2: Zařízení pro studium fotoefektu se znázorněním vlnového a kvantového pojetí. [7]

Z obrázku 1.2 lze pozorovat, že ani ozařování silným dlouhovlnným zářením nevede k fotoefektu. Naopak ozařením slabým krátkovlnným zářením fotoefekt vyvoláme. U kvantového mechanismu fotoefektu můžeme vidět absorpci fotonů dopadajícího záření a předání jejich energie elektronům. Při pozorování na zařízení pro studium fotoefektu se zjistilo, že každý kov má svou prahovou frekvenci f_0 . Jestliže se frekvence rovná nebo je větší frekvenci prahové ($f \geq f_0$) uvolňují se z kovu elektrony. Při nižší frekvenci, než je frekvence prahová ($f < f_0$) fotoelektrický jev nenastává. Nastane-li fotoelektrický jev předá každé kvantum záření svou energii E jednomu elektronu. Tato energie však neuvolní jen elektron z kovu, ale vykoná také výstupní práci W_v a přejde v kinetickou energii elektronu. Einstein formuloval fotoelektrický zákon následovně

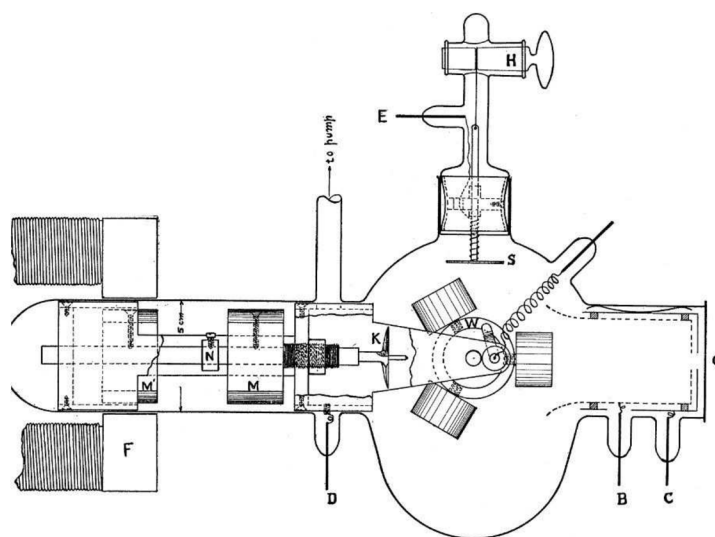
$$h \cdot f = E_k + W_v, \quad (1.2)$$

kde h je Planckova konstanta [$\text{J} \cdot \text{s}$], f frekvence záření [s^{-1}], W_v výstupní práce materiálu nutná k uvolnění elektronu [J], E_k kinetická energie [J]. [6]

Prahová frekvence f_0 neboli mezní vlnová délka λ_0 odpovídá uvolnění elektronu s nulovou kinetickou energií. Dosadíme-li do rovnice 1.2 nulovou kinetickou energii dostaneme

$$f_0 = \frac{W_V}{h}; \lambda_0 = \frac{h \cdot c}{W_V} [\text{Hz}, \text{m}] \quad (1.3)$$

Robert Andrews Millikan experimentálně potvrdil Einsteinovu hypotézu v článku A Direct Photoelectric Determination of Planck's v roce 1916. Původní záměr byl tuto hypotézu vyvrátit, což se paradoxně nepodařilo. Millikan dosadil do Einsteinovy rovnice, popisující fotoelektrický jev, hodnotu elementárního elektrického náboje. Tento náboj sám nejdříve změřil v roce 1909, s vyšší přesností však až v roce 1912, kdy určil poměrně přesně hodnotu Planckovy konstanty. V roce 1923 získal Nobelovu cenu za fyziku za výzkum elementárního elektrického náboje a fotoelektrického jevu. [4]



Obr. 1.3: Experimentální zařízení prof. Millikana – „dílna ve vakuu“. [4]

Uvedené experimenty se zabývají fotoelektrickým jevem vnějším (fotoemisí) neboli uvolňováním elektronů z vodivostního pásu z ozařovaného kovu do okolí (elektrolyt, plyn, vakuum). Existují však další dvě formy fotoelektrického jevu, kdy se elektrony neuvolňují do okolí, ale zůstávají uvnitř materiálu. Jedná se o fotoionizaci (ozáření elektromagnetickým zářením o vysoké frekvenci) a fofovoltaický jev, který je základem pro rozvoj celé fofovoltaiky. [2]

Poprvé byl fofovoltaický jev pozorován na PN přechodu vytvořeném mezi selenem a platinou. Zasloužili se o to William Grylls Adams a jeho žák Richars Evans Day v roce

1876. Hlavním rozdílem od jevu pozorovaným Becquerelem byl vznik elektrického napětí a proudu bez působení vnějšího elektrického pole pouze působením světla. Další vyrobené články na bázi selenu se objevili v roce 1883 vynalezené americkým vynálezcem Charlessem Frittssem. Účinnost těchto článků se ale pohybovala pod 1 %. První křemíkový článek byl vytvořen náhodně americkým inženýrem Russellem Shoemakerem Ohlem v roce 1940. Ten zjistil že PN přechod na křemíku při osvětlení vyrábí proud. Účinnost článku byla kolem 1 %. Objev si nechal v roce 1946 patentovat. [1]

1.2 Uvedení fotovoltaiky do praxe

Za první fotovoltaický článek použitelný pro výrobu elektrické energie byl považován článek sestrojený v Bellových laboratořích roku 1954. Článek byl vyroben z monokrystalického křemíku a jeho účinnost byla kolem 6 %. [1]

Již v roce 1958 se fotovoltaické články začali používat k výrobě elektrické energie, a to na kosmických družicích. Zajímavostí je, že tento zdroj elektrické energie se pro napájení spotřebičů kosmických družic využívá dodnes. Výjimku tvoří satelity na nízkých drahách, vojenské satelity a průzkumné sondy. Jinak se můžeme bavit o převažujícím zdroji elektrické energie u zařízení s předpokládanou dlouhou dobou provozu. [2]

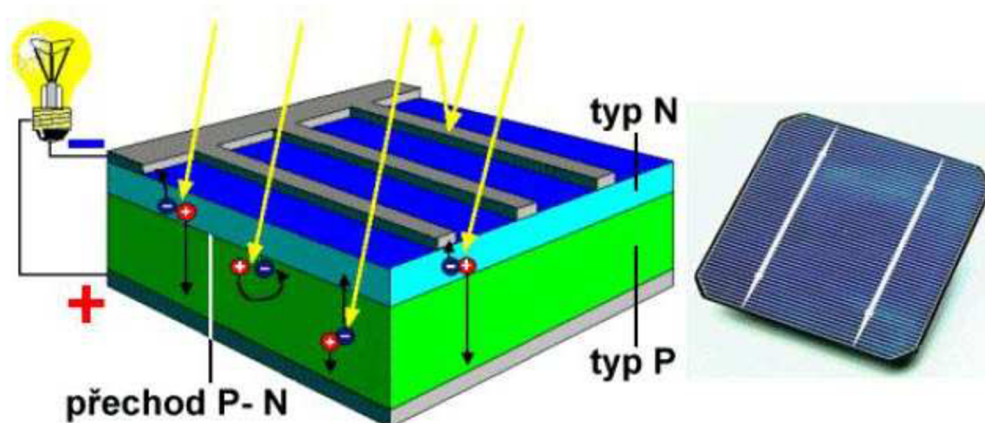
Díky nízké účinnosti a neefektivních a energeticky náročných postupech při výrobě se ceny článků v 50. letech pohybovaly v tisících dolarech za watt jmenovitého výkonu. Navíc celková spotřeba energie při výrobě takovýchto článků přesahovala množství energie, kterou byli články po dobu své životnosti schopny vyprodukovat. Využívali se tedy jen pro potřeby napájení malých spotřebičů na místech, kde je připojení do sítě velmi obtížné nebo dokonce nemožné. Teprve v 70. letech (období ropných krizí) roste, stejně jako o jiné obnovitelné zdroje, zájem o fotovoltaiku. Rapidně tak vzrostl i vývoj a výzkum a fotovoltaické články začali být cenově dostupnější, účinnější a za svou životnost dokáží vyprodukovat mnohonásobně více energie, než se spotřebuje při jejich výrobě. [2]

2 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY

Pojmem fotovoltaický článek označujeme velkoplošnou polovodičovou diodu, která je schopna měnit světlo na elektrickou energii. K takové přeměně využívá fotovoltaického jevu popsaného v předchozích kapitolách. Je to jediný zdroj elektrické energie, který nevyužívá pohyblivých součástí. Spojením více fotovoltaických článků vytvoříme celek zvaný jako solární panel, který už je z hlediska výkonu mnohem zajímavější než samotný jeden fotovoltaický článek.

2.1 Princip fotovoltaického článku

Základem nejčastějšího fotovoltaického (solárního, slunečního) panelu je křemíková destička s vodivostí typu P. Aby nám vznikl plnohodnotný polovodič musí se při výrobě vytvořit na destičce polovodič typu N. Vrstvy jsou pak oddělené takzvaným P-N přechodem. Dopadem světla na článek vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev. Z jeho krystalové mřížky se začnou uvolňovat záporné elektrony a na P-N přechodu se objeví elektrické napětí. U obvyklých křemíkových článků napětí dosahuje 0,5 V. Zapojením spotřebiče do obvodu článku začne protékat elektrický proud. Podle typu spotřebiče můžeme upravovat výkon spojováním článků paralelně nebo do série. Tak vytvoříme zařízení zvané fotovoltaický panel. Proud odebíraný z článku je tedy úměrný ozařované ploše článku. Solární panel složený z křemíkových článků o ploše 1 m² dosahuje výkonu 80–100 W. [8]



Obr. 2.1: Princip fotovoltaického článku. [8]

2.2 Výhody a nevýhody FV článků

Z hlediska lidského měřítka je slunce nevyčerpatelný zdroj energie, a navíc je zdarma. Tento fakt tvoří jednu z hlavních výhod fotovoltaických článků. Nepotřebujeme-li článkům dodávat palivo, můžou samostatně fungovat delší dobu bez sebemenší obsluhy, což je další ekonomickou výhodou. Mezi další výhody fotovoltaických článků patří:

- Články se dají vyrobit v široké škále výkonů od zlomků wattů (kalkulačky) až po stovky megawattů (solární elektrárny).
- Své okolí nezatěžují žádným zářením, hlukem ani zápachem.
- Při svém provozu nevytváří žádný odpad.
- Velké využití v kosmonautice.
- Mají velký potenciál v budoucí výrobě elektrické energie.
- Prodlužuje se jejich životnost, která je obvykle garantována na 15–20 let, poté dochází k postupné snižování účinnosti.

Největší nevýhodou, se kterou se články potýkají od samého vzniku, je jejich nízká účinnost. Jedny z neúčinnějších komerčně dostupných solárních panelů dosahují účinnosti kolem 20 %. Přičemž účinnost jednotlivých monokrystalických křemíkových článků je až 22 %. Články se také celou dobu potýkají s vysokými náklady při výrobě. Dnes už sice dokážou vyprodukovat mnohonásobně více energie, než se spotřebuje při výrobě, ale cena výroby je stále vysoká. Jako další nevýhody fotovoltaických článků můžeme jmenovat:

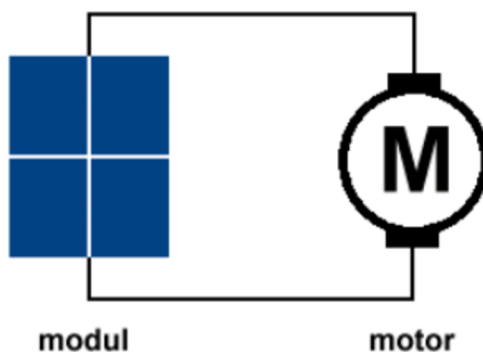
- Nestálý přísun slunečního záření během roku (nutnost záložního zdroje).
- Velké počáteční investice.
- Intenzita slunečního záření je závislá na oblasti (nejlepší Asie, subsaharská Afrika).

2.3 Fotovoltaické systémy

Samotný jeden fotovoltaický článek nemá v praxi vzhledem k svému výkonu velké využití. Spojováním článků do modulu zvyšujeme jejich výstupní napětí a proud. Sdružováním článků vytváříme tzv. modul (panel). Z těchto modulů můžeme vytvořit rozměrnější fotovoltaické pole. Takové pole se pak instalují na budovy nebo se z nich vytváří fotovoltaické elektrárny. Fotovoltaické panely se dají využít v různých systémech.

2.3.1 Primitivní FV systém

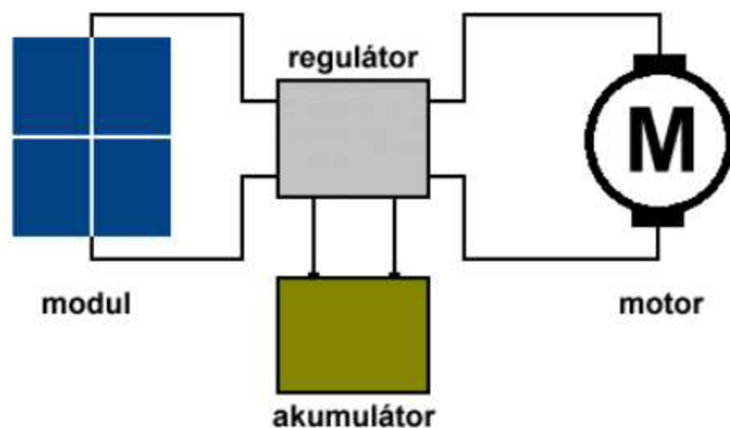
Nejčastěji fotovoltaický modul je spojen přímo se spotřebičem. Spotřebič tedy funguje v přímé závislosti na osvětlení fotovoltaického modulu. To je značná nevýhoda tohoto systému. Používá se tedy jen v jednoduchých aplikacích, například pro napájení kalkulaček.



Obr. 2.2: Primitivní FV systém.

2.3.2 Autonomní FV systém

Systém se nejčastěji skládá z fotovoltaických modulů nebo polí. Mezi ně a spotřebič se zapojuje akumulátor a regulátor. Do akumulátorů se ukládá elektrická energie z modulů, pro období nesvitu slunce. Regulací se řídí správné nabíjení a vybíjení akumulátorů. Tento zdroj energie nezávislý na rozvodné síti je označován jako „grid-off“. Se systémem se můžeme setkat u zahradních svítidel, napájení měřících přístrojů v meteorologických stanicích nebo u experimentálních solárních vozidel.

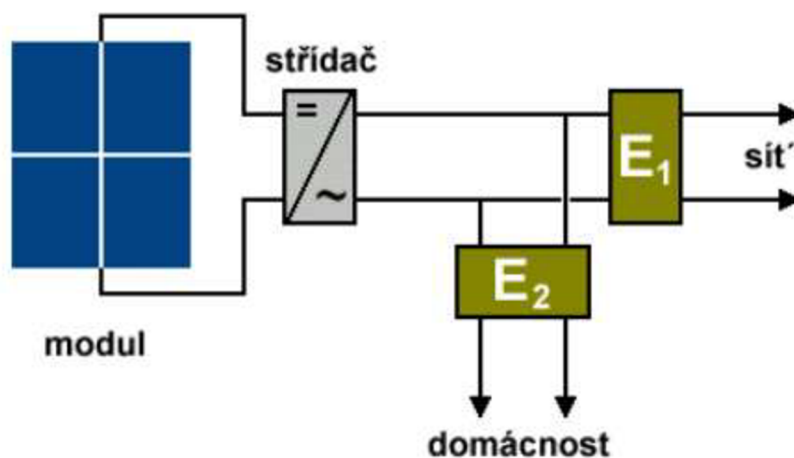


Obr. 2.3: Autonomní FV systém.

2.3.3 Fotovoltaický systém spojený se sítí

Oproti autonomnímu fotovoltaickému systému je spojen s rozvodnou sítí. Označujeme ho tedy jako systém „grid on“. Zdrojem jsou velké fotovoltaické systémy spojeny se střídači (měniči) a následně s rozvodnou sítí. Stejnoseměrné napětí musíme nejprve pomocí měniče transformovat na střídavé napětí sítě (230 V/50 Hz).

Tento systém dokáže pracovat i bez sluneční energie. Jako záložní zdroj využívá distribuční síť. Jakmile je dostatek slunečního světla, systém využívá energii ze solárních panelů. Při nedostatku slunečního záření a v noci systém napájí domácnost z distribuční sítě. Pomocí elektroměrů E_1 a E_2 měříme odebranou nebo odevzdanou energii rozvodné sítě.



Obr. 2.4: Fotovoltaický systém spojený se sítí.

2.4 Výroba a typy fotovoltaických článků

V současné době jsou nejvíce rozšířeny fotovoltaické články vyráběné na bázi křemíku. Křemík jako materiál pro výrobu článku je velmi výhodný. V zemské kůře je to jeden z nejrozšířenějších prvků. Z toho vyplývá, že je snadno dostupný, a tudíž i relativně levný. Nalezneme ho ve formě oxidu křemičitého SiO_2 neboli křemene. Je chemicky stabilní, mechanicky odolný a jeho drobná zrnka tvoří známý křemenný písek, který se využívá pro své piezoelektrické vlastnosti v oscilátorech, filtrech a převodnicích. Navíc není jedovatý.



Obr. 2.5: Křemík jako základní surovina. [10]

Podle struktury křemíku rozlišujeme fotovoltaické články monokrystalické, polykrystalické a tenkovrstvé (amorfní). Dále lze rozlišovat články na bázi organických polymerních vrstev nebo nanovláken a na bázi GaAS (Arsenid gallitý). Články na bázi organických polymerních vrstev nebo nanovláken jsou sice levnější, ale na úkor nižší účinnosti přeměny energie. Naopak články na bázi arsenidu gallitého mají účinnost přeměny energie větší, ale jsou mnohonásobně dražší. Takové články ve formě fotovoltaických panelů nalezneme ve speciálních aplikacích (ve vesmíru). [9]

Tab. 2.1: Srovnání účinnosti jednotlivých technologií fotovoltaických článků. [8]

Technologie	Nejlepší články	Nejlepší panely	Výrobce
Monokrystalický křemík	25	19,3	SunPower 315
Polykrystalický křemík křemík	20,4	14,4	Suntech STP 280-24
Tenkovrstvý křemík (amorfní)	11,7	8,5	Sharp NA-901-WP

2.4.1 Výroba křemíku

Surový křemík se vyrábí z písku v obloukové peci redukcí uhlíkem. Do pece se shora kontinuálně dopravuje písek smíchaný s mletým koksem. V jednotlivých úrovních pece probíhají chemické reakce. Nejvyšší teplota je na spodu pece asi přibližně $T \approx 2\,000\text{ °C}$. V této spodní zóně pece se kumuluje roztavený křemík, který se pravidelně odebírá.



Obr. 2.6: Ingoty (polotovary) křemíku o různých průměrech. [9]

Čistota takto získaného křemíku dosahuje 99 %. Zbylé procento nečistot tvoří příměsi uhlíku, železa a hliníku. To však pro polovodičovou výrobu nestačí, potřebujeme surový křemík vyčistit abychom vytvořili finální polotovar. Pro výrobu integrovaných obvodů je žádána nečistota řádově 10^{-9} . Na výrobu fotovoltaických článků nám postačí i nižší čistota řádově nečistota 10^{-6} . Takových čistot dosáhneme převodem na kapalnou fázi a následnou destilací. V současnosti se nejvíc používá technologie čištění křemíku od firmy Siemens s chlоровým cyklem. Křemík se následně vytahuje na požadovaný tvar polotovaru pomocí Czochralského technologie. [9]

2.4.2 Monokrystalický fotovoltaický článek

Monokrystalický křemík získáváme z křemíku polykrystalického Czochralskou metodou. Při metodě dochází k znečišťování monokrystalu elektricky aktivními částicemi (nečistotami). Vznikají taky bodové defekty a shluky bodových defektů mřížky. V nejideálnějším případě bychom měli použít co nejčistší křemík. Čištění křemíku je však energeticky, a tedy i finančně velmi náročné. Pro dosažení nižší ceny výroby můžeme použít i křemík znečištěný drobnými nečistotami. Tyto drobné nečistoty jsou rozptýlené po celé ploše článku. Fotony a elektrony do těchto nečistot narážejí a snižují tak účinnost článku. Při použití špinavého křemíku se nečistý roztavený křemík velmi pomalu

ochlazuje. Dojde tak k vykryštalizování nečistot ve větších kusech. Fotony s elektrony tak mají volnější průchod a článek je účinnější. Pomalým ochlazením vznikají také větší krystaly křemíku, což taky přispívá k vyšší účinnosti. [11]

U dnešních běžně používaných monokrystalických solárních článků se účinnost pohybuje v rozmezí 15–18 %. Rozměr článku se obvykle řeže na rozměr 156 x 156 mm. Při správném osvětlení má monokrystal větší výtěžnost výkonu ze stejné plochy. Křemík monokrystalického článku stárne pomaleji a probarvení článků je homogenní. [11]

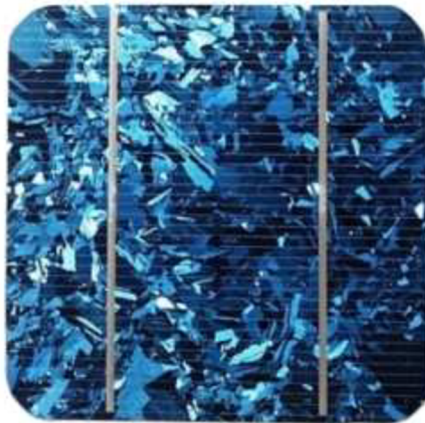


Obr. 2.7: Monokrystalický fotovoltaický článek.

2.4.3 Polykrystalický fotovoltaický článek

Výroba článků začíná nalitím roztaveného polykrystalického křemíku do takzvané kokily. Kokila je nádoba z kovu, do níž se odlévá surové železo, ocel, slitina nebo jiný kov. Vzniklé ingoty se stejně jako u monokrystalu povrchově opracují a nařežou na desky. Obecně se výroba monokrystalických článků spojuje s menší ekonomickou náročností výroby. Křemík nedosahuje velké čistoty a články mají nižší účinnost. To se nahrazuje výrobou křemíku s co největšími krystaly. [11]

Oproti monokrystalu má polykrystalický článek nepatrně větší výtěžnost výroby z rozptýleného světla (nepříznivé světelné podmínky). Účinnost polykrystalu je někde mezi 13 až 16 %. Rozměr bývá stejný jako u monokrystalu 156 x 156 mm. Můžeme pozorovat viditelné přechody mezi krystaly. [11]



Obr. 2.8: Polykrystalický fotovoltaický článek.

2.4.4 Tenkovrstvý amorfní fotovoltaický

Především z ekonomických důvodů se dnes intenzivně vyvíjí tenkovrstvé solární články. Na jejich výrobu je totiž potřeba podstatně méně polovodičového materiálu. Tloušťka monokrystalického článku dosahuje okolo 300 μm , zatímco tenkovrstvé 1 μm . Úspora materiálu je tedy značná, avšak na úkor účinnosti. Účinnost tenkovrstvého solárního článku z amorfního křemíku dosahuje okolo 10 %. [11]

Amorfní křemík je velmi vhodný materiál pro výrobu tenkovrstvých solárních článků. Má totiž velký absorpční koeficient a umožňuje nanášení stabilní tenké vrstvy s velkou účinností fotovoltaické přeměny. Amorfní křemík, občas v kombinaci s mikrokrystalickým křemíkem, se nanáší technologií napařování nebo napařování. [11]



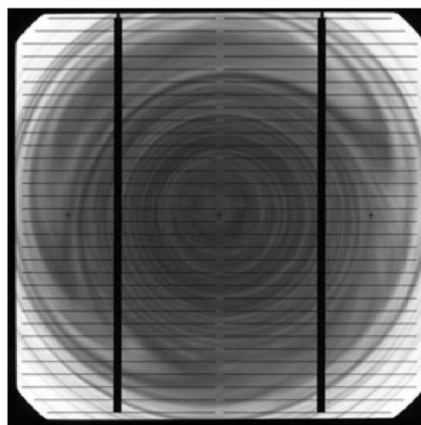
Obr. 2.9: Tenkovrstvý fotovoltaický článek.

3 DEFEKTY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, čistota křemíku je pro výrobu fotovoltaických článků velmi důležitá. Defekty fotovoltaických článků mohou vznikat právě díky těmto nečistotám při výrobě křemíku nebo při procesu výroby samotných článků. Rozlišujeme tak defekty materiálové (Grow Defects) a defekty procesní (Processing Induced Defects). Takový defekt můžeme popsat jako poruchu krystalické mřížky, která negativně ovlivňuje elektrické vlastnosti křemíkových solárních článků. [12]

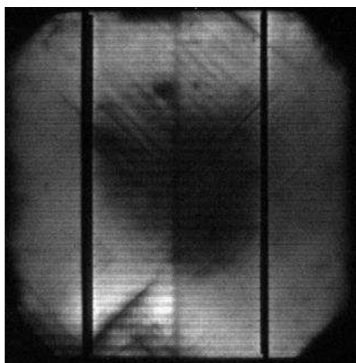
3.1 Materiálové defekty (Grow Defects)

Vznikají již při samotné výrobě ingotu křemíku. Nejčastěji detekovaný materiálový defekt je tzv. vírový defekt (Swirl Defect). Vzniká při výrobě ingotu Czochralského metodou. Při rotačním pohybu ingotu se do něj dostanou příměsi a vytvoří tak soustředné kružnice. Defekt je velmi zásadní, protože kružnice často zasáhnou celou plochu ingotu, a tím znehodnotí velký počet článků. [12]



Obr. 3.1: Vírový defekt solárního článku. [12]

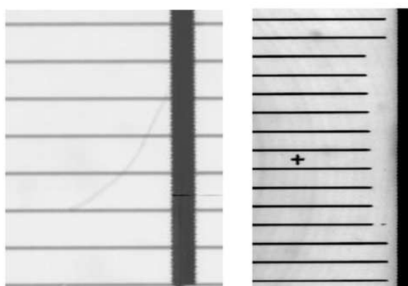
Jako další defekt vznikající již při samotné výrobě křemíku můžeme zmínit defekt vnitřního pnutí. Vzniká také při výrobě Czochralského metodou, kdy ingot narůstá příliš rychle důsledkem špatného řízení procesu. Vada na ingotu může při výrobě ovlivnit více článků jdoucích po sobě. [12]



Obr. 3.2: Defekt vnitřního pnutí solárního článku. [5]

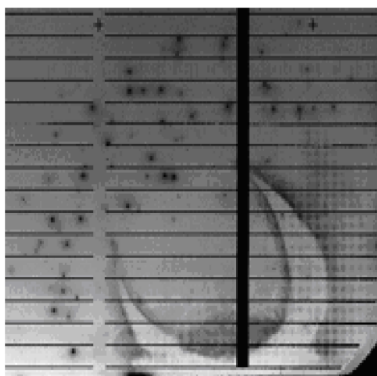
3.2 Procesní defekty (Processing Induced Defects)

Nejčastěji vznikají nevhodnou manipulací se samotným solárním článkem. Defekty negativně ovlivňují PN přechod článku. Jedná se především o mechanické poškození (odštípnutí okraje článku, chyba metalizace, neobroušené hrany).



Obr. 3.3: Mechanické poškození a chybná metalizace solárního článku. [12]

Dalším procesním defektem může být nehomogenita difúzní vrstvy vznikající během procesu difúze. [12]



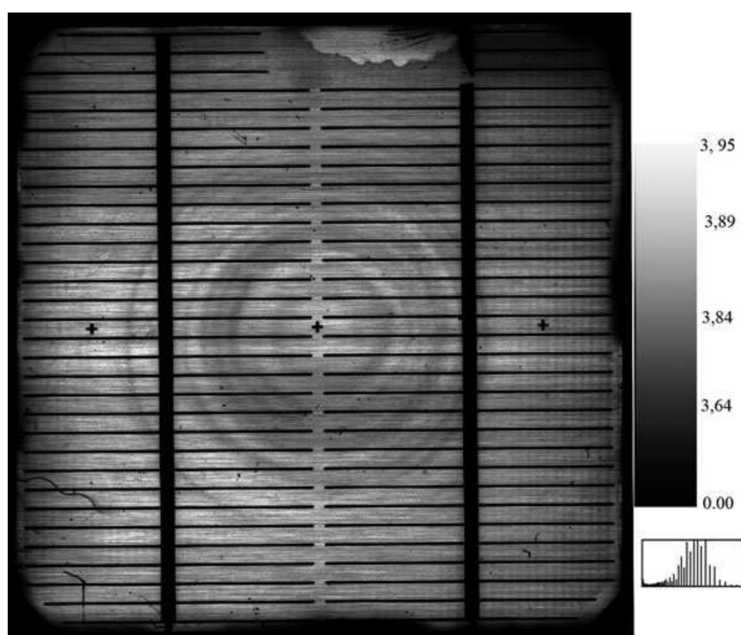
Obr. 3.4: Defekt vzniklý nehomogenitou difúzní vrstvy. [12]

3.3 Metody detekce defektů fotovoltaických článků

Pro základní vyhodnocení stavu solárních panelů nám postačí vyhodnocení U-I charakteristik a jejich účinností při standardních testovacích podmínkách (STC). Standardní testovací podmínky se vyznačují intenzitou záření 1000 W/m^2 a teplotou $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Vyhodnotíme tak základní parametry článku, které porovnáme s jmenovitými hodnotami. Liší-li se naměřená hodnota fotovoltaického článku od hodnoty jmenovité, nachází se ve struktuře solárního článku defekt. Dokážeme tedy detekovat defekt solárního článku, ale nedokážeme určit příčinu vzniku defektu. Pro detekci příčiny vzniku defektů solárních článků musíme použít sofistikovanějších metod popsanych v následujících podkapitolách.

3.3.1 LBIC (Light Beam Induced Current)

Jedná se o univerzální metodu pro detekci lokálních defektů ve struktuře solárních článků. Běžně se pomocí ní detekují materiálové, optické a elektrické defekty článků. Princip spočívá ve skenování prostorového rozdělení proudové odezvy solárního článku. Laserový paprsek se zaostří na zkoumaný vzorek a proudová odezva článku se se přenáší do počítače. Získáme tak bodovou plošnou XY charakteristiku rozložení proudu v článku. Ze vzniklé charakteristiky (proudové mapy) pak určíme lokální defekty. Kvalita a přesnost proudových map lze ovlivnit druhem použitého světelného zdroje, zaostřením, hloubkou vniku (vlnová délka) a v poslední řadě krokem detekce. [15]

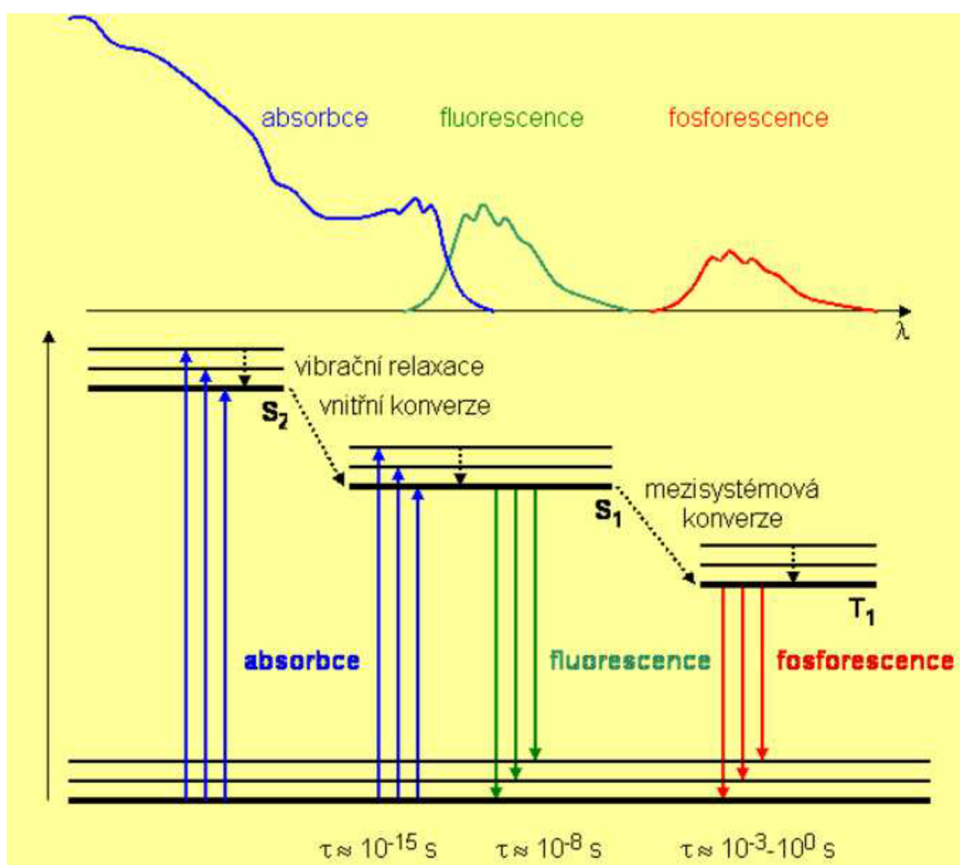


Obr. 3.5: Analýza výstupních proudů metodou LBIC v lineární škále odstínu šedé. [15]

Hlavní výhodou LBIC metody je velmi přesná detekce defektů. Skenování článků metodou LBIC je však velmi časově nákladné. Podle přesnosti (kroku detekce) může skenování každého jednotlivého článku trvat až několik hodin. Kromě měření proudové odezvy můžeme snímat napěťovou odezvu článku. Taková metoda se pak nazývá LBIV (Light Beam Induced Power). Známa je taky metoda LBIP (Light Beam Induced Power) neboli nastavování pracovního bodu měřených veličin do místa maximálního výkonu. [15]

3.4 Luminiscenční metody detekce defektů fotovoltaických článků

Luminiscence je odvozena z latinského slova lumen neboli světlo. Jedná se o samovolné záření látek kapalného nebo pevného skupenství. V podstatě záření o větší frekvenci (kratší vlnové délce) vyvolává v látce vznik záření o nižší frekvenci (delší vlnové délce). Soustava se do takového stavu dostává samovolně bez působení vnějšího elektromagnetického pole. [13]



Obr. 3.6: Zářivé a nezářivé přechody mezi elektronově vibračními stavy složité molekuly. [14]

Jako první slovo luminiscence použil vědec E. Wiedemann roku 1888. Označoval tak veškeré záření nesouvisící s vzrůstem teploty. Sergey Ivanovich Vavilov ji definoval jako přebytek záření tělesa nad úrovní jeho teplotního záření při dané teplotě a dané spektrální oblasti. Luminiscence je tedy opak inkandescence (tepelného záření). Rozlišujeme luminiscenční záření tělesa jako je UV, VIS, IR, které představují přebytek nad tepelným rovnovážným zářením tělesa. Záření má dlouhou, ale konečnou dobu trvání a mezi procesem excitace a emise jsou přechodové děje. [13]

Luminiscenci dělíme na:

- **Fluorescenci** – Luminiscence, která dohasne téměř ihned (ns) po odstranění zdroje excitace.
- **Zpožděnou fluorescenci** – Stejně zářivý přechod jako u fluorescence, avšak s delší dobou dohasínání. Doba dohasínání je přibližně stejná době dohasínání fosforescence měřené za stejných podmínek.
- **Fosforescenci** – Zářivý přechod z vyššího do energeticky nižšího stavu.

Luminiscenci můžeme taktéž rozdělit podle druhu budící energie na:

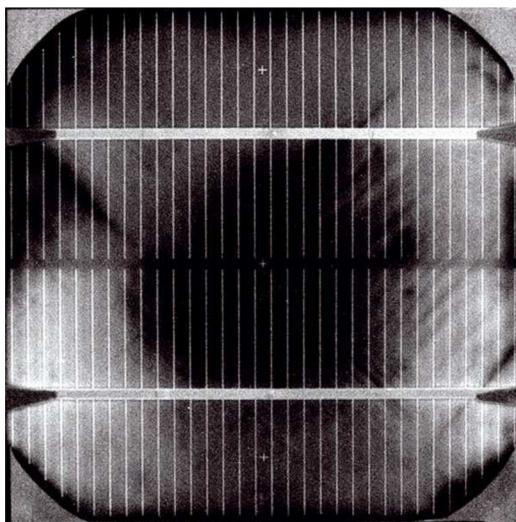
- **Elektroluminiscenci** – Průchodem elektrického proudu, působením el. pole.
- **Fotoluminiscenci** – Buzená UV, VIS, NIR světlem.
- **Radioluminiscenci** – Buzená částicemi α , β nebo zářením γ (scintilátory).
- **Bioluminiscenci** – Záření organismů.
- **Sonoluminiscence** – Buzená ultrazvukem.
- **Rentgenoluminiscence** – Buzená fotony RTG záření.

3.4.1 Elektroluminiscence

Metoda detekování defektů solárních článků pomocí elektroluminiscence je založena na emitování světelného záření při průchodu elektrického proudu článkem v propustném směru. Je to metoda optická. Metoda umožňuje detekci jak procesních, tak materiálových defektů. Princip spočívá v detekování emise světla článku napájeného konstantním proudem v zatemněném prostoru běžně dostupnou CCD, CMOS kamerou. [15]

Průchodem elektrického proudu se aktivuje PN přechod a vlivem zářivé rekombinace křemíku dojde k emitování světla. V ideálním případě by měl článek vykazovat konstantní proudovou hustotu neboli vyzářené světlo by mělo být na všech

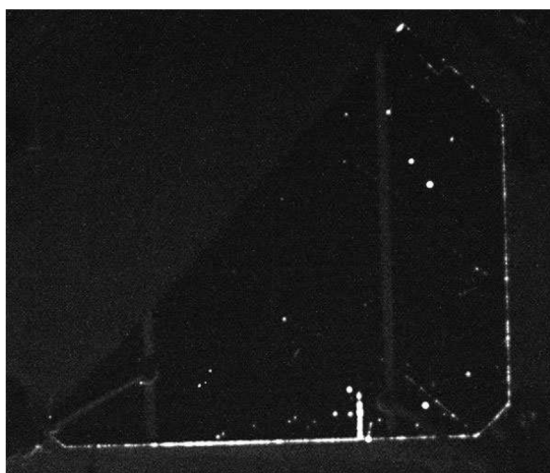
místech stejné. Vyobrazení článků se provádí v odstínech šedé. Defekty (nehomogenita difúzní vrstvy P-N přechodu, nepravidelnost struktury monokrystalu) se projevují tmavším vyobrazením. Místa s největší proudovou hustotou mají největší intenzitu záření. [15]



Obr. 3.7: Detekce defektu materiálového pnutí pomocí elektroluminiscence. [15]

3.4.2 Luminiscence mikroplazmy

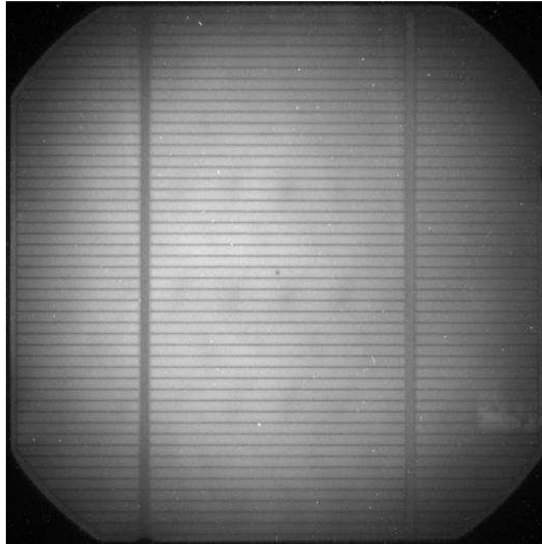
Metoda je založena na stejném principu jako u metody elektroluminiscence. Článek je zapojen v závěrném směru a poškozená místa (nedokonalosti v krystalické mřížce) se opět snímají CCD (CMOS) kamerou. Poškozená místa se projevují jako body o vyšší teplotě a na CCD (CMOS) kameře jasně svítí. [15]



Obr. 3.8: Detekce defektů pomocí luminiscence mikroplazmy. [15]

3.4.3 Fotoluminiscence

Tato metoda se od ostatních liší tím, že luminiscenční záření nebudíme elektrickým proudem, ale vnějším světelným zdrojem. Jako vnější budící světelný zdroj využíváme nejčastěji laser nebo LED diody. Při použití laseru se bavíme o bodovém buzení a u LED diod o celoplošném buzení. Podle typu buzení použijeme speciální CCD kameru pro celoplošnou nebo bodovou detekci. [15]



Obr. 3.9: Detekce defektů pomocí fotoluminiscence. [5]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Detekce defektů stávající CCD kamerou

Současné řešení systému detekce defektů fotovoltaických článků pracuje s CCD kamerou od firmy Moravské přístroje. Kamera využívá vysoce citlivý, nízko šumový Full-Frame CCD čip Kodak KAF-3200ME o rozlišení 3,2 Mpix. Kamera disponuje dvoustupňovým chlazením s Peletierovými články, které udržují čip hluboce zmrazený pro minimalizaci tepelného šumu.



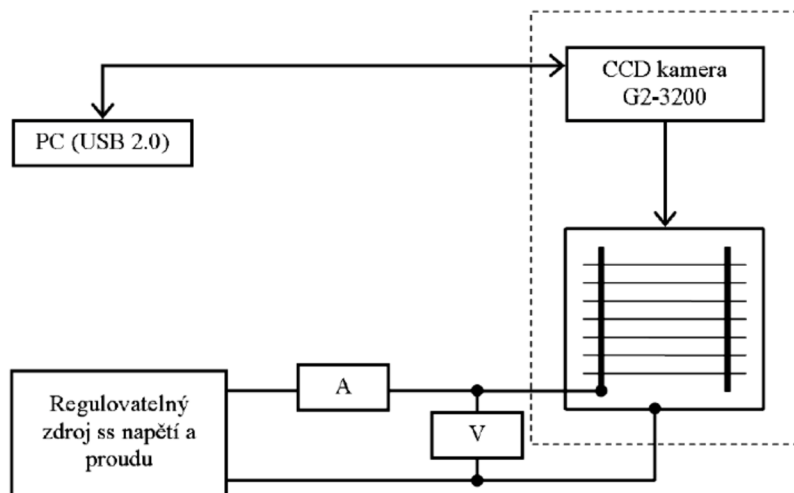
Obr. 4.1: Kamera Moravské přístroje KAF – 3200ME.

Kamera pracuje ve spojení s objektivem Canon Zoom Lens EF s ohniskovou vzdáleností 28–80 mm. Objektiv disponuje funkcí automatického zaostření (AF), která však nelze kombinovat s použitou kamerou.



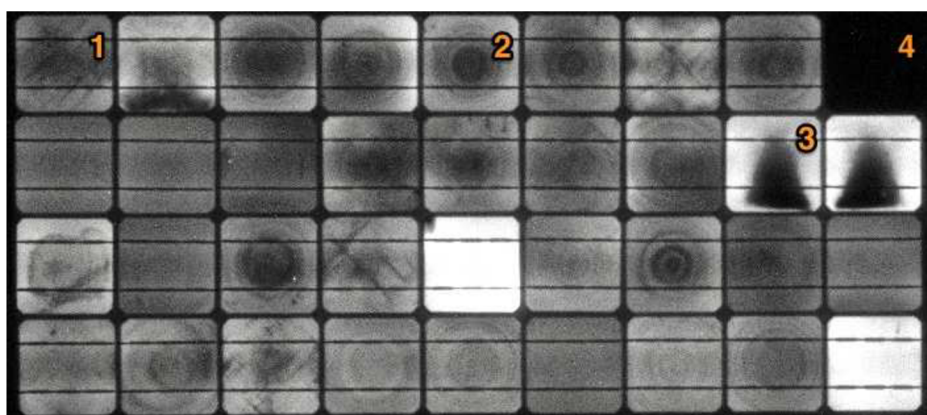
Obr. 4.2: Kamera Moravské přístroje KAF – 3200ME s objektivem.

V praktické části práce jsme zkoumali defekty dvou různých panelů metodou elektroluminiscence pomocí CCD kamery. První panel byl klasický fotovoltaický panel z monokrystalu křemíku. Druhý panel byl složen z polykrystalického křemíku. Nejprve jsme sestavili měřící pracoviště podle blokového schématu na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Blokové schéma zapojení pracoviště pro metodu elektroluminiscence. [12]

Jako první jsme proměřili článek vyrobený z monokrystalického křemíku. Článek jsme zapojili k regulovatelnému zdroji v zatemněné místnosti. Následně jsme pomocí objektivu CCD kamery zaostřili fotovoltaický panel na požadovanou ostrost. Výsledný snímek jsme přenesli do počítače a vyhodnotili defekty viz obrázek 4.4.



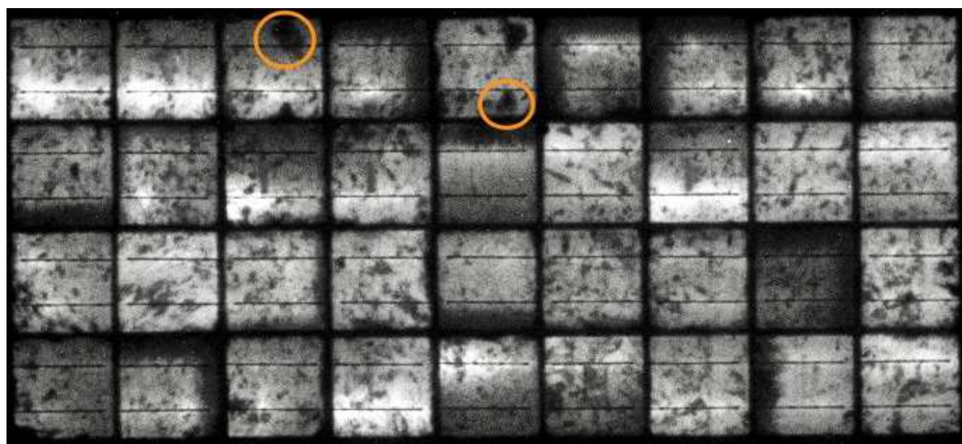
Obr. 4.4: Defekty monokrystalického článku zkoumané metodou elektroluminiscence.

Zkoumaný fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku je výrazně zasažen velkým množstvím defektů. Některé z typů defektů se na fotovoltaickém panelu opakují.

Můžeme zde tedy pozorovat druhy defektů jako:

- [1] Materiálový defekt vnitřního pnutí v křemíku
- [2] Materiálový vírový defekt
- [3] Výrazný materiálový defekt vnitřního pnutí v křemíku
- [4] Procesní defekt nenakontaktování článku

Následující fotovoltaický panel byl vyroben z polykrystalického křemíku. Na obrázku 4.5 můžeme vidět jeho vyobrazení metodou elektroluminiscence. Lze zde pozorovat poškození jednotlivých článků hlavně degradací materiálu vlivem stárnutí, ale i výrazné materiálové pnutí. Článek byl opět snímán CCD kamerou při přiloženém stejnosměrném napětí v dokonale zatemněné místnosti.



Obr. 4.5: Defekty polykrystalického článku zkoumané metodou elektroluminiscence.

Elektroluminiscenční metoda měření defektů fotovoltaických panelů je velmi efektivní hlavně z hlediska rychlosti vyhodnocení. Námi použitá CCD kamera nedokáže pracovat s funkcí objektivu AF (autofocus). Ostření zkoumaného článku jsme tak museli provádět ručně v režimu MF (manualfocus). Toto řešení značně zpomaluje jinak velmi rychlou elektroluminiscenční metodu detekce vad fotovoltaických panelů.

4.2 Výběr nízkonákladové komerční kamery

Při výběru nízkonákladové komerční kamery jsme zohledňovali několik kritérií. Jedním z hlavních byla nenáročnost úpravy na plnospektrální snímání. Dále jsme zohledňovali snadný přenos snímků do PC a jejich vyhodnocení. Na základě těchto kritérií jsme udělali výběr z běžně dostupných webových a outdoorových kamer. Všechny kamery jsme

vybírali s rozhraním USB. Výběr jednotlivých kamer a jejich parametrů je znázorněn v následující tabulce.

Tab. 4.1: Parametry vybíraných kamer.

Typ	Rozlišení videa [px]	Rozlišení fotky [Mpix]	Typ snímače	Cena [Kč]
Logitech HD Pro Webcam C920	1920 x 1080	8	CMOS	2200
Logitech Webcam C930e	1920 x 1080	10	CMOS	3100
SJCAM SJ4000	1920 x 1080	12	CMOS	1900
GoPro HERO4	1440 x 1080	8	CCD	6500
Auna ProExtrem	1920 x 1080	12	CMOS	2700

Komparací jednotlivých parametrů kamer nám v porovnání cena ku výkonu nejlépe vyšla outdoorová kamera SJCAM SJ4000. Snímání obstarává snímací čip Aptina AR0330 technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). O zpracování dat se stará procesor Novatek NT96650. Objektiv je osazen širokouhlou čočkou 170°A a clonou 6G, kdy světelnost objektivu dosahuje F=2.8 a je schopen dosáhnout čtyřnásobného digitálního zvětšení.



Obr. 4.6: Kamera SJCAM SJ4000.

4.3 Úprava kamery na plnospektrální snímání

V každém běžně dostupném fotoaparátu či kameře nalezneme filtr blokující infračervené záření. Filtr je běžně umístěn těsně před snímacím čipem nebo přímo na objektivu. Přidáním filtru do zařízení zajistíme to, že výsledná fotografie bude zaznamenána stejně jako bychom se na snímání obraz dívali lidským okem, tedy jen ve viditelném spektru. Jako viditelné spektrum pro lidské oko označujeme elektromagnetické záření v rozmezí vlnových délek 380-760 nm. Pro naše měření defektů solárních panelů metodou elektroluminiscence je odstranění filtru blokujícího infračervené záření nutností. Postup odstranění filtru z kamery SJCAM SJ4000 je popsán níže.

Nejdříve jsme z kamery sejmuli přední kryt. Ten jsme odstranili vhodným nástrojem, aby nedošlo k jeho poškození viz obrázek 4.7.



Obr. 4.7: Odstranění předního krytu kamery.



Obr. 4.8: Kamera s odstraněným předním krytem.

Po odstranění předního krytu můžeme vidět desku plošného spoje se zapínacím tlačítkem. Naším cílem však byla demontáž objektivu, na jehož zadní straně se nachází filtr blokující infračervené světlo. Jelikož se jedná o kameru zkonstruovanou pro odolávání otřesů nachází se po obvodu objektivu kroužek zajišťující jeho stabilitu. Kroužek není nijak zvlášť zajištěn, takže jsme pro jeho vyjmutí použili opět stejný nástroj jako při demontáži předního krytu kamery.



Obr. 4.9: Odstranění aretačního kroužku objektivu.

V této fázi je kamera připravena na demontáž objektivu. Objektiv je usazen do těla kamery pomocí metrického závitu, což umožňuje jeho snadné vyjmutí otáčením proti směru hodinových ručiček. Při šroubování jsme museli překonat sílu aretačního lepidla na závitu, které udržuje objektiv v ideální ohniskové vzdálenosti od čipu.

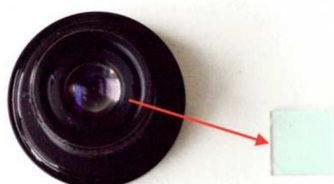


Obr. 4.10: Kamera s demontovaným objektivem.

Nyní můžeme vidět filtr blokující infračervené záření ze spodní strany objektivu, který je zde připevněn pomocí lepidla. Filtr jsme odstranili šetrným nahřátí lepidla a jemným podebráním vhodným nástrojem.



Obr. 4.11: IR filtr umístěný na zadní straně objektivu.



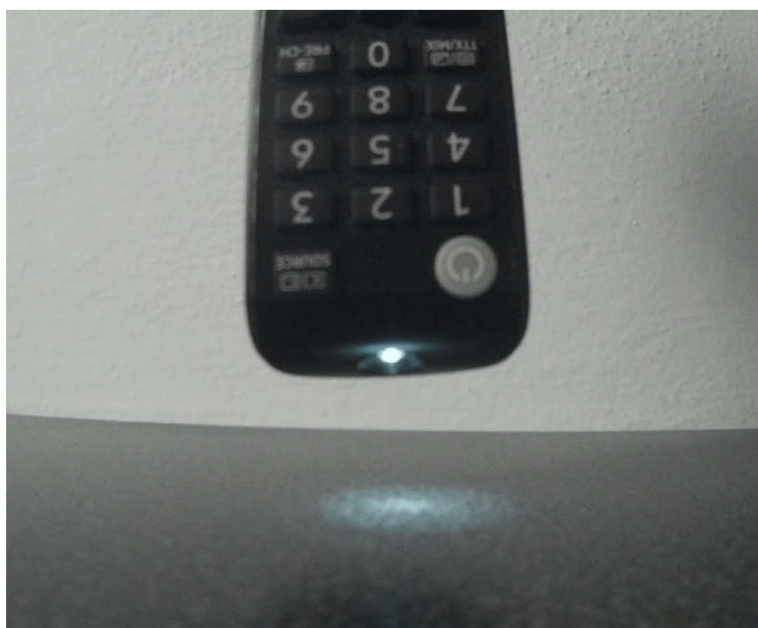
Obr. 4.12: Objektiv s odstraněným IR filtrem.

Objektiv s odstraněným filtrem jsme našroubovali zpět do těla kamery a pootočili jej do ideální ohniskové vzdálenosti od čipu tak, aby obraz kamery byl ostrý. Umístili jsme zpět i aretační kroužek a přední kryt kamery. Nyní jsme ověřili, jestli kamera snímá v oblasti infračerveného světla vyfotografováním fotografie přes filtr propouštějící pouze infračervené záření.



Obr. 4.13: Fotografie s odstraněným IR filtrem.

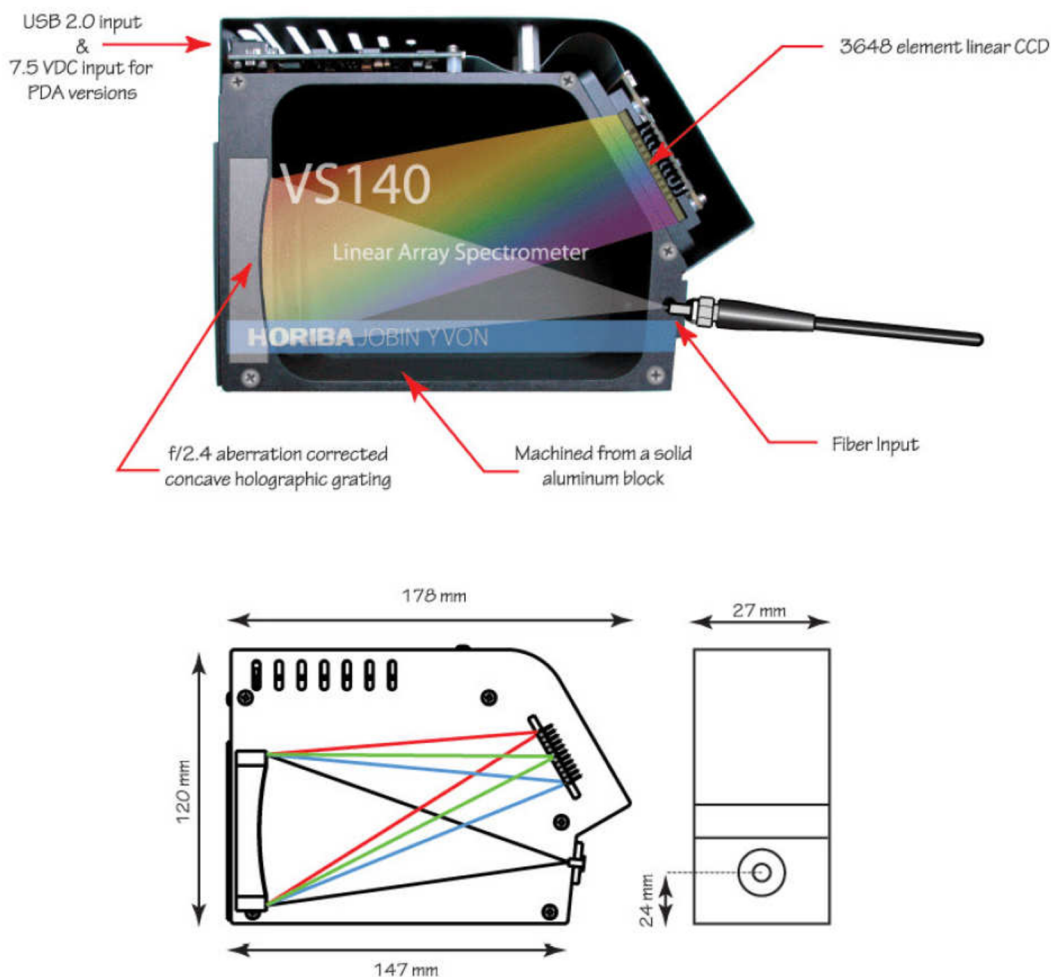
Z fotografie je zřejmá citlivost kamery na infračervené záření. Citlivost kamery na infračervené světlo lze taky snadno ověřit na dálkovém ovladači se zabudovanou infračervenou LED diodou. Běžným okem na infračervené LED diodě nepozorujeme žádné světlo. Světlo lze slabě zahlédnout běžným fotoaparátům a při odstranění infračerveného filtru uvidíme světlo z LED diody v plné síle.



Obr. 4.14: Infračervená dioda na dálkovém TV ovládání.

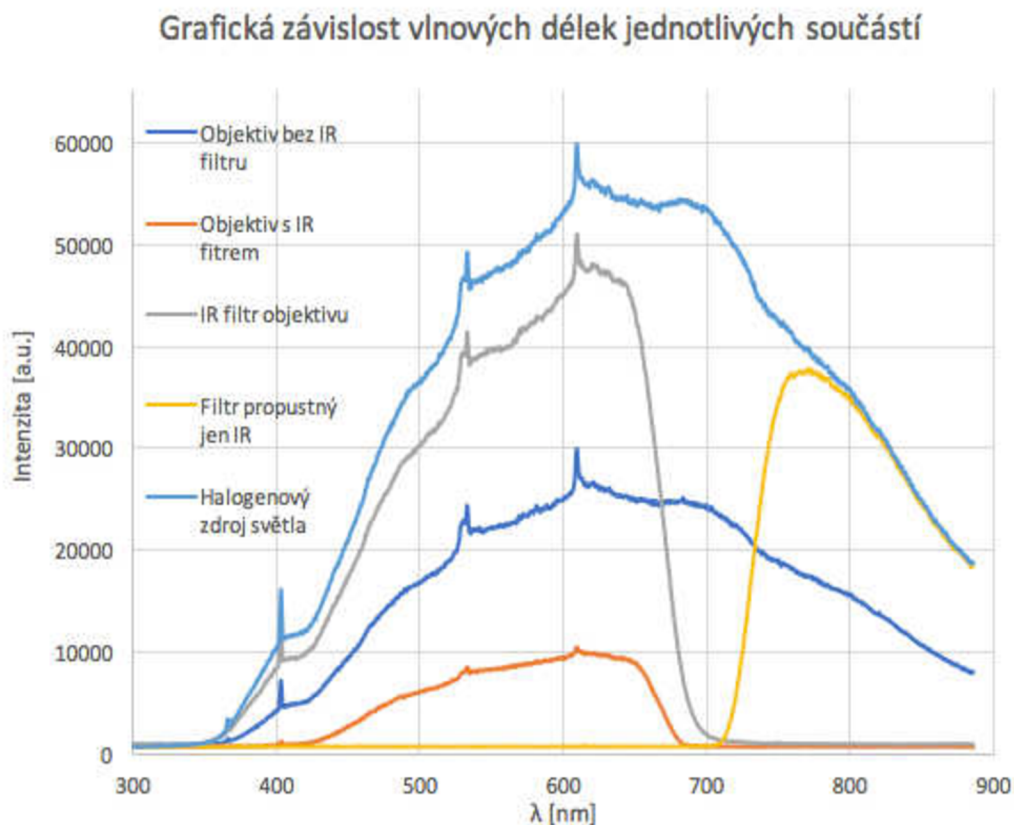
4.4 Měření jednotlivých součástí pomocí spektrometru

V další části práce jsme proměřili jednotlivé součásti kamery pomocí spektrometru a zjistili tak jejich jednotlivé vlnové délky. Pro měření jsme použili lineární spektrometr VS140 od firmy HORIBA JOBIN YVON. Optický systém uvnitř spektrometru má ohniskovou vzdálenost 140 mm a účinnou světelnost objektivu $f/2.4$. O snímání obrazové informace se stará lineární CCD čip o rozlišení 3864 pixelů a rozměru $8 \times 200 \mu\text{m}$. Přenos informací probíhá pomocí rozhraní USB 2.0 do PC. O zpracování informací v reálném čase se stará Lynear software vytvořený přímo pro účely měření spektrometrem VS140. Lynear software dokáže data ukládat do textových souborů, exportovat do programu excel nebo vytvořit přímo graf do dokumentu pdf.



Obr. 4.15: Schéma spektrometru VS140.

Měření jsme prováděli přes odraznou bílou plochu za pomoci halogenového zdroje světla. Mezi odražené světlo a detektor spektrometru jsme vložili měřený vzorek. Data jsme zpracovali pomocí softwaru Lyneax. Následně jsme data vyexportovali do programu Excel a vytvořili grafickou závislost.



Obr. 4.16: Grafická závislost vlnových délek jednotlivých součástí.

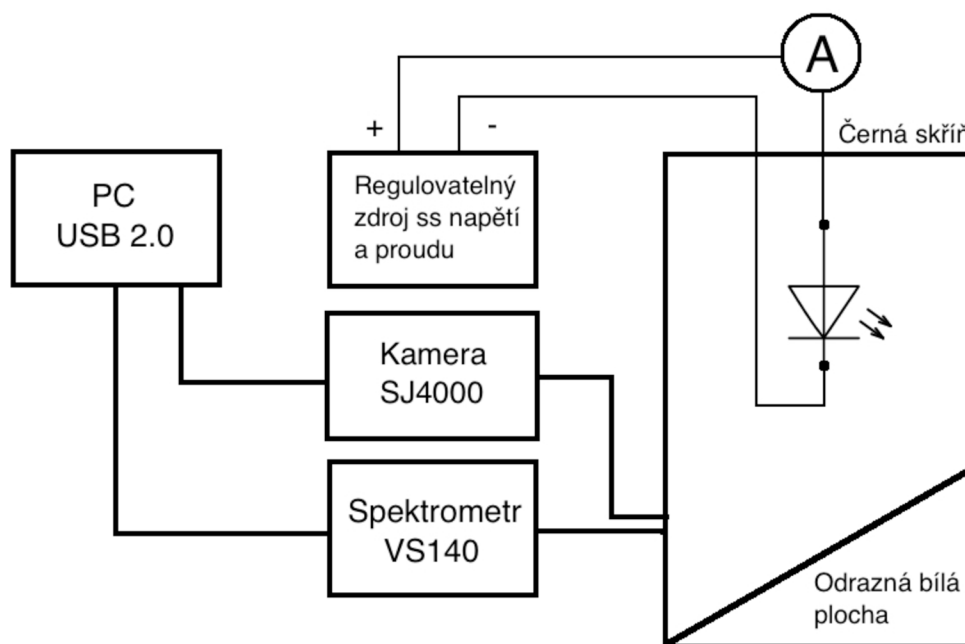
Jednotlivé vzorky jsme porovnávali na základě naměřených vlnových délek ku intenzitě zdrojového světla. Pro intenzitu světla jsme použili relativní měrnou jednotku, takzvanou arbitrary unit, což v doslovném překladu znamená libovolná jednotka. Tato jednotka se hojně využívá pro zobrazení poměru množství látky nebo jako v našem případě intenzity nebo jiných veličin k předem stanovenému referenčnímu měření.

Nejvyšší intenzity světla dosahoval samozřejmě samotný halogenový zdroj, jehož elektromagnetické záření bylo měřitelné od 360 nm. Záření zasahovalo až do infračervené oblasti, kde jsme poslední hodnotu naměřili 880 nm. Při vložení samostatného IR filtru demontovaného z objektivu kamery mezi odraznou plochu a spektrometr intenzita světla mírně klesla. Funkčnost filtru nám potvrdila grafická závislost, z které je zřejmé, že propouští vlnové délky jen ve viditelné oblasti. Nejvyšší hodnotu vlnové délky jsme naměřili 740 nm. Při vložení objektivu bez IR filtru mezi odraznou plochu a snímač

spektrometru se intenzita světla snížila výrazněji. Z grafické závislosti je zřejmé, že objektiv s odstraněným filtrem zasahoval do oblasti infračerveného světla na samou hranici měřitelnosti spektrometru VS140. V oblasti infračerveného záření měl objektiv podobný průběh jako kontrolní vzorek filtru propouštějící jen infračervené světlo. Nejnižší intenzity světla dosahoval objektiv v původním stavu, tudíž s filtrem blokující infračervené záření. Naměřený rozsah vlnové délky od 400 nm po 700 nm nám potvrdil že objektiv propouští světlo pouze ve viditelném spektru.

4.5 Měření citlivosti CMOS čipu kamery

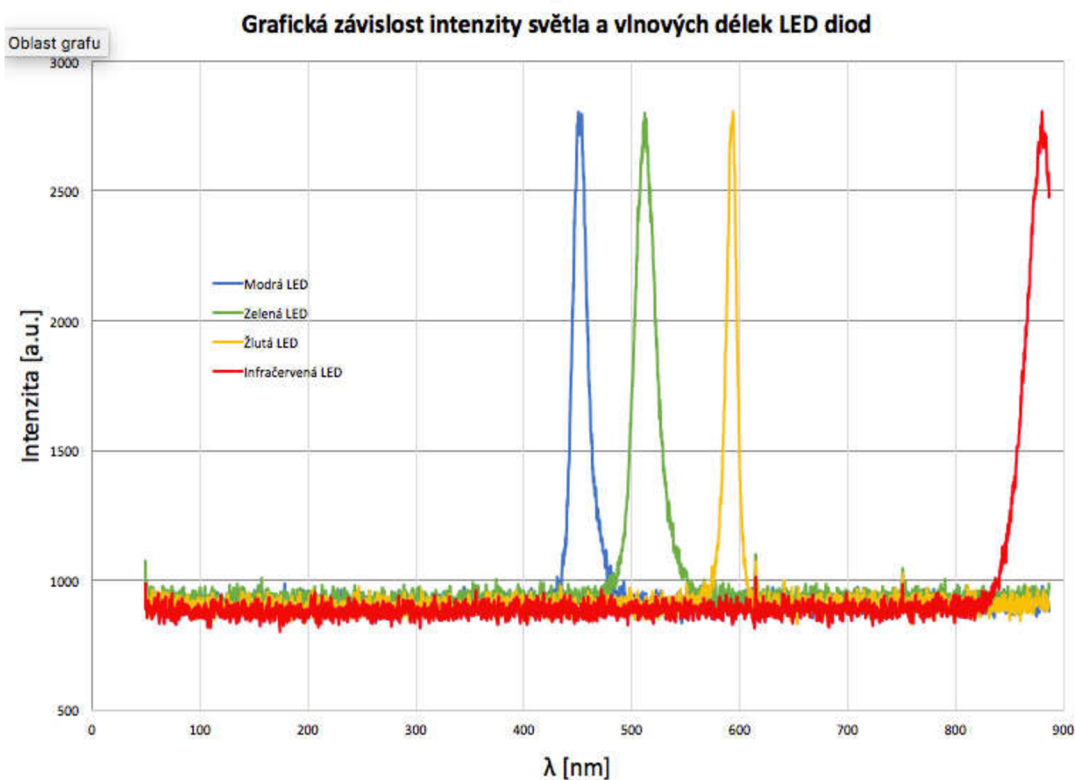
V následujícím měření jsme si ověřili spektrální citlivost CMOS čipu jak ve viditelném spektru, tak v oblasti infračerveného záření. Pro vysokou přesnost měření jsme jej prováděli za pomoci černé skříně, do které nepronikalo rušivé okolní světlo. Blokové schéma zapojení měřicího pracoviště je znázorněno na obrázku 4.17.



Obr. 4.17: Blokové schéma zapojení měřicího pracoviště.

Pro proměření spektrální citlivosti CMOS čipu kamery bez filtru blokujícího infračervené záření jsme si zvolili LED diody o vlnových délkách procházejících viditelným spektrem a jednu o vlnové délce v oblasti infračerveného záření. Diody jsme umístili do černé skříně a napájeli jsme je pomocí regulovatelného zdroje stejnosměrného napětí a proudu. Intenzitu světla odraženého od odrazné bílé plochy jsme snímali

spektrometrem VS140 a vyhodnocovali ji v programu Lyneear. Pro každou diodu jsme nastavili stejnou hodnotu intenzity světla 2800 a.u. viz grafická závislost 4.18. Vlnové délky jednotlivých diod odpovídali katalogovým hodnotám. U infračervené diody nám nestačil rozsah spektrometru VS140.



Obr. 4.18: Grafická závislost intenzity světla a vlnových délek LED diod.

Odražené světlo každé diody jsme vyfotili upravenou kamerou a fotografie upravili na shodnou velikost 100x100 pixelů viz obrázek 4.19.



Obr. 4.19: Odražené světlo LED diod zleva modrá, zelená, žlutá a infračervená.

Vyhodnocení intenzity záření jednotlivých LED diod jsme provedli pomocí programu MATLAB–MathWorks. Zde jsme vytvořili funkci grayImage, která nejprve převede fotografii do odstínu šedí a následně ji pomocí sčítacího vzorce uloží do matice čísel o hodnotě 0-255. Jedná se tedy o 8 bitovou informaci kdy 0 znázorňuje bílou barvu

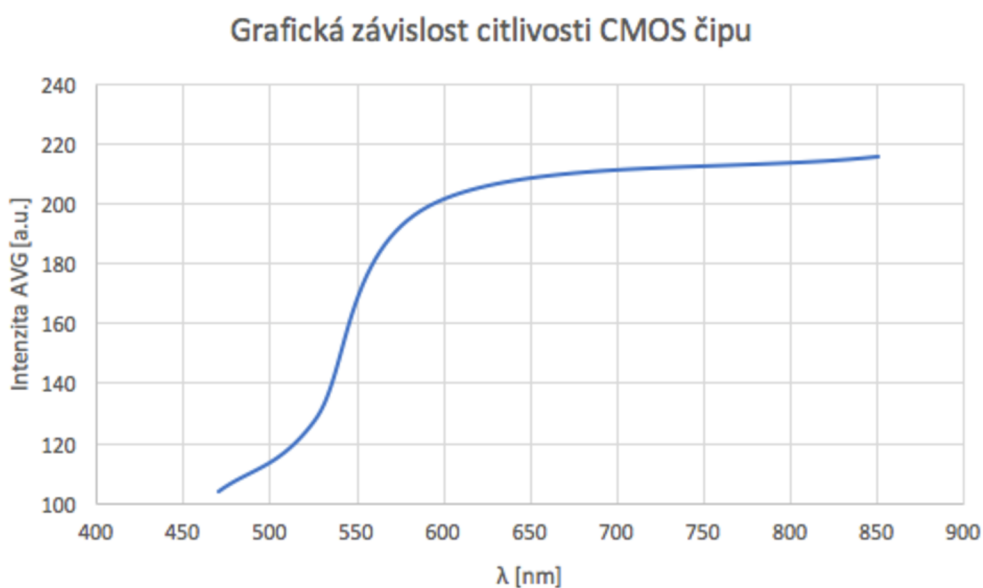
a 255 černou. Funkce však tuto informaci uloží jen do jedné z vrstev RGB škály. Proto jsme si vytvořili pomocnou funkci, která informaci převede do všech třech vrstev a zároveň vytvoří průměrnou hodnotu z matice čísel jednotlivých fotek. Funkci pro převedení fotek do odstínů šedé a sčítací vzorec jsme našli na webu MathWorks a společně s pomocnou funkcí je přiložena v seznamu příloh. [16]

Průměrnou hodnotu z matice jednotlivých fotografií LED diod jsme zaznamenali do tabulky společně s katalogovými hodnotami vlnových délek jednotlivých LED diod.

Tab. 4.2: Naměřené hodnoty citlivosti čipu.

LED Dioda	Intenzita AVG [a.u.]	λ [nm]
Modrá	104,15	470
Zelená	127,51	525
Žlutá	200,37	595
Infračervená	215,72	850

Z naměřených hodnot jsme pomocí programu excel vytvořili grafickou závislost CMOS čipu Aptina AR0330. Ze závislosti jsme vypořizovali, že citlivost čipu stoupá s rostoucí vlnovou délkou. Grafická závislost nám opět potvrdila, že kamera je po úpravě citlivá na infračervené světlo.

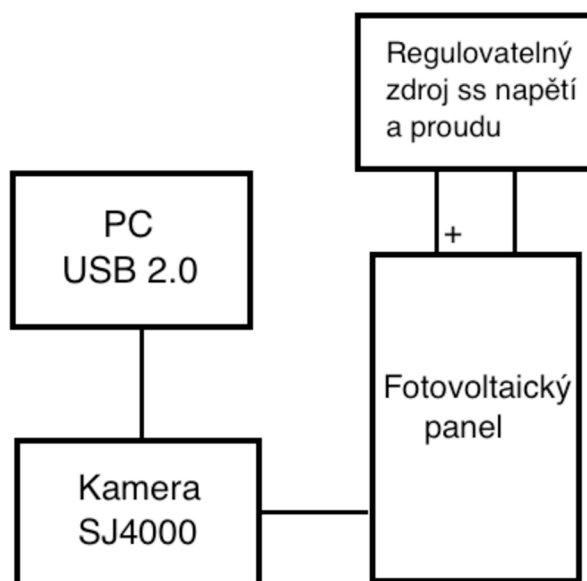


Obr. 4.20: Grafická závislost citlivosti CMOS čipu.

4.6 Detekce defektů upravenou nízkonákladovou kamerou

Měřením jednotlivých součástí kamery spektrometrem jsme si ověřili, že objektiv kamery nebrání prostupnosti infračerveného světla na snímací CMOS čip kamery. Schopnost čipu detekovat infračervené světlo nám potvrdilo měření jeho citlivosti pomocí LED diod.

Po tomto ověření citlivosti kamery na infračervené světlo jsme přešli na elektroluminiscenční metodu detekce defektů fotovoltaických článků. Blokové schéma zapojení je znázorněno na obrázku 4.21.



Obr. 4.21 Blokové schéma měření defektů upravenou kamerou.

Pro eliminaci nežádoucího vnějšího záření jsme měření provedli v temné místnosti. Fotovoltaický panel jsme napájeli regulovatelným zdrojem stejnosměrného napětí a proudu. Panel jsme snímali upravenou kamerou SJ400 a výsledný obraz jsme přenášeli pomocí rozhraní USB 2.0 do počítače.

Měření jsme provedli jak s monokrystalickým, tak s polykrystalickým fotovoltaickým panelem. U obou panelů jsme kamerou zachytili snímek zobrazující pouze černou barvu. I při téměř destruktivním zvýšení napájecího proudu se nám nepodařilo získat elektroluminiscenční obraz defektů fotovoltaického panelu.

Při hlubším zkoumání problematiky a sérii testů snímání fotovoltaických panelů se nám bohužel nepodařilo vyfotografovat snímek zachycující elektroluminiscenci. Důvod, proč námi zvolená a upravená nízkonákladová kamera nedokáže pozorovat elektroluminiscenční záření spočívá v době expozičního času. Námi zvolená kamera

dosahuje expozičního času 1/30 sekundy bez možnosti jiného nastavení. Tento expoziční čas se pro naše řešení ukázal jako nedostačující. Pro detekci elektroluminiscenčního záření panelu, a tudíž i jeho defektů bychom potřebovali nastavit vyšší expoziční časy (řádově sekundy).

5 ZÁVĚR

Diplomová práce se věnuje problematice detekování defektů metodou elektroluminiscence. V úvodní části práce je popsána všeobecná historie fotovoltaiky a její uvedení do praxe. Následně je zde vysvětlen samotný fotoelektrický jev.

Dále se práce věnuje fotovoltaickým článkům z hlediska jejich principu srovnáním výhod a nevýhod. Jedna z největších výhod je využívání obnovitelné a pro naše lidstvo téměř nevyčerpatelné sluneční energie. Další výhodou je zvyšování jejich účinnosti a spolehlivosti a tím snižování doby návratnosti investice. Hlavní nevýhodou je stále nízká účinnost okolo 20 % a závislost na kvalitním slunečním svitu.

Následně jsme popsali výrobu samotného křemíku a nejčastěji používaných typů fotovoltaických článků. Stále nejvýhodnější a nejvíce používaný je článek vyrobený z monokrystalického křemíku. Avšak u výroby elektrické energie z polykrystalu dosahujeme o něco větší výtěžnosti za nepříznivých světelných podmínek.

Hlavní část práce se věnuje defektům fotovoltaických článků. Jsou zde popsány jak materiálové, tak procesní defekty. Nejvíce defektů vzniká při samotné výrobě ingotu Czochralského metodou. Tyto defekty pak dokážou ovlivnit účinnost a spolehlivost článků. Ve stejné kapitole jsou pak popsány metody detekování defektů. Hlavní pozornost je věnována poměrně přesné a rychlé metodě detekování poruch pomocí elektroluminiscence.

V praktické části diplomové práce jsme proměřili monokrystalický a polykrystalický fotovoltaický panel pomocí stávající CCD kamery od firmy Moravské přístroje. Celý systém funguje bezproblémově, ale vzhledem k nutnosti manuálního zaostření každého snímku je časově velmi náročný. Stávající kamera využívá vysoce citlivého nízkošumového Full-Frame CCD čipu, který je navíc kvůli omezení tepelného šumu chlazen dvoustupňovým chlazením s Peletierovými články. Tohle řešení je však vysoce nákladné, řádově desetitisíce korun.

Naším cílem diplomové práce bylo navrhnout levnější systém pro detekci defektů solárních článků pomocí webové nebo jiné nízkonákladové kamery. Samotný výběr kamery byl z hlediska nedostatku informací o osazených CCD či CMOS čipech velmi náročný. Při výběru jsme tedy posuzovali jen základní známe parametry jako je rozlišení videa, rozlišení fotografie, typ snímače a podstatným kritériem byla cena. Podle těchto kritérií nám nejlépe vyšla outdoorová kamera SJCAM SJ4000 osazená snímačem typu CMOS. Pro kameru jsme vytvořili obrázkový návod, který popisuje odstranění IR filtru.

V další části práce jsme pomocí spektrometru VS140 firmy HORIBA JOBIN YVON proměřili jednotlivé součásti kamery. Výsledky měření jsme zpracovali programem Lyneer a vynesli do grafické závislosti. Ze závislosti lze názorně vyčíst chování objektivu s a bez filtru blokujícího infračervené záření.

Pro ověření spektrální citlivosti CMOS čipu jsme si vytvořili měření pomocí LED diod o různých úrovních vlnových délek. Měření jsme prováděli v temné skříni a intenzitu odraženého světla jsme nastavovali na stejnou hodnotu pomocí spektrometru. Pro každou diodu jsme kamerou s odstraněným IR filtrem pořídili snímek. Snímky jsme následně upravili na shodnou velikost. Vyhodnocení pořízených fotografií jsme provedli v programu Matlab. Vytvořili jsme si funkci na převedení snímků do odstínů šedi a následně je převedli do matice čísel o hodnotě 0-255. Z této matice čísel funkce vypočítala průměr intenzity světla jednotlivých diod. Průměrné hodnoty intenzity světla jednotlivých LED diod jsme vynesli do grafu v závislosti na jejich katalogových hodnotách vlnových délek. Vytvořili jsme tak grafickou závislost citlivosti CMOS čipu upravené kamery SJ4000. Citlivost čipu rostla s rostoucí vlnovou délkou a největší průměrnou hodnotu intenzity světla jsme naměřili u infračervené LED diody.

V závěru práce jsme celý systém otestovali na vzorcích fotovoltaických panelů. Přestože jsme celý systém ověřili pomocí spektrometru a proměřili spektrální citlivost CMOS čipu, nedokázali jsme na fotovoltaických panelech zachytit elektroluminiscenční záření. Systém jsme ověřili i na jiných zdrojích infračerveného záření, kde fungoval bez problému. Po sériích testů na různých fotovoltaických panelech, a i na samostatných článcích panelů jsme se nedočkali jiných výsledků než temných snímků. Při hlubším bádání problematiky jsme došli k závěru, že by kamera byla schopna detekovat elektroluminiscenční záření při snímání s delším expozičním časem. U nízkonákladových komerčních kamer bohužel nastavování expozičního času není možné. Řešením by bylo použití digitálního zrcadlového fotoaparátu. Zde však narážíme na problém z hlediska snadné úpravy fotoaparátu na plnospektrální snímání a v neposlední řadě na řádově vyšší cenovou relaci.

LITERATURA

- [1] This Month in Physics History April 25, 1954: Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell. APS physics [online]. [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- [2] Stručná historie fotovoltaiiky. Tzbinfo [online]. Česká Republika: Fyzikální ústav Akademie věd ČR, 2014 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaiika/11652-strucna-historie-fotovoltaiiky>
- [3] Edmond Becquerel. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_Becquerel
- [4] A DIRECT PHOTOELECTRIC DETERMINATION OF PLANCK'S "h.". APS physics [online]. 1916 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: <http://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.7.355>
- [5] Analýza fotovoltaiických článků pomocí fotoluminiscence. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jirí Vanek, Ph.D.
- [6] Fotoelektrický jev. Ictphysics [online]. [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: <http://ictphysics.upol.cz/remotelab/doku/Fotoelektricky%20jev.pdf>
- [7] Atomy a atomová jádra. Astronuklfyzika [online]. [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika.htm>
- [8] Solární (fotovoltaiické) články. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2016-11-03]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [9] Konstrukce a výroba fotovoltaiických článků a panelů. Elektro časopis pro elektrotechniku [online]. Praha [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/konstrukce-a-vyroba-fotovoltaiickych-clanku-a-panelu--10310>

- [10] Křemík. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Křem%C3%ADk>
- [11] Vliv teplotních závislostí luminiscence solárních článků. Brno, 2010. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Dolenský.
- [12] Alternativní zdroje energie Laboratorní úlohy. Brno, 2014. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] Luminiscence. Katedra biofyziky Přírodovědecká fakulta [online]. Olomouc [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://biofyzika.upol.cz/userfiles/file/OSP1-5Web.pdf>
- [14] Principy fluorescenční spektroskopie. Společnost pro biologickou psychiatrii [online]. Praha [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://psych.lf1.cuni.cz/fluorescence/soubory/principy.htm>
- [15] DIAGNOSTICKÉ METODY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ. ABS-Portal [online]. Brno [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku>
- [16] MathWorks. *Mathworks* [online]. 2014 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/159282-convert-from-rgb-to-grayscale-without-rgb2gray>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

E	Energie fotonu [J]
h	Planckova konstanta [J · s]
f	Frekvence záření [s ⁻¹]
f ₀	Prahová frekvence [s ⁻¹]
E _k	Kinetická energie [J]
W _v	Výstupní práce materiálu nutná k uvolnění elektronu [J]
λ	Vlnová délka [nm]
λ ₀	Vln. délka odpovídající uvolnění elektronu s nulovou kin. energií [Hz, m]
U	Elektrické napětí [V]
I	Elektrický proud [A]
T	Teplota [°C]
E ₁	Elektroměr 1
E ₂	Elektroměr 2
SiO ₂	Oxid křemičitý
GaAs	Arsenid galitý
LBIC	Light Beam Induced Current (Světelný paprsek indukovaný el. proudem)
LBIV	Light Beam Induced Power (Světelný paprsek indukovaný el. napětím)
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
LED	Light Emitting Diode (Světlo emitující dioda)
RTG	Rentgenové záření
UV	Ultrafialové záření
VIS	Viditelné záření
IR	Infračervené záření
AVG	Průměrná hodnota
PC	Personal Computer (Osobní Počítač)
RGB	Red-Green-Blue (Červená-Zelená-Modrá)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Z leva Alexandre Edmond Becquerel a otec Antoine César Becquerel. [3] ...	10
Obr. 1.2: Zařízení pro studium fotoefektu se znázorněním vlnového a kvantového pojetí. [7]	12
Obr. 1.3: Experimentální zařízení prof. Millikana – „dílna ve vakuu“. [4]	13
Obr. 2.1: Princip fotovoltaického článku. [8]	15
Obr. 2.2: Primitivní FV systém.....	17
Obr. 2.3: Autonomní FV systém.....	18
Obr. 2.4: Fotovoltaický systém spojený se sítí.	18
Obr. 2.5: Křemík jako základní surovina. [10]	19
Obr. 2.6: Ingoty (polotovary) křemíku o různých průměrech. [9].....	20
Obr. 2.7: Monokrystalický fotovoltaický článek.	21
Obr. 2.8: Polykrystalický fotovoltaický článek.	22
Obr. 2.9: Tenkovrstvý fotovoltaický článek.	22
Obr. 3.1: Vírový defekt solárního článku. [12].....	23
Obr. 3.2: Defekt vnitřního pnutí solárního článku. [5]	24
Obr. 3.3: Mechanické poškození a chybná metalizace solárního článku. [12].....	24
Obr. 3.4: Defekt vzniklý nehomogenitou difúzní vrstvy. [12]	24
Obr. 3.5: Analýza výstupních proudů metodou LBIC v lineární škále odstínu šedé. [15]	25
Obr. 3.6: Zářivé a nezářivé přechody mezi elektronově vibračními stavy složité molekuly. [14]	26
Obr. 3.7: Detekce defektu materiálového pnutí pomocí elektroluminiscence. [15]	28
Obr. 3.8: Detekce defektů pomocí luminiscence mikroplazmy. [15]	28
Obr. 3.9: Detekce defektů pomocí fotoluminiscence. [5]	29
Obr. 4.1: Kamera Moravské přístroje KAF – 3200ME.	30
Obr. 4.2: Kamera Moravské přístroje KAF – 3200ME s objektivem.....	30
Obr. 4.3: Blokové schéma zapojení pracoviště pro metodu elektroluminiscence. [12] .	31

Obr. 4.4: Defekty monokrystalického článku zkoumané metodou elektroluminiscence.	31
Obr. 4.5: Defekty polykrystalického článku zkoumané metodou elektroluminiscence.	32
Obr. 4.6: Kamera SJCAM SJ4000.	33
Obr. 4.7: Odstranění předního krytu kamery.	34
Obr. 4.8: Kamera s odstraněným předním krytem.	34
Obr. 4.9: Odstranění aretačního kroužku objektivu.	35
Obr. 4.10: Kamera s demontovaným objektivem.	35
Obr. 4.11: IR filtr umístěný na zadní straně objektivu.	36
Obr. 4.12: Objektiv s odstraněným IR filtrem.	36
Obr. 4.13: Fotografie s odstraněným IR filtrem.	37
Obr. 4.14: Infračervená dioda na dálkovém TV ovládaní.	37
Obr. 4.15: Schéma spektrometru VS140.	38
Obr. 4.16: Grafická závislost vlnových délek jednotlivých součástí.	39
Obr. 4.17: Blokové schéma zapojení měřícího pracoviště.	40
Obr. 4.18: Grafická závislost intenzity světla a vlnových délek LED diod.	41
Obr. 4.19: Odražené světlo LED diod zleva modrá, zelená, žlutá a infračervená.	41
Obr. 4.20: Grafická závislost citlivosti CMOS čipu.	42
Obr. 4.21 Blokové schéma měření defektů upravenou kamerou.	43

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Srovnání účinnosti jednotlivých technologií fotovoltaických článků. [8].....	19
Tab. 4.1: Parametry vybíraných kamer.....	33
Tab. 4.2: Naměřené hodnoty citlivosti čipu.....	42

SEZNAM PŘÍLOH

A	Výpis programu matlab	54
A.1	Funkce grayImage	54
A.2	Pomocná funkce	54

A VÝPIS PROGRAMU MATLAB

A.1 Funkce grayImage

```
1 function grayImage = grayscale(rgbImage)
2 try
3     [rows, columns, numberOfColorChannels] = size(rgbImage);
4     if numberOfColorChannels == 3
5         % It's color, need to convert it to grayscale.
6         redChannel = rgbImage(:, :, 1);
7         greenChannel = rgbImage(:, :, 2);
8         blueChannel = rgbImage(:, :, 3);
9         % Do the weighted sum.
10        grayImage = .299*double(redChannel) + ...
11                    .587*double(greenChannel) + ...
12                    .114*double(blueChannel);
13        % You probably want to convert it back to uint8 so you can display it.
14        grayImage = uint8(grayImage);
15    else
16        % It's already gray scale.
17        grayImage = rgbImage; % Input image is not really RGB color.
18    end
```

A.2 Pomocná funkce

```
1 gray=grayscale(IR_0075);
2 image(gray);
3 pomoc(:,:,1)=gray;
4 pomoc(:,:,2)=gray;
5 pomoc(:,:,3)=gray;
6 image(pomoc);
7 mean(mean(gray),2)
```